

PROPUESTA DE UN MODELO PARA LA LOCALIZACIÓN DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL MUNICIPIO DE LA UNIÓN VALLE
DEL CAUCA

JUAN JOSE MORCILLO LOZANO
KEVIN FERNANDO MORENO MEJIA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2024

PROPUESTA DE UN MODELO PARA LA LOCALIZACIÓN DE UNA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL MUNICIPIO DE LA UNIÓN VALLE
DEL CAUCA

JUAN JOSE MORCILLO LOZANO
KEVIN FERNANDO MORENO MEJIA

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR:
MSc. JULIAN GONZALEZ VELASCO



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2024

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	7
Planteamiento del problema.....	7
Pregunta de investigación	9
Justificación	9
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos	11
Estado del arte.....	11
Metodología	13
Tipo de Investigación.....	13
Tipo de trabajo de campo.....	13
Explicación y justificación del enfoque metodológico	14
1. Factores relevantes que inciden en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales.....	15
1.1 Revisión de la literatura sobre el tema.....	15
1.2 Sistematización de resultados	25
1.3 Conclusiones del capítulo	27
2. Análisis de las alternativas viables de localización de una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio objeto de estudio	28
2.1 Selección de alternativas de localización	31
2.1.1 Zonificación y criterios de localización.....	31
2.1.2 Micro-localización	32
3. Propuesta de localización de la planta de tratamiento de aguas para La Unión.....	32
3.1 Revisión de la literatura	32
3.2 Definición del modelo	35
3.3 Aplicación del modelo de programación lineal para localización óptima de la PTAR ..	36
3.3.1 Zonificación y criterios de localización.....	36
3.3.2 Modelo de programación lineal para la localización de la PTAR.....	36
3.3.3 Formulación del modelo	37
3.3.4 Data requerida para aplicar el modelo	39
3.4 Aplicación del modelo	42
3.4.1 Escenarios	46
4. Conclusiones.....	48

5. Recomendaciones	50
Referencias bibliográficas.....	51

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Proceso metodológico	13
Tabla 2. Enfoques metodológicos y factores clave considerados en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).....	25
Tabla 3. Data requerida para el modelo	41
Tabla 4. Variables y unidades.....	43

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Localización de alternativas para la planta de tratamiento de aguas residuales. La Unión.....	29
Figura 2. Sectores normativos PBOT La Unión.	30
Figura 3. Evidencia del funcionamiento del modelo Solver en Excel.	44
Figura 4. Resultados del modelo Solver en Excel.	45
Figura 5. Informe de resultados del modelo Solver en Excel.	46
Figura 6. Informe de resultados del modelo Solver en Excel. Escenario alternativo	47

Introducción

El tratamiento de aguas residuales – AR es una operación clave en la industria de procesos, (ORG.ING QUIMICA, 2012). Esta es de suma importancia ya que se ha implementado normas a nivel mundial para el cuidado del medio ambiente y más en el cuidado y tratado del agua ya que es uno de los recursos más importantes, todas o si no la gran mayoría de empresas deberían de implementar una planta para el tratamiento del agua residual.

El agua es un recurso natural imprescindible para la vida humana. Una persona en situación extrema no podría resistir más de cinco días sin beberla. Pero, además, dentro del diario vivir se ha convertido en un recurso de bastante importancia ya que esta se utiliza para muchas labores cotidianas, en pocas palabras ya es indispensable en las vidas de las personas y actividades, (UNADE, 2022). Por esta razón es de suma importancia cuidar los recursos hídricos viendo hacia un futuro implementando estas plantas.

Es crucial implementar plantas de tratamiento de aguas residuales provenientes de los hogares en el municipio de La Unión, Valle del Cauca, con el fin de evitar que estas aguas sean vertidas sin tratamiento en los ríos, arroyos u otros cuerpos de agua. La falta de tratamiento adecuado podría generar un grave impacto ambiental, comprometiendo la calidad de los recursos hídricos locales. Con la instalación de estas plantas, las aguas residuales podrían ser depuradas antes de su vertimiento, reduciendo significativamente la contaminación y ayudando a preservar este valioso recurso natural. Además, el tratamiento adecuado permitiría la reutilización de las aguas tratadas en actividades necesarias, promoviendo así un uso más sostenible y responsable del agua en la región.

Diversos autores argumentan que el objetivo básico del tratamiento de AR es proteger la salud, promover el bienestar de las personas y proteger el ambiente. Para otros autores, el objetivo es modificar las características del agua de tal forma que el efluente tratado cumpla con los requisitos especificados en la legislación, para ser vertido en un cuerpo receptor sin causar impactos adversos en el ecosistema o pueda ser reutilizado en otras actividades (Bernal y Cardona, 2003).

Planteamiento del problema

En Colombia, una gran parte de los sistemas hídricos que suministran agua a la población muestra una alta vulnerabilidad en cuanto a la disponibilidad del recurso. Según el IDEAM, aproximadamente el 50% de los habitantes de las áreas urbanas municipales corre el riesgo de enfrentar problemas de abastecimiento debido a las condiciones actuales de disponibilidad, regulación y presión sobre los sistemas hídricos que los abastecen. Esta situación se agrava considerablemente durante eventos climáticos extremos, como el fenómeno de El Niño, donde la vulnerabilidad en la disponibilidad del recurso hídrico puede superar el 80% (IDEAM, 2008).

En la cuenca alta del río Cauca, en el departamento del Valle, el 90% del territorio presenta alguna forma de escasez de agua superficial, la cual está relacionada solo en función de la cantidad del recurso y catalogada entre media, media-alta y alta (Sandoval y Soto, 2009).

Al año 2010 el número de plantas de tratamiento de agua residual en la cuenca del río Cauca en el departamento del Valle se incrementó a 12, con una inversión inicial adicional de \$49.814 millones (Corrales, 2003; CVC y Universidad del Valle, 2009; Duque, 2010). No obstante, las evaluaciones de los índices de calidad del río Cauca indican que esta fuente aún enfrenta limitaciones en su uso.

La contraloría del Valle del Cauca y la presidencia del Consejo Nacional de Contralores, afirma que sólo 16 de los 42 municipios del departamento tratan las aguas residuales generadas en sus cabeceras municipales, mientras que el resto, al no hacer ningún tipo de control, contribuyen a la contaminación de los ríos. Esta es una gran problemática en el departamento del Valle del Cauca y también en el municipio de la Unión Valle del Cauca, ya que este es uno de los municipios sin planta de tratado de aguas residuales (PTAR).

La contaminación de los cuerpos de agua origina, problemas de salud pública al aumentar el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas, problemas estéticos al alterar el aspecto agradable y natural del paisaje, problemas ambientales al comprometer la supervivencia de la biota presente, el bienestar de la población y los usos recreativos y deportivos; además, la contaminación demanda un mayor consumo de insumos químicos en las plantas de potabilización o de uso industrial (Unda, 1999). Esto podría llevar a que en localidades como Vijes, San Pedro, Zarzal, La Unión, La Victoria, Obando y Toro se registren problemas de escasez, en especial en épocas de verano.

Según la Gerencia de la CVC: “En algunos casos, la obra incluye la construcción de colectores para llevar las aguas residuales hasta la planta de tratamiento”. Esto genera costos adicionales, pero beneficia a cada uno de los habitantes del municipio de la Unión, ya que todo el municipio al localizar la planta en el mejor punto se beneficiará de ella, y podrá reutilizar el agua, además cuidar el ambiente que este también afecta a toda la comunidad.

El tratamiento de las aguas residuales es un gran problema en la actualidad, que día a día se va agravando, partiendo de que el agua es un bien común, limitado, escaso y cada vez más contaminado, se debe actuar y gestionar su uso inmediatamente de una manera adecuada y aprovechar las posibilidades que ofrece su reutilización. (El País, 2022).

El municipio de La Unión, ubicado en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, se encuentra a 396 km de la capital, Bogotá, y a 163 km de la ciudad de Cali. Geográficamente, su cabecera municipal está situada a una altitud de 975 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), con una temperatura promedio de 24°C, que puede descender a 18°C en la noche y alcanzar entre 30 y 36°C en verano. El territorio del municipio se extiende a lo largo de 125 km² y está caracterizado por dos unidades fisiográficas principales: una zona llana correspondiente al valle del río Cauca y una región montañosa al oeste, parte de la cordillera Occidental (Alcaldía Municipal de La Unión, 2023).

Según datos del DANE, La Unión cuenta con una población estimada de 34,633 habitantes, con una distribución urbana y rural del 77.7% y 22.3% respectivamente. Esta distribución demográfica es relevante para el diseño y ubicación de la PTAR, ya que una proporción significativa de la población reside en la cabecera municipal, lo que concentra la demanda de servicios de saneamiento en esa área (Clopad, 2021).

Antes de formular la pregunta de investigación, es esencial calcular el consumo de agua en el municipio, ya que esto permitirá estimar la cantidad de aguas residuales generadas. Según estándares nacionales citados en Clopad (2021), el consumo per cápita en zonas urbanas de Colombia oscila entre 100 y 150 litros por día, dependiendo de factores como el acceso al agua potable, el nivel socioeconómico y el clima. Suponiendo un consumo promedio de 125 litros por habitante por día, la población urbana de La Unión, que representa aproximadamente 26,919 personas, consumiría cerca de 3,364,875 litros diarios. Esta cifra es fundamental para extrapolar la generación de aguas residuales, que usualmente se estima en un 80% del consumo de agua, resultando en aproximadamente 2,691,900 litros diarios de aguas servidas.

La Unión presenta un promedio de precipitaciones de 1,117 mm anuales, con periodos lluviosos que se concentran entre marzo y mayo, y entre septiembre y diciembre. Este patrón de lluvias es relevante para el diseño de la PTAR, ya que es necesario considerar si existe un sistema de separación entre las aguas pluviales y las aguas servidas. La falta de un sistema de separación puede sobrecargar la PTAR durante los periodos de lluvia intensa, lo que afectaría su capacidad operativa y la eficiencia del tratamiento (Clopad, 2021).

Además, el municipio se abastece de agua a través de cuerpos hídricos locales, como la quebrada La Unión, el río Cauca y otros cursos de agua menores. Actualmente, la infraestructura existente en La Unión cuenta con un sistema integral de tratamiento de aguas residuales, que incluye tres sistemas principales: uno en el área urbana y dos en los centros poblados de San Luis y Quebrada Grande (Concejo Municipal, 2000). Sin embargo, estos últimos presentan deficiencias operativas que requieren intervención urgente.

Dado que el municipio tiene un relieve variado, con zonas llanas y montañosas, es recomendable que la ubicación de la PTAR se sitúe en un área con topografía favorable, acceso a vías principales y fuera de zonas propensas a inundaciones, como se ha mencionado en estudios anteriores.

Pregunta de investigación

¿Cuál debería ser la mejor localización de una planta de tratamiento de aguas residuales PTAR, en el municipio de la Unión Valle, que contribuya a garantizar la mayor cobertura de población, tanto rural como de cabecera municipal?

Justificación

La identificación de la ubicación óptima para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el municipio de La Unión, Valle del Cauca, es de vital importancia tanto desde una perspectiva de ingeniería industrial como desde una perspectiva socioambiental. En términos de ingeniería, la adecuada localización de una PTAR es un factor determinante para maximizar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, minimizar costos operativos, y garantizar una cobertura óptima que beneficie tanto a la población rural como a la cabecera municipal.

Desde un punto de vista teórico, la ingeniería industrial se enfoca en la optimización de sistemas complejos, y en este caso, en la localización estratégica de una PTAR para alcanzar los objetivos

de cobertura y eficiencia. La localización de instalaciones es un problema clásico en la ingeniería industrial que requiere la consideración de múltiples variables y restricciones, tales como la proximidad a las fuentes de aguas residuales, el acceso a infraestructura existente, la minimización de costos de transporte, y el cumplimiento de normativas ambientales. Estos principios teóricos se aplican para diseñar un modelo que permita seleccionar el sitio óptimo para la PTAR, con el objetivo de minimizar los costos.

En la práctica, el municipio de La Unión enfrenta desafíos significativos debido a la falta de un sistema centralizado y eficiente para el tratamiento de aguas residuales. La ausencia de una PTAR adecuada lleva a la descarga de aguas no tratadas en cuerpos de agua naturales, lo que genera graves consecuencias para el medio ambiente y para la salud pública. Además, la dispersión de la población entre áreas rurales y la cabecera municipal plantea un reto adicional en términos de cobertura y eficiencia en la prestación del servicio de tratamiento de aguas residuales.

Es importante considerar la Ley 373 de 1997, la cual establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), que tiene como objetivo mejorar la eficiencia en el uso del agua y minimizar la contaminación de las fuentes hídricas, incentivando la implementación de tecnologías adecuadas para el tratamiento de aguas residuales.

El alcance de este trabajo de grado se centra en determinar la ubicación más adecuada para la PTAR en La Unión, utilizando un enfoque de programación lineal para optimizar la cobertura de la población atendida. Este enfoque permitirá identificar el sitio que minimiza los costos asociados con la construcción y operación de la planta. La implementación de esta metodología contribuye directamente al desarrollo de soluciones prácticas y efectivas, alineadas con los principios de sostenibilidad y responsabilidad social.

En términos educativos, este proyecto ofrece una oportunidad para que los estudiantes de ingeniería industrial apliquen herramientas avanzadas de optimización y toma de decisiones en un contexto real. A través de este proceso, los estudiantes desarrollarán competencias clave en la modelización de sistemas complejos, la evaluación de alternativas, y la implementación de soluciones que generen un impacto tangible en su comunidad. La participación en este proyecto fortalece su formación integral al combinar conocimientos técnicos con una comprensión profunda de los desafíos sociales y ambientales de su entorno.

Objetivo general

Realizar una propuesta para la localización de una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio de la Unión Valle del Cauca, que contribuya a minimizar los costos.

Objetivos específicos

- Determinar los factores relevantes que inciden en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Identificar las alternativas viables de localización de una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio objeto de estudio.
- Proponer la localización de la planta de tratamiento de aguas residuales que integre los factores clave considerados a través de un modelo que recoja los factores relevantes y considere las alternativas identificadas.

Estado del arte

En el estado del arte del presente trabajo, se destacan diversas investigaciones que abordan la localización y optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Colombia, cada una aportando enfoques y modelos específicos para enfrentar los desafíos del sector.

Barrera, et al. (2005) desarrollaron un modelo numérico orientado a priorizar las inversiones en tratamiento de aguas residuales a nivel municipal en Colombia. Consideraron parámetros ambientales y de salud pública, como la población (POB), los niveles de contaminantes (LONG y coli), la demanda financiera (NBI y POB), así como la infraestructura existente en servicios públicos (ACU, ALC y PTAP). Mediante el análisis de diferentes escenarios de tratamiento, determinaron la eficacia de cada opción en la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua, lo que permitió priorizar las inversiones en función de la efectividad y la viabilidad técnica. Este estudio destacó la carencia de información estructurada sobre la red hídrica nacional, subrayando la necesidad de contar con datos sistematizados para un análisis más preciso de la contaminación hídrica generada por asentamientos humanos.

Virginia Lahera (2010) propuso una infraestructura sustentable para plantas de tratamiento de aguas residuales utilizando un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA). Este sistema combina procesos biológicos anaerobios y aerobios, complementados con biofiltración y bioconversión mediante un humedal artificial. La propuesta de Lahera ofrece un tratamiento de alta calidad y eficiencia costo-beneficio, eliminando la producción de lodos y otros subproductos tóxicos. A pesar de que la implementación del RAFA representa un costo inicial un 15% superior al de plantas tradicionales de lodos activados, los costos de operación y mantenimiento se reducen hasta en un 35%, además de generar biomasa vegetal con potencial valor comercial, lo que contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental del sistema.

Robinson Buitrago Llanos (2011) presentó una propuesta de optimización para el sistema de tratamiento de aguas residuales de Casa Grajales S.A. y Grupo Clozano Frexco S.A. en La Unión, Valle del Cauca. El enfoque se centró en optimizar las unidades de pretratamiento, tratamiento primario y biológico, con el objetivo de mejorar las condiciones de operación, manejo y mantenimiento del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR). La optimización buscaba garantizar un mejor funcionamiento del sistema, reduciendo las cargas contaminantes y asegurando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente. Además, Buitrago analizó el

riesgo de incrementos de costos y realizó un análisis costo-beneficio sobre las alternativas planteadas, destacando la importancia de una gestión eficiente para mantener la viabilidad económica del sistema.

Peña, Ordoñez y Arana (2017) desarrollaron un modelo integrado para la evaluación de alternativas de localización de PTAR en una ciudad del Valle del Cauca, Colombia. Su enfoque combinó un modelo de costo de transporte, un modelo tarifario y un modelo de proyección poblacional, con una función objetivo centrada en la minimización de los costos de transporte. Este modelo consideró aspectos tarifarios aplicables por el gobierno y las proyecciones de crecimiento poblacional, que influyen en los flujos de aguas residuales a gestionar. Al integrar estos modelos, los autores evitaron problemas asociados a costos y transportes que podrían surgir si se trabajaran por separado, proporcionando una herramienta robusta para la toma de decisiones en la localización de PTAR.

Finalmente, Andrade y Castro (2017) llevaron a cabo el diseño hidráulico de una PTAR para el nuevo hospital del municipio de Zipaquirá, Colombia. Su metodología incluyó la realización de tratamientos preliminar, primario, secundario y terciario o avanzado, así como la disposición del lodo. Evaluaron diversas alternativas de tratamiento, seleccionando la más adecuada en función de la remoción de cargas contaminantes, el cumplimiento de la normatividad vigente (DEC. 0631/2015 – RAS 2000 y resoluciones del Ministerio del Medio Ambiente de marzo de 2015), la relación de espacio, la facilidad de mantenimiento y las condiciones de durabilidad y resistencia. Además, enfatizaron la necesidad de monitorear continuamente el afluente y el efluente para prevenir anomalías que pudieran interferir con el funcionamiento óptimo de la planta.

Los parámetros de suma importancia que se deben tener en cuenta según Barrera, et al. (2005) que se tuvieron en cuenta para priorizar la inversión en tratamiento de aguas residuales fueron los siguientes: Ambientales y de salud pública, Demanda financiera y la infraestructura en servicios públicos, esto para tener en cuenta cada uno de los parámetros que se verán en el proceso de construcción, planeación y tratado de agua residual para saber cuáles son las ventajas y beneficios que obtendremos pero también saber cuáles son todas contras que tendremos en este proyecto, además los estudios realizados por los investigadores arrojan que es necesario tener un tratamiento de agua residual en cada municipio para disminuir tanta contaminación de nuestro recurso hídrico.

Lahera (2010) seleccionó un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) para la planta, resaltando su elevada eficacia en la eliminación de contaminantes. Este sistema proporciona un tratamiento de aguas residuales de alta calidad, con una notable eficiencia en la relación costo-beneficio. A diferencia de otros métodos, el RAFA no genera lodos ni subproductos tóxicos, lo que refuerza su sostenibilidad ambiental. Aunque su costo inicial es mayor, la efectividad y eficiencia general de este sistema justifican la inversión adicional, convirtiéndolo en una opción altamente recomendada para el proyecto en desarrollo.

Por su parte, Buitrago (2011) plantea la propuesta de optimización para las unidades de pretratamiento, tratamiento primario y biológico, con el fin de mejorar las condiciones de operación, manejo y mantenimiento y que a futuro el STAR pueda cumplir con la normatividad ambiental vigente. el investigador nos muestra un modelo, además la optimización de esta para

que la planta pueda cumplir con las normas nacionales, y nos muestra los pasos del modelo, esta con el fin de mejorar cada uno de los factores de la planta.

Andrade y Castro (2017) evaluaron diversas alternativas de tratamiento y seleccionaron la más adecuada en función de la eficiencia en la remoción de carga contaminante y la calidad del agua, conforme a la normatividad vigente (DEC. 0631/2015 – RAS 2000 y Resolución 0631/2015 del Ministerio de Medio Ambiente). Los investigadores analizaron detalladamente cada normativa y propusieron diferentes opciones basadas en estas, con el objetivo de identificar la más viable en términos de beneficio, costo y eficiencia. Además, enfatizaron la importancia de un monitoreo constante de la planta para detectar y mitigar cualquier anomalía de manera inmediata.

Metodología

Tipo de Investigación

La metodología propuesta tiene un enfoque cuantitativo y descriptivo. El enfoque cuantitativo se justifica por el uso de datos numéricos, modelos matemáticos y análisis estadísticos para determinar la mejor localización de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el municipio de La Unión, Valle del Cauca. Es descriptiva porque busca analizar y describir los factores que inciden en la localización de la PTAR, las alternativas viables y el modelo más adecuado para la toma de decisiones.

Tipo de trabajo de campo

El trabajo de campo que se llevó a cabo es de carácter exploratorio y deductivo. La fase exploratoria implica la recopilación y análisis de datos relevantes del municipio, así como la identificación de las alternativas de localización. El enfoque deductivo se utilizará para aplicar modelos teóricos existentes a la situación específica del municipio, permitiendo una toma de decisiones adecuada.

Tabla 1. Proceso metodológico

Objetivo específico	Fases	Actividades	Técnicas e instrumentos	Entregables
Determinar los factores relevantes que inciden en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales.	FASE 1: Investigar los factores a tratar para la implementación de la planta.	- Analizar los artículos seleccionados.	- Búsquedas en páginas web y bases de datos académicas.	Entregable: Informe técnico que detalla los factores críticos para la localización de la PTAR.
		- Consultar bases de datos del municipio y fuentes primarias en la alcaldía.	- Informes municipales.	
		- Elaborar esquemas y modelos para definir las zonas y los factores a tratar.	- Informes oficiales.	

Objetivo específico	Fases	Actividades	Técnicas e instrumentos	Entregables
Analizar las alternativas viables de localización de una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio objeto de estudio.	FASE 2: Identificar los puntos críticos y definir las alternativas viables.	- Consultar los riesgos asociados con la construcción de la planta en diferentes zonas.	- Análisis de mapas geográficos del municipio.	Entregable: Documento con el análisis comparativo de las alternativas de localización.
		- Identificar las alternativas de tratamiento de aguas más viables, considerando factores técnicos y económicos.	- Revisión del Plan de Ordenamiento Territorial (POT).	
			- Uso de sistemas de información geográfica (SIG).	
Definir un modelo que determine la localización de la planta de tratamiento de aguas residuales que integre los factores clave considerados.	FASE 3: Formulación y diseño del modelo.	- Revisar la literatura sobre modelos de localización.	- Aplicación de algoritmos exactos.	Entregable: Modelo matemático optimizado que sugiere la mejor localización para la PTAR.
		- Seleccionar un modelo adecuado.	- Búsqueda en bases de datos especializadas.	
		- Establecer parámetros, variables, función objetivo y restricciones del modelo.	- Revisión de artículos académicos y estudios previos.	

Fuente: Elaboración propia.

Explicación y justificación del enfoque metodológico

Enfoque cuantitativo: La naturaleza del problema de localización de la PTAR exige la recolección y análisis de datos numéricos, la evaluación de alternativas mediante modelos matemáticos, y la optimización basada en criterios objetivos. Este enfoque garantiza rigor en la evaluación y la toma de decisiones basada en evidencia.

Trabajo de campo exploratorio: Se recopilaban datos relevantes del municipio, tanto cualitativos como cuantitativos, a través de visitas al lugar, información de autoridades locales, y análisis de documentos oficiales. Este trabajo permitió identificar los factores críticos que deben considerarse en la localización de la PTAR.

Enfoque descriptivo y deductivo: Se describieron las características y condiciones actuales del municipio en relación con la localización de la PTAR. A partir de un análisis deductivo, se aplicarán modelos teóricos existentes para la solución del problema específico de localización, lo que contribuirá a una solución más precisa y contextualizada.

Entregables: Los entregables de cada fase están claramente definidos e incluyen informes técnicos, análisis comparativos, y la formulación de un modelo matemático optimizado que apoye la toma de decisiones en la localización de la PTAR.

1. Factores relevantes que inciden en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales

En la búsqueda constante por garantizar el acceso universal a servicios básicos de calidad, la gestión adecuada de los recursos hídricos se ha convertido en una prioridad en todo el mundo. En particular, el tratamiento de aguas residuales juega un papel crucial en la protección del medio ambiente y la salud pública, ya que permite la eliminación de contaminantes antes de que sean liberados nuevamente al entorno (Barrantes & Cartín, 2017).

En este contexto, la localización adecuada de las plantas de tratamiento de aguas residuales se vuelve esencial para lograr resultados óptimos en términos de cobertura y eficiencia. En el municipio de La Unión - Valle del Cauca, se ha identificado la necesidad de desarrollar una propuesta de localización de una de estas plantas que minimice los costos y beneficie a la población local.

1.1 Revisión de la literatura sobre el tema

El propósito de este capítulo es identificar los factores relevantes que inciden en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales y, con base en ello, presentar una propuesta de localización específica para el municipio de La Unión. Para lograrlo, inicialmente se analizaron diversos artículos que han abordado esta temática, lo cual permitió tener una lista de factores que, posteriormente, se contrastarán con las particularidades del municipio en estudio de tal forma que se puedan identificar alternativas de localización.

Gorani & Ebraheem (2012) afirman que la localización de sistemas de tratamiento de aguas residuales es un aspecto esencial en la planificación y gestión efectiva de aguas residuales. Esto implica recopilar, analizar y visualizar datos que estén relacionados espacialmente. Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas adecuadas para mejorar el análisis y la comprensión de los problemas existentes en las plantas de tratamiento y aumentar su confiabilidad en la elección de la ubicación adecuada para el tratamiento. Estos sistemas utilizan un modelo SIG basado en ARCGIS para realizar dichos análisis.

Los autores referenciados presentan un estudio que tiene como objetivo resolver los problemas existentes en la ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante la aplicación de la lógica del SIG. Se busca identificar los factores socioeconómicos y ambientales críticos utilizando datos espaciales. El objetivo final es encontrar una forma más completa y conveniente de optimizar las ubicaciones de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales, considerando las diferentes condiciones locales. Por lo tanto, se utiliza el enfoque del SIG para mejorar la toma de decisiones en cuanto a la ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta aspectos socioeconómicos y ambientales relevantes.

De acuerdo con el estudio de Gorani & Ebraheem (2012), los principales factores considerados en la localización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son los siguientes:

Zonas bajas: Se busca ubicar la PTAR en áreas de terreno bajo para facilitar la entrada de materiales y el flujo de las aguas residuales.

Evitar áreas propensas a inundaciones: Se excluyen las áreas que son propensas a inundaciones, ya que no son adecuadas para la ubicación de la PTAR.

Exclusión de zonas de vivienda y áreas militares: La PTAR se elige fuera de las zonas de vivienda y áreas militares, respetando las restricciones y distancias establecidas.

Área suficiente: Se considera que el área total de la ubicación propuesta no sea inferior a 1 km * 1 km.

Accesibilidad a carreteras principales: Se busca que la PTAR esté ubicada a una distancia adecuada de las principales vías de acceso, facilitando así el transporte de materiales y el acceso para el mantenimiento y operación de la planta.

Estos factores son fundamentales para garantizar una ubicación adecuada de la PTAR, optimizando su funcionamiento y minimizando los riesgos asociados a las inundaciones y a la proximidad a zonas pobladas o áreas militares.

Shahnoradi & Asghar (2013) afirman que en el ámbito de la planificación urbana, uno de los desafíos ambientales es encontrar sitios apropiados para la construcción de infraestructuras como plantas de tratamiento de agua y aguas residuales. Esta tarea se complica debido a la multitud de factores que deben tenerse en cuenta en la toma de decisiones. En su estudio, los autores utilizan un enfoque integrado que combina la lógica difusa y un modelo de decisión multicriterio para seleccionar un sitio adecuado para establecer una planta de tratamiento de aguas residuales en el distrito de Kahak, Irán. Para evaluar los parámetros relevantes, emplean el software Super Decision y un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados indican que la parte occidental de Kahak se identificó como un lugar apropiado para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales municipal. Este enfoque integrado ofrece a los responsables de la toma de decisiones y a los formuladores de políticas una herramienta eficaz para determinar la ubicación más adecuada para una planta de tratamiento de aguas residuales, optimizando así los resultados en términos de calidad y eficiencia del proceso de tratamiento.

De acuerdo con la revisión de la literatura efectuada por Shahnoradi & Asghar (2013), los principales factores considerados en la localización de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) son los siguientes:

Suelo: Se evalúa la calidad y características del suelo en el área propuesta para determinar su idoneidad para el tratamiento de aguas residuales.

Pendiente: Se analiza la pendiente del terreno para asegurar que sea adecuada para el flujo y tratamiento de las aguas residuales.

Topografía: Se considera la configuración topográfica del terreno para determinar la viabilidad de construcción y operación de la PTAR.

Geología: Se estudia la composición geológica del área para identificar posibles influencias en el tratamiento de aguas residuales y evitar riesgos de contaminación.

Uso del suelo: Se evalúa el uso actual del suelo en el área propuesta, considerando factores como la protección de áreas sensibles o la compatibilidad con actividades residenciales, industriales u otras.

Viento: Se tiene en cuenta la dirección y velocidad del viento en el área para garantizar una dispersión adecuada de los gases y olores generados por el proceso de tratamiento.

Distancia desde la ciudad principal: Se considera la distancia de la PTAR a la ciudad principal o centros poblados relevantes para garantizar un acceso adecuado y minimizar las molestias a la población cercana.

Agua subterránea: Se evalúa la presencia y calidad del agua subterránea en el área propuesta, evitando posibles contaminaciones o interferencias con acuíferos.

Agua superficial: Se analiza la cercanía y calidad de los cuerpos de agua superficiales, como ríos o lagos, para evitar impactos negativos en los ecosistemas acuáticos.

Carreteras: Se considera la accesibilidad y conectividad vial del sitio propuesto, facilitando el transporte de materiales y el acceso para el mantenimiento y operación de la PTAR.

Asentamientos: Se evalúa la proximidad de áreas habitadas o asentamientos humanos para evitar posibles conflictos o molestias a la población cercana.

Estos factores son fundamentales para garantizar una ubicación adecuada de la PTAR, teniendo en cuenta tanto aspectos técnicos como ambientales y sociales.

El trabajo realizado por Rodríguez, García y Pardo (2015) se centra en la planificación ambiental hídrica en cuencas hidrográficas, con un enfoque específico en la selección de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en países en vías de desarrollo. Reconocen que este proceso de selección debe abordarse considerando una serie de elementos clave que van desde la composición típica del agua residual cruda hasta aspectos ambientales y estratégicos de localización.

En primer lugar, los autores destacan la importancia de comprender la composición típica del agua residual cruda, ya que esto influirá en la elección de la tecnología de tratamiento más adecuada. Además, es esencial evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes por tipo de tecnología, ya que cada planta de tratamiento puede variar en su capacidad para eliminar ciertos contaminantes.

Otro aspecto crucial que abordan es la consideración de indicadores de desempeño por tecnología. Estos indicadores proporcionan una medida objetiva del rendimiento de cada tecnología de

tratamiento y son fundamentales para tomar decisiones informadas sobre qué tecnología utilizar en un contexto específico.

Además de los aspectos técnicos, los autores también subrayan la importancia de los aspectos económicos y ambientales en la selección de plantas de tratamiento. La viabilidad económica de cada opción de tratamiento debe evaluarse cuidadosamente, teniendo en cuenta tanto los costos iniciales como los costos operativos a largo plazo. Asimismo, se deben considerar los impactos ambientales de cada tecnología, tanto durante la operación como en términos de su huella ambiental total.

Finalmente, los autores proponen una metodología que integra todos estos aspectos técnicos, económicos y ambientales en una herramienta para la toma de decisiones. Esta metodología busca proporcionar a los tomadores de decisiones una base sólida para seleccionar las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales más apropiadas, teniendo en cuenta una variedad de factores multidisciplinarios.

Rodríguez, García y Pardo (2015) enfatizan varios aspectos importantes relacionados con la localización de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (PTARM). Estos incluyen:

- Alejamiento de ecosistemas críticos y zonas de recreación: Es fundamental que las PTARM estén ubicadas en sitios que estén alejados de ecosistemas sensibles y áreas destinadas a la recreación pública. Esto garantiza la protección de los recursos naturales y evita posibles conflictos con actividades recreativas.
- Seguridad ante amenazas naturales: Las PTARM deben estar localizadas en áreas que estén libres de amenazas como deslizamientos de tierra, inestabilidad geológica e inundaciones. Además, se sugiere que se implementen obras de protección en el perímetro de estas instalaciones para mitigar cualquier riesgo asociado con estos fenómenos naturales.
- Distancia adecuada de áreas pobladas: Se recomienda que las PTARM se sitúen a una distancia considerable de las áreas habitadas. Esto se traduce en una distancia mínima de aproximadamente un kilómetro de la población beneficiada, aunque puede ser menor en ciertos casos, como una distancia mínima de 200 metros a la residencia más cercana a la PTARM. Sin embargo, estas distancias pueden variar dependiendo de los resultados del estudio de impacto ambiental, el cual puede determinar si existen efectos adversos para la comunidad cercana.
- Dirección de los vientos: Se sugiere que la ubicación de las PTARM esté alejada de áreas donde los vientos regularmente se desplacen hacia la población beneficiada. Esto se hace para minimizar la exposición de la población a posibles olores u otros impactos asociados con la operación de la planta.
- Descarga de efluentes tratados: La descarga de las aguas residuales tratadas debe realizarse de manera adecuada, ya sea en un cuerpo de agua receptor de flujo permanente o a través de infiltración en el suelo o terreno circundante. Esta medida asegura que los efluentes tratados se manejen de manera responsable y no contribuyan a la contaminación de cuerpos de agua o del suelo.

Por lo tanto, los autores proponen una serie de criterios y consideraciones específicas para la ubicación de las PTARM, con el objetivo de garantizar su funcionamiento seguro y su mínima interferencia con el medio ambiente y las comunidades cercanas.

El trabajo realizado por Ruberto et al. (2015) se centra en encontrar la mejor ubicación para una planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya, ubicada en el Impenetrable Chaqueño. El objetivo principal es minimizar los impactos negativos que podrían surgir tanto durante la construcción como durante la operación de la planta.

Para lograr este objetivo, los autores desarrollaron un modelo de apoyo a la decisión basado en una técnica de optimización multiobjetivo. Este enfoque permite considerar múltiples objetivos simultáneamente, lo que es crucial dada la complejidad del problema y la variedad de aspectos para tener en cuenta.

Una característica importante del modelo propuesto es la incorporación de una variante de "relajamiento difuso". Esta técnica ayuda a manejar la incertidumbre y la imprecisión en los datos y las evaluaciones, lo que es común en este tipo de análisis.

En el proceso de selección de la ubicación óptima, se tuvieron en cuenta una serie de aspectos relevantes, incluyendo el riesgo sanitario, las molestias que podrían afectar a la población local, los costos asociados y otros aspectos técnicos específicos del contexto.

Es importante destacar que el enfoque adoptado en este trabajo buscó minimizar las valoraciones subjetivas que a menudo influyen en los procesos de selección de alternativas. Esto sugiere un enfoque más objetivo y basado en datos para la toma de decisiones, lo que puede conducir a resultados más equitativos y sólidos.

El aporte de los autores anteriores al problema de la localización de la planta de tratamiento de aguas residuales es importante por varias razones. En primer lugar, Ruberto et al. (2015) proponen la aplicación del Método del Análisis Jerárquico para abordar el problema de decidir la ubicación de la planta de tratamiento de agua. Este enfoque es una herramienta analítica estructurada que permite descomponer un problema complejo en subproblemas más manejables, lo que facilita la toma de decisiones.

En segundo lugar, Ruberto et al. (2015), identifican cuatro aspectos clave que deben tenerse en cuenta al seleccionar la ubicación de la planta de tratamiento de agua: social, ambiental, dificultades técnicas y económicas. Estos aspectos cubren una amplia gama de consideraciones, desde el impacto en la comunidad local hasta la viabilidad técnica y económica del proyecto. A continuación se explica un poco más cada uno de estos factores:

- **Aspecto Social:** Este aspecto aborda el impacto que la planta de tratamiento podría tener en la comunidad local. Incluye dos subcategorías principales:
 - **Riesgo sanitario:** Evalúa el potencial impacto en la salud pública debido a la presencia y operación de la planta de tratamiento. Se consideran aspectos como la calidad del agua tratada, el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua y la exposición a contaminantes.

- Molestias a la población: Se refiere a los posibles inconvenientes o molestias que la planta de tratamiento podría causar a los residentes cercanos. Esto puede incluir ruido, olores, tráfico de vehículos, y otros factores que podrían afectar la calidad de vida de la comunidad.
- Aspecto Ambiental: Este aspecto evalúa el impacto ambiental de la planta de tratamiento y sus operaciones en el entorno natural. Incluye consideraciones como:
 - Desmonte: Evaluación de la pérdida de vegetación natural debido a la construcción y operación de la planta.
 - Modificación del paisaje: Impacto visual y estético en el entorno natural debido a la presencia de la planta y sus estructuras asociadas.
 - Alteración de los suelos y de la morfología: Evaluación de los cambios en la composición y la estructura del suelo, así como en la topografía del terreno, como resultado de la construcción y operación de la planta.
- Dificultades Técnicas: Este aspecto se refiere a los desafíos técnicos asociados con la construcción y operación de la planta de tratamiento, incluyendo:
 - Tratamiento del agua: Evaluación de la viabilidad técnica de los procesos de tratamiento de agua necesarios para cumplir con los estándares de calidad requeridos.
 - Disposición final de los lodos residuales: Evaluación de las opciones disponibles para la gestión adecuada de los lodos residuales generados como subproducto del tratamiento de aguas residuales.
- Aspecto Económico: Este aspecto evalúa los costos y beneficios económicos asociados con la ubicación y operación de la planta de tratamiento. Esto puede incluir:
 - Costos de construcción: Evaluación de los costos asociados con la construcción de la planta y las infraestructuras necesarias.
 - Costos operativos: Evaluación de los costos recurrentes asociados con la operación y el mantenimiento de la planta a lo largo del tiempo.
 - Beneficios económicos: Evaluación de los beneficios económicos potenciales derivados de la presencia de la planta, como la creación de empleo local o el aumento de la inversión en la comunidad.

Adicionalmente, es importante destacar que Ruberto et al. (2015), enfatizan la necesidad de que estos aspectos sean independientes entre sí y que reflejen la problemática sin redundancias. Esto asegura que cada aspecto contribuya de manera única a la evaluación general y evita sesgos o duplicaciones en el análisis.

Finalmente, Ruberto et al. (2015), reconocen que la selección de aspectos puede variar dependiendo del contexto y de los analistas involucrados. Esto refleja una comprensión de que diferentes partes interesadas pueden tener diferentes prioridades o preocupaciones, lo que resalta la importancia de adaptar el enfoque a las circunstancias específicas.

El trabajo de Peña et al. (2017) aborda el desafío de determinar la ubicación óptima para una planta de tratamiento de aguas residuales en el contexto de tres alternativas de ubicación posibles. El

objetivo principal es identificar la ubicación que minimice los costos asociados con el transporte de aguas residuales desde su origen hasta cada una de las ubicaciones propuestas.

Para llevar a cabo esta evaluación, los autores consideran varios aspectos importantes:

- **Diseño de la red actual y sus características:** Los autores examinan detalladamente la infraestructura existente de la red de alcantarillado y acueducto. Esto incluye el mapeo de la red, la identificación de los puntos de origen de las aguas residuales y el análisis de las características de flujo y capacidad de la red.
- **Aspectos legales y tarifas aplicadas:** Se tienen en cuenta las regulaciones y normativas legales relacionadas con los servicios de acueducto y alcantarillado, así como las tarifas aplicadas a estos servicios. Esto es crucial, ya que puede influir significativamente en los costos asociados con el transporte de aguas residuales.

El enfoque del trabajo se centra en la optimización de los costos de transporte de aguas residuales, lo que implica encontrar la ubicación que minimice la distancia o los recursos necesarios para llevar las aguas residuales desde su origen hasta la planta de tratamiento. Esta optimización puede implicar consideraciones de distancia física, capacidad de la red existente, costos de mantenimiento y operación, entre otros factores relevantes.

La propuesta de Peña et al. (2017) para la localización de la planta de tratamiento de aguas se basa en la construcción de un modelo matemático que permite evaluar alternativas de ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). A continuación, se detallan los elementos clave de su propuesta:

- **Modelo Matemático:**

El modelo matemático se formula en el software GAMS y consta de varios elementos esenciales:

Conjuntos: Se definen los conjuntos de barrios (puntos de origen) y PTAR (puntos de destino final para el transporte del flujo).

Parámetros: Incluyen la capacidad de producción de los barrios, la capacidad máxima de tratamiento de las PTAR y el costo de transporte entre cada par de barrio y PTAR.

Datos: Se manejan en una tabla que proporciona una forma fácil de introducir los datos del problema, como las tarifas de servicio.

Variables de Decisión: En este caso, la variable de decisión es el flujo transportado entre cada par de barrios y PTAR, asociado a un costo determinado por las tarifas de alcantarillado.

- **Función Objetivo:**

La función objetivo del modelo es minimizar el costo total del transporte de aguas residuales desde los barrios hasta las PTAR. Se expresa como la suma de los costos de transporte multiplicados por los flujos asociados.

- Restricciones:

Se imponen restricciones que garantizan la viabilidad del modelo:

- Límite de capacidad máxima de producción para cada barrio.
- Satisfacción de la demanda para cada ubicación de la PTAR.
- Restricciones de no negatividad en los flujos transportados.

De acuerdo con lo anterior, la propuesta de Peña et al. (2017) proporciona un marco sistemático y cuantitativo para evaluar las alternativas de ubicación de una PTAR, teniendo en cuenta factores como la capacidad de producción de los barrios, la capacidad de tratamiento de las PTAR, los costos de transporte y las restricciones operativas y legales. Esto permite tomar decisiones informadas y eficientes en la planificación de infraestructuras de tratamiento de aguas residuales.

El trabajo realizado por Pilar et al. (2017) se enfocó en encontrar la mejor ubicación para una planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya, provincia del Chaco, situada en el Impenetrable Chaqueño. El objetivo principal fue minimizar los impactos negativos asociados con la construcción y operación de esta planta.

Para abordar este desafío, se desarrolló un modelo de apoyo a la decisión basado en una técnica de optimización multiobjetivo. Este enfoque permitió considerar diversos aspectos y atributos relacionados con la ubicación de la planta, tales como riesgo sanitario, molestias para la población, costos y otros factores técnicos vinculados con los procesos de tratamiento del agua.

Una característica clave del modelo fue la incorporación de una variante de "relajamiento difuso" basada en la lógica difusa. Esto significa que se tuvieron en cuenta atributos cualitativos, los cuales pueden ser difíciles de cuantificar de manera precisa, como aspectos sociales, ambientales, económicos y técnicos. La lógica difusa permitió manejar la incertidumbre y la imprecisión inherentes a estos atributos cualitativos, lo que facilitó la toma de decisiones en un contexto complejo como el que involucra la ubicación de una planta de tratamiento de agua.

El Método del Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) se aplicó al problema de decidir la localización de la planta de tratamiento de agua, considerando cuatro aspectos principales:

Aspecto social: Este aspecto aborda las implicaciones sociales de la ubicación de la planta de tratamiento de agua. Incluye dos subcriterios principales: el riesgo sanitario y las molestias a la población. El riesgo sanitario se refiere a la posible amenaza para la salud pública asociada con la ubicación de la planta, como la contaminación del agua potable o la liberación de sustancias tóxicas. Las molestias a la población pueden incluir ruidos, olores, tráfico de vehículos pesados, y otros factores que podrían afectar la calidad de vida de las personas que viven en las cercanías de la planta.

Aspecto ambiental: Este aspecto evalúa el impacto ambiental de la ubicación de la planta de tratamiento de agua. Incluye varios subcriterios, como el desmonte de terrenos para la construcción de la planta, la modificación del paisaje natural, la alteración de los suelos debido a la construcción y operación de la planta, y la modificación de la morfología del terreno, que puede afectar la hidrología local y la biodiversidad.

Dificultades técnicas: Este aspecto se refiere a los desafíos técnicos asociados con el tratamiento del agua y la disposición final de los lodos residuales generados por la planta. Incluye consideraciones sobre la infraestructura necesaria para el tratamiento del agua, la disponibilidad de recursos hídricos, la topografía del terreno y otros factores técnicos que pueden influir en la viabilidad de la ubicación de la planta.

Aspecto económico: Este aspecto evalúa los costos económicos asociados con la ubicación de la planta de tratamiento de agua. Incluye el costo de adquisición de terrenos, la construcción de la infraestructura necesaria, los costos operativos y de mantenimiento, así como cualquier impacto económico adicional, como la generación de empleo o la atracción de inversión en la zona.

Al considerar estos cuatro aspectos y sus respectivos subcriterios, el Método del Análisis Jerárquico proporciona un marco estructurado para evaluar y comparar las diferentes opciones de ubicación de la planta de tratamiento de agua, ayudando a identificar la mejor alternativa en función de múltiples criterios y consideraciones.

El estudio realizado por Estrada (2018) se enfocó en la identificación de predios adecuados para el desarrollo futuro de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en el Municipio de Rionegro, Antioquia. El contexto del municipio muestra un crecimiento urbano sin estrategias específicas de planificación para el desarrollo de infraestructuras futuras, lo que ha llevado a una insuficiencia en la cobertura de la red de acueducto y alcantarillado para satisfacer la demanda proyectada.

Para abordar esta problemática, el estudio comenzó con la identificación de los parámetros de diseño y localización de la infraestructura, mediante un análisis del estado actual de los equipamientos existentes y la proyección de la demanda futura que estos deben atender. Este paso inicial permitió establecer los criterios necesarios para la ubicación óptima de las plantas de tratamiento.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis multicriterio utilizando Sistemas de Información Georreferenciada (SIG), una herramienta que facilita la integración y análisis de datos espaciales. Este enfoque permitió considerar una variedad de factores relevantes para la localización de las plantas, como la disponibilidad de terrenos adecuados, la proximidad a fuentes de agua, la accesibilidad y la minimización de impactos ambientales.

El uso de SIG en la toma de decisiones facilitó la identificación de los predios más idóneos para albergar las plantas de tratamiento. Finalmente, se propuso una estrategia que involucra la adquisición y destinación de los lotes identificados exclusivamente para el desarrollo de los equipamientos, junto con un plan de implementación para llevar a cabo esta propuesta.

Los criterios de localización explicados por Estrada (2018) para equipamientos de agua potable y saneamiento básico incluyen los siguientes aspectos:

- **Usos del suelo:** Se deben considerar los usos del suelo especificados por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) para evaluar la idoneidad del lugar para el desarrollo de los equipamientos.

- Disponibilidad del terreno: Es importante evaluar la disponibilidad de terrenos adecuados para la construcción de los equipamientos, considerando factores como la estabilidad del terreno y la ausencia de riesgos que puedan afectar su funcionamiento.
- Zonas de conservación y protección natural y ambiental: Se debe garantizar que la ubicación de los equipamientos no afecte áreas protegidas o zonas de conservación natural, respetando el entorno ambiental.
- Requerimientos de diseño: Los requerimientos de diseño son los elementos necesarios para definir el tipo de infraestructura y el tamaño del equipamiento. Estos se basan en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), elaborado por el Ministerio de Vivienda. Se considera la estabilidad del terreno, la ausencia de interferencias con estructuras existentes o futuros usos del suelo, así como la cobertura de servicios necesarios para su funcionamiento y los accesos para los ingresos.
- Fuente de agua y sistema de incorporación: Se analiza la fuente de donde se tomará el agua para la planta de potabilización y dónde se incorporará el agua al sistema para las plantas de tratamiento de agua residual. Es importante asegurar la disponibilidad de agua de calidad y la eficiencia en el sistema de incorporación al proceso de tratamiento.

Zhou, Song, Li, Quin y Sun (2022) afirman que es crucial seleccionar ubicaciones adecuadas para las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) urbanas con el fin de controlar la contaminación del agua. Sin embargo, la mayoría de los enfoques actuales de selección de ubicación se limitan a considerar únicamente la densidad de población, la escala de la zona industrial y los aspectos geográficos, sin tener en cuenta la contaminación del agua ni los indicadores socio-culturales locales. Los autores proponen un sistema de indicadores novedoso basado en datos de teledetección (RS)/SIG para seleccionar ubicaciones razonables para las PTAR en Phnom Penh. El objetivo es evitar el deterioro del medio ambiente acuático y proteger la salud humana.

Según la información proporcionada por Zhou et al. (2022) , los principales factores tenidos en cuenta en la localización de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son los siguientes:

Factores: Se consideran aspectos legales, regulaciones y experiencias para determinar las zonas en las que está prohibida la construcción de PTAR. Estos factores incluyen la residencia, la socio-cultural, el transporte y los cuerpos de agua.

Factores de idoneidad: Se evalúan elementos como la pendiente del terreno, la hidrología, la ubicación aguas abajo de los ríos, la proximidad a carreteras y la dirección del viento. Estos factores determinan las ubicaciones adecuadas para la construcción de la PTAR, aprovechando el flujo natural de las aguas residuales y promoviendo la dispersión de gases nocivos.

Factores de demanda: Se analiza la demanda de PTAR en función de la densidad de población en las áreas residenciales, así como la demanda generada por las zonas industriales. Se considera la

escala de actividad industrial, que incluye categoría, cantidad, distribución, construcción y condiciones ambientales locales. La demanda de las zonas industriales se evalúa también con base a la proximidad, con una mayor demanda en áreas más cercanas.

Estos factores, que incluyen indicadores de exclusión, idoneidad y demanda, son considerados en la localización de una PTAR para garantizar que cumpla con los requisitos legales, se construya en ubicaciones adecuadas desde el punto de vista técnico y ambiental, y satisfaga la demanda de tratamiento de aguas residuales tanto de las áreas residenciales como de las zonas industriales.

1.2 Sistematización de resultados

En la tabla 2 se resumen los diferentes enfoques metodológicos y los factores clave considerados por diversos autores en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Los factores incluyen elementos legales, socio-culturales, topográficos, geológicos, de demanda, de accesibilidad y otros aspectos ambientales y sociales. Cada estudio utiliza métodos específicos, como indicadores de teledetección, modelos SIG, lógica difusa y modelos de decisión multicriterio, para abordar la complejidad de la toma de decisiones en la ubicación de PTAR.

Tabla 2. Enfoques metodológicos y factores clave considerados en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Título del Artículo	Autor(es)	Año	Criterios	Metodología o Enfoque
"A Location Selection Method for Wastewater Treatment Plants Integrating Dynamic Change of Water Ecosystem and Socio-Cultural Indicators: A Case Study of Phnom Penh"	Zhou, Song, Li, Quin, & Sun	2022	Factores de exclusión (legales, regulaciones, residencia, socio-cultural, transporte, cuerpos de agua), Factores de idoneidad (pendiente del terreno, hidrología, ubicación aguas abajo de los ríos, proximidad a carreteras, dirección del viento), Factores de demanda (densidad de población, demanda industrial)	Sistema de indicadores basado en datos de teledetección (RS)/SIG
"Location Optimization of Wastewater Treatment Plants Using GIS: A Case Study in Umm Durman/Karary"	Gorani & Ebraheem	2012	Zonas bajas, Evitar áreas propensas a inundaciones, Exclusión de zonas de vivienda y áreas militares, Área suficiente, Accesibilidad a carreteras principales	Modelo SIG basado en ARCGIS

Título del Artículo	Autor(es)	Año	Criterios	Metodología o Enfoque
"Site selection for wastewater treatment plant using integrated fuzzy logic and multicriteria decision model: A case study in Kahak district"	Shahnoradi & Asghar	2013	Suelo, Pendiente, Topografía, Geología, Uso del suelo, Viento, Distancia desde la ciudad principal, Agua subterránea, Agua superficial, Carreteras, Asentamientos	Enfoque integrado que combina la lógica difusa y un modelo de decisión multicriterio
"Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales"	Rodríguez, García, & Pardo	2015	Alejamiento de ecosistemas críticos y zonas de recreación, Seguridad ante amenazas naturales, Distancia adecuada de áreas pobladas, Dirección de los vientos, Descarga de efluentes tratados	Metodología integral que evalúa aspectos técnicos, económicos y ambientales
"Modelo para la evaluación de alternativas de localización de una PTAR para una ciudad en el Valle del Cauca Colombia"	Peña, Ordoñez, & Arana	2017	Diseño de la red actual y sus características, Aspectos legales y tarifas aplicadas	Modelo matemático formulado en GAMS
Localización de equipamientos en el municipio de Rionegro mediante un análisis de optimización basado en SIG	Estrada & Palacio	2018	- Usos del suelo - Disponibilidad del terreno - Zonas de conservación y protección natural y ambiental - Requerimientos de diseño - Fuente de agua y sistema de incorporación	- Identificación de parámetros de diseño y localización mediante análisis del estado actual y proyección de demanda futura - Análisis multicriterio con SIG para considerar factores como disponibilidad de terrenos, proximidad a fuentes de agua y minimización de impactos ambientales - Propuesta de estrategia para adquisición y destinación de lotes identificados exclusivamente para los equipamientos
Optimización multiobjetivo aplicada a la elección de la localización de la planta de tratamiento de agua en	Pilar, Ruberto, & Gómez	2017	- Aspecto social - Aspecto ambiental - Dificultades técnicas - Aspecto económico	- Desarrollo de un modelo de apoyo a la decisión basado en optimización multiobjetivo -

Título del Artículo	Autor(es)	Año	Criterios	Metodología o Enfoque
Misión Nueva Pompeya, Chaco				Incorporación de una variante de "relajamiento difuso" basada en lógica difusa para considerar aspectos cualitativos - Uso del Método del Análisis Jerárquico para evaluar aspectos sociales, ambientales, técnicos y económicos en la localización de la planta

Fuente: elaboración propia.

1.3 Conclusiones del capítulo

La sistematización de los estudios sobre la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) revela un conjunto de factores críticos recurrentes y enfoques metodológicos diversos que han sido empleados para abordar esta compleja problemática. A continuación, se resumen las principales conclusiones derivadas de la revisión de la literatura:

Relevancia de los factores legales y ambientales

Los aspectos legales y las regulaciones ambientales emergen como factores predominantes en la selección de ubicaciones para las PTAR. La mayoría de los estudios revisados subraya la necesidad de cumplir con normativas locales y nacionales que regulan el impacto ambiental, lo cual incluye la prevención de riesgos naturales como inundaciones y la protección de ecosistemas críticos. Estos factores legales no solo son determinantes en la viabilidad de la localización, sino que también aseguran la sostenibilidad del proyecto en el tiempo.

- **Condiciones topográficas, geológicas y climáticas**

Las características del suelo, la topografía y la geología del terreno son criterios esenciales considerados por los investigadores. Estas variables influyen directamente en la construcción y operación de las PTAR, afectando tanto los costos iniciales como el rendimiento a largo plazo. Adicionalmente, la dirección de los vientos y la disposición de los efluentes tratados son aspectos climáticos que se consideran para minimizar los impactos negativos en las áreas circundantes.

- **Proximidad y accesibilidad**

La accesibilidad a carreteras principales y la proximidad a zonas urbanas o industriales son factores recurrentes en los estudios. Estos criterios aseguran la eficiencia en el transporte de aguas residuales hacia la planta y facilitan el acceso para el mantenimiento y la operación continua. Al mismo tiempo, se busca minimizar la proximidad a áreas pobladas para reducir riesgos a la salud pública.

- **Diversidad metodológica**

La variedad de enfoques metodológicos utilizados, que incluyen modelos SIG, lógica difusa y análisis multicriterio, refleja la complejidad de la toma de decisiones en la localización de PTAR. Cada uno de estos métodos ofrece diferentes ventajas según el contexto y las particularidades del lugar de estudio, permitiendo una evaluación integral de los factores técnicos, sociales, ambientales y económicos.

- **Factores recurrentes**

A lo largo de los estudios revisados, los factores más comunes que se deben considerar en el modelamiento para la localización de PTAR son:

- Cumplimiento de normativas legales y ambientales.
- Prevención de riesgos naturales y seguridad del sitio.
- Evaluación de la topografía y geología del terreno.
- Aseguramiento de la accesibilidad y la proximidad adecuada.
- Consideración de factores climáticos y disposición de efluentes.

2. Análisis de las alternativas viables de localización de una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio objeto de estudio

El Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) de La Unión, Valle del Cauca, establece directrices claras para la localización y distribución espacial de las actividades urbanas y rurales, enmarcadas en el modelo de ocupación del territorio. Este modelo busca optimizar la relación entre las áreas urbanas y rurales, consolidando el casco urbano central y distribuyendo las actividades agrícolas y forestales en las zonas circundantes, mientras se protege el suelo agrícola de alto valor productivo (Concejo Municipal, 2000).

En cuanto a la infraestructura de servicios públicos, el PBOT señala que las infraestructuras esenciales, como el abastecimiento de agua y energía, se concentran en las unidades de Piedemonte y Valle Aluvial. Para la disposición de aguas residuales, se ha implementado un sistema basado en colectores paralelos a las quebradas locales, que transportan las aguas hacia un punto de tratamiento ubicado en las lagunas de oxidación. Estas lagunas, fundamentales en el tratamiento biológico de las aguas residuales, aseguran el cumplimiento de las normativas ambientales establecidas en el Decreto 1594 de 1984.

Adicionalmente, el PBOT subraya la necesidad de ajustar el sistema de disposición de aguas residuales a las directrices del futuro Plan de Manejo para la Gestión de los Residuos Municipales, con el objetivo de mejorar la sostenibilidad y protección de los recursos hídricos.

Finalmente, el diagnóstico del Plan de Desarrollo 2020-2023 revela que el municipio cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales para el área urbana equipada con lagunas anaerobias

y facultativas, además de dos sistemas adicionales en centros poblados que requieren intervención debido a su funcionamiento deficiente. Estas infraestructuras reflejan un esfuerzo continuo por mejorar la gestión de aguas residuales en el municipio, asegurando la conformidad con los estándares de salud pública y medioambientales.

En la figura 1 se presenta la localización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en los centros poblados de Quebrada grande y San Luis, los cuales se construyeron con la finalidad de recibir las aguas residuales de la población local.

Figura 1. Localización de alternativas para la planta de tratamiento de aguas residuales. La Unión.



Fuente: Google Maps

Sin embargo, estos sistemas necesitan ser recuperados para asegurar su funcionamiento eficiente. Se proponen varias acciones para abordar esta situación:

Elaboración e implementación de Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV): Este proceso se regula según la Resolución 1433 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, o la normativa vigente. La implementación de PSMV contribuirá a la gestión adecuada de los vertimientos de aguas residuales.

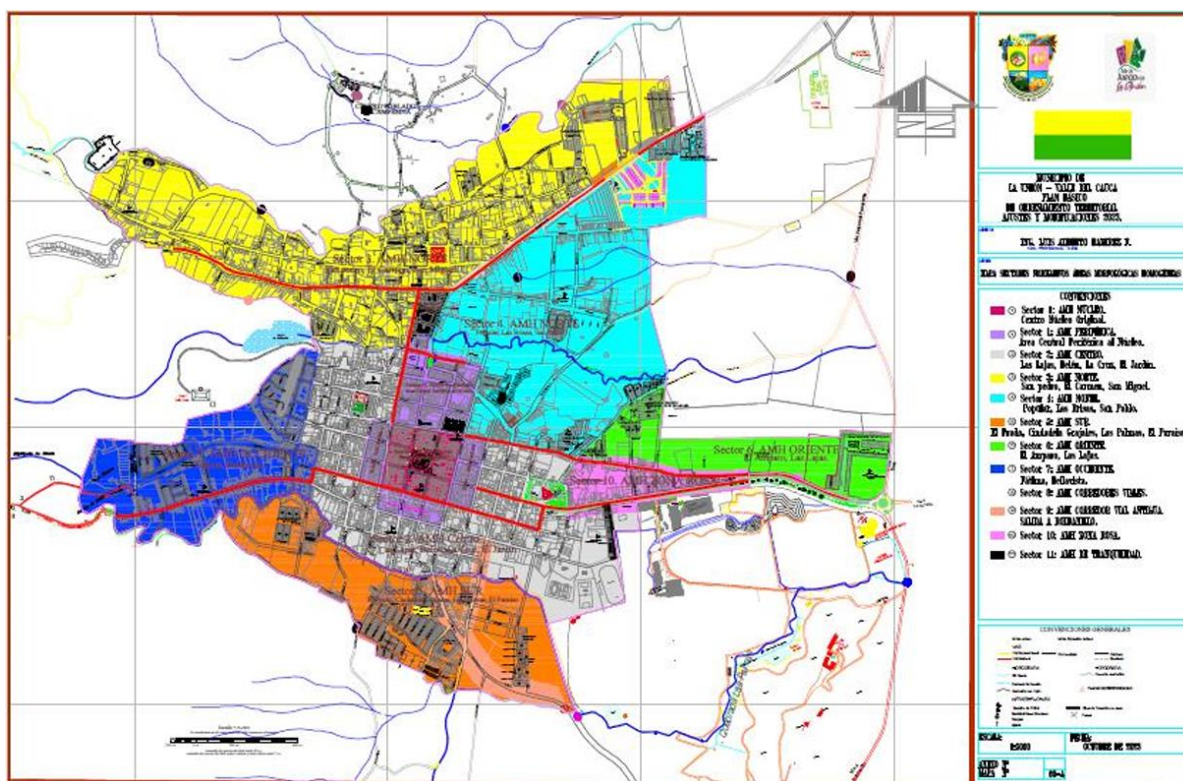
Optimización de sistemas de tratamiento: Se busca mejorar la eficiencia de los sistemas de tratamiento existentes, incluyendo la recuperación de los sistemas en Quebrada grande y San Luis para garantizar su funcionamiento adecuado.

Estudio de capacidad de asimilación del canal interceptor del distrito de riego RUT: Se propone realizar un estudio para determinar la capacidad del canal interceptor del distrito de riego RUT para recibir las aguas residuales municipales y mantener una calidad aceptable para el riego de frutas y hortalizas.

Cumplimiento de normas de calidad del agua: Se establece la necesidad de que las aguas servidas de las áreas urbanas y centros poblados que utilizan los canales de riego y drenaje del distrito de riego RUT cumplan con las normas de preservación de la calidad del agua para uso agrícola y pecuario. (Municipio de La Unión, 2020)

Por su parte, para el análisis de las alternativas viables de localización de una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio objeto de estudio, es necesario considerar la “Modificación excepcional de normas urbanísticas del Plan de Básico de Ordenamiento Territorial PBOT – de segunda generación, del Municipio de La Unión Valle del Cauca, adoptado mediante acuerdo municipal 013 de 2015” (Municipio de La Unión, 2023), lo cual conduce a considera los sectores normativos que se presentan en la figura 2, con relación al sistema de saneamiento, de aguas residuales el PBOT lo define en el Artículo 29. Sistema de Tratamiento de Agua para Consumo Humano y Artículo 30. Sistema de Manejo de Aguas Residuales, y establece en este mismo.

Figura 2. Sectores normativos PBOT La Unión.



Fuente: Alcaldía Municipal de La Unión (2023)

Sectores normativos y usos del suelo

El Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) de La Unión, Valle del Cauca, establece sectores normativos que permiten zonificar y regular el uso del suelo, asegurando un desarrollo urbano equilibrado. Dentro de este marco, es crucial identificar las áreas más adecuadas para la localización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), basándose en los usos del suelo establecidos y las tipologías específicas contempladas en el PBOT.

Sectores potencialmente adecuados para la PTAR

- Sectores industriales y corredores viales (Sectores 8 y 9):

Estos sectores están destinados a actividades de infraestructura y pueden ofrecer las condiciones necesarias para la localización de la PTAR, debido a su proximidad a las vías principales que facilitan el acceso a servicios públicos y transporte. Además, la clasificación bajo la CIU en la Sección E, Divisiones 36 y 37, respalda la adecuación de estas áreas para actividades de captación, tratamiento y distribución de agua, así como para la evacuación y tratamiento de aguas residuales.

- Sector institucional y equipamiento (Sector 2):

Este sector, que incluye equipamientos deportivos y áreas públicas, puede ser considerado si se asegura que la PTAR no afecta negativamente a las áreas circundantes, debido a su papel en el servicio público y en la infraestructura comunitaria.

- Evaluación Micro-localización y Modelamiento Matemático

Para la determinación más precisa de la ubicación de la PTAR dentro de los sectores identificados, se sugiere implementar un modelamiento matemático que considere factores como:

Capacidad de carga ambiental: Evaluar la capacidad del entorno para soportar la instalación y operación de la PTAR sin comprometer los recursos naturales y la salud pública.

Proximidad a fuentes de agua y áreas residenciales: La PTAR debe estar suficientemente alejada de áreas residenciales para minimizar el impacto en la calidad de vida de los habitantes, pero lo suficientemente cercana a las fuentes de agua para optimizar los costos de transporte y tratamiento.

Infraestructura existente: Aprovechar la infraestructura ya presente en los sectores 8 y 9, como las redes de alcantarillado y suministro de agua, para reducir costos de construcción y operación.

Según lo anterior, para la localización de la PTAR en La Unión, se deben considerar principalmente los sectores normativos que permiten actividades industriales y de infraestructura (sectores 8, 9 y 2), complementados con un análisis más detallado que integre modelamiento matemático para la toma de decisiones. Este enfoque garantizará una decisión eficiente y sostenible en la localización de la PTAR dentro del municipio.

2.1 Selección de alternativas de localización

2.1.1 Zonificación y criterios de localización

Con base al Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) de La Unión y a los criterios de accesibilidad, riesgos naturales, idoneidad del sitio, y aspectos socio-culturales y ambientales, se han identificado las siguientes áreas potenciales para la localización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR):

- Sector 8: Corredores Viales Urbanos

Esta área se caracteriza por su conectividad con las principales vías de transporte, facilitando el acceso para la construcción y el mantenimiento de la PTAR. Además, al encontrarse fuera de las áreas residenciales densamente pobladas, se minimizan los impactos sociales negativos.

- Sector 9: Corredor Vial Antigua Salida a Roldanillo

Este sector ofrece una combinación de accesibilidad y distancia suficiente de las zonas residenciales, lo que lo convierte en una opción viable para la localización de la PTAR. La topografía y la calidad del suelo en esta área deben ser evaluadas para garantizar la idoneidad técnica del sitio.

- Sector 2: Equipamientos Deportivos y Áreas Públicas

Aunque es menos convencional, este sector puede ser considerado si se garantiza que la PTAR no interfiere con las funciones recreativas y deportivas. Su proximidad a las vías principales y la posibilidad de integración con otras infraestructuras públicas son aspectos favorables.

- Sector 7: Bellavista y Fátima

Esta zona residencial de baja densidad podría ser considerada si se asegura una distancia adecuada de las viviendas para evitar impactos sociales negativos. La evaluación del suelo y la topografía es esencial para determinar su idoneidad.

2.1.2 Micro-localización

Una vez determinada la mejor zona mediante el modelo de programación lineal, se puede proceder a la micro-localización dentro del sector seleccionado. El enfoque basado en programación lineal asegura una selección racional y óptima de la localización para la PTAR en La Unión, alineada con criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales. Esto no solo garantiza un uso eficiente de los recursos, sino también una planificación sostenible que beneficia a la comunidad y respeta las normativas vigentes.

3. Propuesta de localización de la planta de tratamiento de aguas para La Unión

3.1 Revisión de la literatura

Peña, Ordoñez y Arana (2017) investigan la problemática de la localización óptima de una planta de tratamiento de aguas residuales en un municipio del Valle del Cauca, Colombia. Su estudio se enfoca en evaluar tres posibles ubicaciones para la planta, con el objetivo de identificar cuál de ellas ofrece un menor costo de transporte de las aguas residuales desde su punto de origen hasta las ubicaciones propuestas. La finalidad es optimizar la ubicación de la planta considerando específicamente los costos asociados al transporte de las aguas residuales.

La metodología empleada por los autores incluye una evaluación detallada de las tres alternativas de localización, teniendo en cuenta el diseño actual de la red de alcantarillado y sus características,

además de los marcos legales que regulan las tarifas de los servicios de acueducto y alcantarillado. Para esto, utilizaron un modelo que estima los costos de transporte del flujo de aguas residuales hacia cada una de las ubicaciones propuestas. También se toma en consideración el crecimiento poblacional y su impacto en la generación de residuos sólidos, utilizando datos históricos. El modelo incorpora además el esquema tarifario vigente, que considera aspectos como el tipo de cobro, la aplicación de subsidios y otros factores relevantes.

Los resultados del estudio revelan un incremento continuo en la producción de aguas residuales a lo largo del tiempo, principalmente asociado al crecimiento poblacional. El modelo desarrollado por los autores permite calcular los costos de transporte para cada alternativa de ubicación, identificando cuál de ellas resulta más económica. Esto facilita la selección de la opción más viable para la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio analizado. Además, se resalta la importancia de prever la capacidad futura de la planta, en función del crecimiento poblacional proyectado, para garantizar su eficacia a largo plazo. Los autores concluyen que la decisión sobre la ubicación de la planta no debe posponerse, dado el preocupante aumento en los índices de contaminación de los cuerpos de agua, lo cual está causando daños irreversibles al recurso hídrico.

En su artículo, Ruberto, Pilar y Gómez (2015) se propusieron identificar la ubicación óptima para una planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya, ubicada en el Impenetrable Chaqueño, con el objetivo de reducir al mínimo los impactos negativos derivados de su construcción y operación. Para alcanzar este objetivo, los autores desarrollaron un modelo de apoyo a la decisión basado en una técnica de optimización multiobjetivo que incorpora una variante de "relajamiento difuso". Este enfoque abarca aspectos fundamentales como el riesgo sanitario, las molestias a la población, los costos y otros factores técnicos, con la intención de mitigar las evaluaciones subjetivas que suelen influir en la selección de alternativas.

La metodología empleada por los autores se centra en la creación de un modelo de apoyo a la decisión utilizando una técnica de optimización multiobjetivo y multicriterio. Esta técnica integra múltiples objetivos, incluyendo el riesgo sanitario, las molestias a la población, los costos y factores técnicos, para ofrecer una evaluación objetiva de tres posibles ubicaciones para la planta de tratamiento de agua. En este proceso, se aplicó el "Método del Análisis Jerárquico" junto con una variante de "relajamiento difuso" en las puntuaciones, lo que permitió realizar ponderaciones y evaluar las alternativas de manera matemática y lógica.

La implementación de la técnica de optimización multiobjetivo y multicriterio permitió introducir un grado significativo de objetividad en el proceso de toma de decisiones para seleccionar la ubicación más adecuada para la planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya. Aunque al inicio ninguna de las alternativas se destacaba claramente como superior o inferior, a través de las ponderaciones y la consideración de los criterios establecidos, se concluyó que la ubicación más cercana a la Ruta Provincial N° 9 sería la más adecuada para minimizar los impactos negativos asociados a la construcción y operación de la planta. Los autores resaltan la eficacia del "Método del Análisis Jerárquico" con la variante de "relajamiento difuso" en la toma de decisiones y recomiendan la aplicación de técnicas similares en otros contextos conflictivos para aumentar la objetividad al abordar temas de interés público.

Para la escogencia de la ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en La Unión, pueden utilizarse varios modelos de localización, cada uno con sus propias características y enfoques. A continuación, se explican los modelos de localización más relevantes que podrían aplicarse:

Modelo de flujo máximo:

Este modelo se centra en conectar un nodo fuente con un nodo destino a través de una red de arcos dirigidos, donde cada arco tiene una capacidad máxima de flujo permitida. (“Modelo de flujo máximo | Apuntes de Macroeconomía | Docsity”) El objetivo principal es minimizar el costo. En el contexto de la ubicación de la PTAR, este modelo podría aplicarse para optimizar el flujo de aguas residuales desde los puntos de recolección hasta la planta de tratamiento, buscando minimizar los costos de localización.

Modelo de la ruta más corta:

En este modelo, se busca establecer una red conexa y no dirigida con nodos de origen y destino, asociando a cada arco una distancia no negativa. El objetivo es encontrar la ruta más corta (es decir, la trayectoria con la mínima distancia total) desde el origen hasta el destino. (“método de redes | Flashcards - GoConqr”) En el caso de la ubicación de la PTAR, este modelo podría utilizarse para determinar la ubicación óptima de la planta con respecto a los puntos de recolección de aguas residuales, minimizando las distancias de transporte y reduciendo los costos asociados.

Problema del flujo de costo mínimo:

Este problema es central en la optimización de redes y abarca una amplia gama de aplicaciones. Considera un flujo en una red con capacidades limitadas en sus arcos, teniendo en cuenta el costo (o distancia) para el flujo a través de cada arco. Además, puede manejar varios orígenes y destinos para el flujo, con costos asociados. En el contexto de la ubicación de la PTAR, este modelo podría utilizarse para minimizar los costos totales asociados con el transporte de aguas residuales desde los puntos de recolección hasta la planta de tratamiento, teniendo en cuenta las capacidades de los conductos y las distancias involucradas.

Estos modelos de localización pueden ser mejorados si se integran en un escenario dinámico, lo cual se puede lograr mediante la proyección de densidad. Esto permite evaluar el modelo en un entorno más realista y ser más preciso al momento de plantear la solución. En resumen, la elección del modelo de localización adecuado para la PTAR de La Unión dependerá de las características específicas del entorno, las necesidades de la comunidad y los objetivos de optimización establecidos.

Para complementar lo anterior, se debe tener en cuenta la proyección poblacional como un factor crucial en la planificación y ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en La Unión. Las proyecciones de población son esenciales para anticipar las necesidades futuras de servicios básicos, como el suministro de agua y el tratamiento de aguas residuales, y para establecer estrategias efectivas de planificación urbana y gestión de recursos.

Las proyecciones de población pueden realizarse utilizando diversos métodos, como métodos matemáticos, demográficos y económicos. Los métodos matemáticos implican aplicar modelos relacionales de cambio poblacional, como funciones lineales, geométricas o exponenciales, mientras que los métodos demográficos analizan los componentes del cambio demográfico, como la fecundidad, mortalidad y migraciones. Los métodos económicos se basan en las interrelaciones entre aspectos socioeconómicos y variables demográficas, y son menos utilizados debido a la necesidad de datos socio-demográficos disponibles.

La proyección poblacional es crucial para determinar la capacidad de producción y las necesidades básicas de una población en el futuro, lo que incluye la demanda de servicios públicos como el suministro de agua potable y el tratamiento de aguas residuales. En el caso de la ubicación de la PTAR, la proyección poblacional puede ayudar a identificar áreas con mayor densidad de población y, por lo tanto, una mayor generación de aguas residuales, lo que influye en la selección del sitio óptimo para la planta.

Además, en el contexto de la prestación de servicios públicos como el suministro de agua y el tratamiento de aguas residuales, en Colombia se aplica el modelo establecido por la Ley 142 de 1994, regulada por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) a través del Ministerio de Medio Ambiente. Esta ley establece los costos de administración, operación, inversión y tasas ambientales asociadas con la prestación de servicios de agua y saneamiento. También contempla la aplicación de subsidios para los estratos socioeconómicos más bajos, lo que debe ser considerado en la planificación y gestión de recursos para la PTAR.

Por lo tanto, la proyección poblacional y el modelo de prestación de servicios públicos son aspectos clave a tener en cuenta en la ubicación y planificación de la PTAR en La Unión, ya que proporcionan información crucial sobre la demanda futura de servicios y los costos asociados con su prestación.

3.2 Definición del modelo

Para definir un modelo que determine la localización óptima de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) e integre los factores clave considerados, se puede utilizar un enfoque que combine aspectos demográficos, geográficos, ambientales y económicos. A continuación, se presenta la descripción de este modelo:

Factores Demográficos:

Proyección Poblacional: Utilizar proyecciones de población a corto, mediano y largo plazo para estimar la demanda futura de servicios de saneamiento, incluyendo el tratamiento de aguas residuales.

Distribución de la Población: Analizar la distribución espacial de la población para identificar áreas con alta densidad poblacional y, por ende, mayor generación de aguas residuales.

Factores Geográficos:

Acceso y Conectividad: Evaluar la accesibilidad a través de la red vial y la proximidad a los puntos de recolección de aguas residuales para minimizar los costos de transporte.

Topografía y Geología: Considerar la topografía del terreno y la geología para seleccionar áreas que minimicen los riesgos de inundaciones, deslizamientos de tierra y contaminación del suelo.

Factores Ambientales:

Protección de Cuerpos de Agua: Evitar la ubicación de la PTAR en áreas cercanas a cuerpos de agua superficiales para prevenir la contaminación.

Preservación de Ecosistemas: Buscar sitios que minimicen el impacto ambiental en áreas protegidas o ecosistemas frágiles.

Factores Económicos:

Costos de Implementación: Evaluar los costos asociados con la adquisición de terrenos, construcción de infraestructuras y operación de la PTAR.

Costos de Mantenimiento: Considerar los costos de mantenimiento y operación a largo plazo, así como los costos energéticos asociados con el funcionamiento de la planta.

Evaluación de Alternativas:

Generación de Escenarios: Evaluar múltiples escenarios de ubicación de la PTAR en base a la combinación de factores demográficos, geográficos, ambientales y económicos.

Análisis de Sensibilidad: Realizar análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de cambios en los diferentes factores sobre la selección final del sitio de la PTAR.

Por lo tanto, el modelo de localización de la PTAR integraría estos factores clave para determinar la ubicación óptima que minimice los costos.

3.3 Aplicación del modelo de programación lineal para la localización óptima de la PTAR

3.3.1 Zonificación y criterios de localización

Basado en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) de La Unión y los factores relevantes identificados en la literatura sobre la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales, se han identificado las siguientes zonas potenciales para la localización de la PTAR:

- **Sector 8: Corredores Viales Urbanos**
- **Sector 9: Corredor Vial Antigua Salida a Roldanillo**
- **Sector 2: Equipamientos Deportivos y Áreas Públicas**
- **Sector 7: Bellavista y Fátima**

3.3.2 Modelo de programación lineal para la localización de la PTAR

El modelo de programación lineal se diseña para incorporar los factores críticos que influyen en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales, tal como se identificaron en la revisión de la literatura. A continuación, se describe cómo se aplica este modelo, teniendo en cuenta los factores relevantes:

- **Factores relevantes identificados en la literatura**

1. **Proximidad a la fuente de aguas residuales:** Ubicación cercana a las fuentes de aguas residuales para minimizar costos de transporte y asegurar eficiencia en el tratamiento.
2. **Accesibilidad y conectividad:** Facilidad de acceso para la construcción, operación y mantenimiento, y conexión con redes de infraestructura.
3. **Riesgos ambientales y geológicos:** Evitar zonas propensas a inundaciones, deslizamientos u otros desastres naturales.
4. **Impacto en la comunidad:** Minimización del impacto negativo en la calidad de vida de la población local, incluyendo aspectos como olores, ruido y proximidad a áreas residenciales.
5. **Sostenibilidad y regulación ambiental:** Cumplimiento de normativas ambientales y consideración de la capacidad de carga del ecosistema local.
6. **Costo de implementación y operación:** Minimización de los costos asociados tanto a la construcción como a la operación continua de la planta.
7. **Disponibilidad de espacio y condiciones topográficas:** Evaluación de la idoneidad del terreno en términos de tamaño y características físicas.

3.3.3 Formulación del modelo

Función Objetivo: Minimizar el costo total que incluye costos de construcción, operación, mantenimiento, transporte de aguas residuales, y mitigación de impactos sociales y ambientales.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot x_i) + \sum_{j=1}^m (O_j \cdot y_j) + \sum_{k=1}^l (T_k \cdot z_k) + \sum_{p=1}^q (M_p \cdot w_p)$$

Donde:

- C_i : Costo de construcción y adecuación en el sitio i .
- O_j : Costo de operación y mantenimiento en el sitio j .
- T_k : Costo de transporte de aguas residuales desde las fuentes hasta el sitio k .
- M_p : Costo de mitigación de impactos sociales y ambientales en el sitio p .
- x_i, y_j, z_k, w_p : Variables binarias (1 si se selecciona el sitio, 0 en caso contrario).

Restricciones:

1. **Proximidad a la fuente de aguas residuales:**

$$\sum_{i=1}^n (D_i \cdot x_i) \leq D_{\text{máx}}$$

Donde D_i es la distancia entre la fuente de aguas residuales y el sitio i , y $D_{\text{máx}}$ es la distancia máxima permitida.

2. Accesibilidad y conectividad:

$$\sum_{j=1}^m (A_j \cdot y_j) \geq A_{\min}$$

Donde A_j es la medida de accesibilidad del sitio j , y $A_{\min}$ es el umbral mínimo de accesibilidad.

3. Riesgos ambientales y geológicos:

$$\sum_{k=1}^l (R_k \cdot z_k) \leq R_{\max}$$

Donde R_k es el nivel de riesgo asociado al sitio k , y $R_{\max}$ es el nivel máximo de riesgo aceptable.

4. Impacto en la comunidad:

$$\sum_{p=1}^q (I_p \cdot w_p) \leq I_{\max}$$

Donde I_p es el impacto en la comunidad asociado al sitio p , e $I_{\max}$ es el nivel máximo de impacto aceptable.

5. Cumplimiento de normativas ambientales:

$$E_i \cdot x_i \geq E_{\min}$$

Donde E_i representa el cumplimiento de normativas en el sitio i , y $E_{\min}$ es el umbral mínimo requerido.

6. Disponibilidad de espacio y condiciones topográficas:

$$S_j \cdot y_j \geq S_{\min}$$

Donde S_j es la disponibilidad de espacio y condiciones topográficas en el sitio j , y $S_{\min}$ es el tamaño mínimo requerido.

7. Selección de un Único Sitio:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

Solo se seleccionará un sitio para la construcción de la PTAR.

3.3.4 *Data requerida para aplicar el modelo*

Para aplicar el modelo de programación lineal en la selección de la localización de la PTAR en La Unión, Valle del Cauca, se reconocen las limitaciones en la disponibilidad de datos específicos. Aun así, con base en criterios técnicos y aproximaciones metodológicas, es posible generar datos estimados que representen razonablemente las condiciones reales del municipio. La metodología utilizada prioriza la consistencia técnica, con el respaldo de estudios previos y fuentes confiables como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para cartografía y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) para normativas ambientales. Asimismo, se hace uso de experiencias de plantas de tratamiento similares en otras localidades con condiciones comparables para derivar costos y riesgos, ajustando estos valores a las características locales de La Unión.

Los datos necesarios se agruparon en categorías clave, como costos de construcción, operación y transporte, distancias, riesgos geológicos y ambientales, impacto comunitario y normativas. Al no disponer de datos exactos, las estimaciones se realizaron basándose en estudios de factibilidad disponibles, herramientas SIG para el análisis espacial y referencias de proyectos similares. Estos procedimientos ofrecen una aproximación que, aunque no refleja exactamente la realidad, permite aplicar el modelo de manera rigurosa, apoyándose en criterios técnicos sólidos que mejoran la validez y la aplicabilidad del estudio, posibilitando la simulación del modelo de programación lineal en la selección óptima del sitio para la PTAR.

Para realizar una aproximación razonada de los datos requeridos para aplicar el modelo de programación lineal en la selección de la ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en La Unión, Valle del Cauca, se tomaron en cuenta diversos criterios técnicos. Las cifras se derivan de una combinación de experiencias previas de proyectos similares, estudios de costos de construcción y operación, así como herramientas de análisis espacial como los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo es proporcionar estimaciones que, aunque no exactas, resulten plausibles y permitan una aplicación metodológicamente válida del modelo.

Criterios para la aproximación:

Costos de construcción (Ci): Los valores estimados para la construcción varían según el nivel de intervención requerido en cada sector. Los terrenos de los sectores 2 y 8 tienen una menor complejidad topográfica, lo que reduce costos de infraestructura, mientras que el Sector 7, más alejado y en áreas residenciales, requiere mayores adecuaciones, aumentando el costo.

Costos de operación (Oj): Los costos de operación se basan en la proximidad a servicios básicos como energía y agua potable, y la conectividad del sector con vías principales. Sectores mejor conectados como el 8 y el 2 presentan costos de operación ligeramente más altos debido a la capacidad para operar en zonas con mayor demanda de servicios.

Costos de transporte (Tk): La distancia desde las fuentes de aguas residuales a los sectores propuestos fue calculada mediante el uso de herramientas SIG y análisis del PBOT. Las zonas más cercanas a las fuentes urbanas (Sector 8 y Sector 2) presentan menores costos de transporte, mientras que los sectores más alejados (Sector 7) aumentan dichos costos por el incremento en la distancia.

Costos de mitigación (Mp): Las estimaciones de mitigación de impacto ambiental y social se basan en la cercanía a zonas residenciales. Sectores como el 8, más urbanos, requieren mayores esfuerzos en control de emisiones y paisajismo, mientras que sectores más periféricos como el 7 demandan menos intervención.

Distancia (Di): La distancia se mide en relación con las principales fuentes de aguas residuales (áreas urbanas e industriales), lo que implica que los sectores más cercanos (como el 8 y 2) tienen menores distancias, y por lo tanto, menores costos de transporte y operación.

Accesibilidad (Aj): La accesibilidad fue determinada por la conectividad vial y la proximidad a infraestructura crítica. Sectores como el 8, en corredores viales urbanos, son más accesibles, lo que reduce costos logísticos y mejora la conectividad operativa.

Riesgos ambientales y geológicos (Rk): Se basaron en mapas de riesgo de la región suministrados por la CVC. Zonas como el Sector 8 presentan un mayor riesgo debido a la proximidad a áreas inundables, mientras que el Sector 7 se beneficia de estar en zonas con bajo riesgo geológico.

Impacto social (Ip): Este criterio refleja la evaluación de impacto sobre la comunidad local. Sectores más urbanos (Sector 8) tendrán mayor impacto negativo en la calidad de vida, mientras que zonas más alejadas (Sector 7) generarán menos molestias.

Normativas ambientales (Ei): El cumplimiento con normativas ambientales se estimó con base en la zonificación de protección ambiental del PBOT. Sectores más centrales (Sector 2) ofrecen mayor flexibilidad normativa debido a que se encuentran en áreas urbanas destinadas a infraestructura pública.

Espacio disponible (Sj): Se utilizó la cartografía del IGAC para determinar las áreas disponibles en cada sector, ajustando la superficie en función de las restricciones de uso del suelo y las necesidades mínimas para construir una PTAR eficiente.

En la tabla 3 se presenta una aproximación que integra tanto criterios técnicos como estudios previos para poder alimentar el modelo de programación lineal, permitiendo una evaluación más precisa de la localización óptima para la PTAR en La Unión.

Tabla 3. Data requerida para el modelo

Sitio	Costo Construcción (Ci) \$	Costo Operación (Oj) \$	Costo Transporte (Tk) \$	Costo Mitigación (Mp) \$	Distancia (Di) en km	Accesibilidad (Aj)	Riesgo (Rk)	Impacto (Ip)	Normativas (Ei)	Espacio (Sj) en m2
Sector 2	2.100.000.000	400.000.000	120.000.000	40.000.000	5	8	2	3	9	15.000
Sector 7	2.600.000.000	360.000.000	100.000.000	32.000.000	8	7	1	2	8	12.000
Sector 8	2.350.000.000	400.000.000	128.000.000	48.000.000	4	9	3	4	7	14.000
Sector 9	2.250.000.000	380.000.000	104.000.000	42.000.000	7	8	2	3	7	13.000

3.4 Aplicación del modelo

A continuación se detalla el paso a paso sobre cómo se llevó a cabo la simulación y la aplicación del modelo de programación lineal en un entorno práctico, destacando la necesidad de realizar estimaciones y suposiciones debido a la falta de datos específicos.

1. Definición del problema y objetivos

Se estableció como objetivo principal la localización óptima de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el municipio de La Unión, Valle del Cauca. El objetivo era minimizar los costos totales relacionados con la construcción, operación, transporte de aguas residuales, y la mitigación de impactos sociales y ambientales.

2. Identificación de zonas potenciales

Se seleccionaron cuatro sectores específicos dentro del municipio como posibles ubicaciones para la PTAR, basados en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) y en una revisión de la literatura sobre localización de plantas de tratamiento de aguas residuales. Los sectores fueron:

- Sector 2: Equipamientos Deportivos y Áreas Públicas.
- Sector 7: Bellavista y Fátima.
- Sector 8: Corredores Viales Urbanos.
- Sector 9: Corredor Vial Antigua Salida a Roldanillo.

3. Formulación del modelo de programación lineal

Se desarrolló un modelo de programación lineal con el objetivo de minimizar el costo total asociado con la localización de la PTAR. La función objetivo se definió como la suma de los costos de construcción, operación, transporte y mitigación de impactos.

- **Variables de decisión:**

- Variables binarias que indicaban si se seleccionaba o no un sector específico para la localización de la planta.

- **Restricciones**

- **Proximidad a la fuente:** La ubicación debía estar lo suficientemente cerca de las fuentes de aguas residuales para minimizar los costos de transporte.
- **Accesibilidad y conectividad:** El sitio seleccionado debía ser accesible para facilitar la construcción, operación y mantenimiento.
- **Riesgos ambientales y geológicos:** Se evitó seleccionar zonas propensas a desastres naturales.
- **Impacto en la comunidad:** Se buscó minimizar el impacto negativo en la calidad de vida de la población local.
- **Cumplimiento de normativas ambientales:** El sitio debía cumplir con todas las normativas legales y ambientales vigentes.

- **Disponibilidad de espacio:** El sitio seleccionado debía contar con el espacio suficiente para la construcción y operación de la planta.
- **Selección de un único sitio:** Solo se debía seleccionar un sitio entre las opciones disponibles.

4. Recopilación y preparación de datos

- **Dificultades para la obtención de datos precisos:** Debido a la falta de información detallada y la dificultad para acceder a datos específicos de cada sector, se decidió realizar una simulación. Esta simulación tenía como propósito mostrar las características y la funcionalidad del modelo sin depender de datos reales exactos.
- **Suposiciones y estimaciones:** Se realizaron suposiciones razonables y estimaciones para asignar valores a las variables del modelo, tales como costos, distancias, niveles de riesgo, impactos en la comunidad, y disponibilidad de espacio.

Tabla 4. Variables y unidades

Variable	Unidades	Descripción
Costo Construcción (Ci)	Moneda local (pesos colombianos)	Expresado en unidades monetarias, representa el costo total de la construcción de la planta en un sitio específico.
Costo Operación (Oj)	Moneda local (pesos colombianos)	Expresado en unidades monetarias por año o por mes, representa los costos asociados con la operación y mantenimiento de la planta.
Costo Transporte (Tk)	Moneda local (pesos colombianos)	Expresado en unidades monetarias por kilómetro o por tonelada-kilómetro, representa el costo de transporte de aguas residuales.
Costo Mitigación (Mp)	Moneda local (pesos colombianos)	Expresado en unidades monetarias, representa los costos asociados con la mitigación de impactos sociales y ambientales.
Distancia (Di)	Kilómetros (km)	Medida en kilómetros, representa la distancia entre la fuente de aguas residuales y el sitio propuesto para la planta.
Accesibilidad (Aj)	Índice o puntuación (0-10)	Expresado como un índice o puntuación, evalúa la facilidad de acceso al sitio propuesto, incluyendo infraestructura y conectividad.
Riesgo (Rk)	Índice o puntuación (0-10)	Expresado como un índice de riesgo, donde se evalúan las amenazas ambientales y geológicas en el sitio.
Impacto (Ip)	Índice o puntuación (0-10)	Expresado como una puntuación, mide el impacto negativo en la comunidad, incluyendo factores como ruido, olores y proximidad.
Normativas (Ei)	Índice o puntuación (0-10)	Expresado como un índice, representa el grado de cumplimiento con las normativas ambientales y legales.

Variable	Unidades	Descripción
Espacio (Sj)	Metros cuadrados (m ²)	Medida en metros cuadrados, representa la disponibilidad de espacio en el sitio para la construcción de la planta.

Fuente: elaboración propia.

5. Implementación del modelo en Microsoft Excel

Se implementó el modelo de programación lineal utilizando la herramienta Solver de Microsoft Excel.

- **Configuración del Solver:**
 - Se configuró la celda objetivo para minimizar el costo total.
 - Se definieron las celdas variables como las ubicaciones posibles para la PTAR.
 - Se agregaron las restricciones relevantes para asegurar que la solución cumpla con los criterios definidos (ver figura 3)

Figura 3. Evidencia del funcionamiento del modelo Solver en Excel.

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the Solver Parameters dialog box open. The dialog box is configured as follows:

- Establecer objetivo:** \$B\$19
- Para:** ☒ Min
- Por cambiando las celdas de variable:** \$B\$12:\$B\$15
- Restricciones:**
 - \$B\$12:\$B\$15 = 1
 - \$B\$16 = 1
 - \$B\$17 = 1
 - \$B\$18 = 1
 - \$B\$19 = 1
 - \$B\$20 = 1
- ☒ Convertir variables a sin restricciones en no negativas
- Método de resolución:** Simplex LP

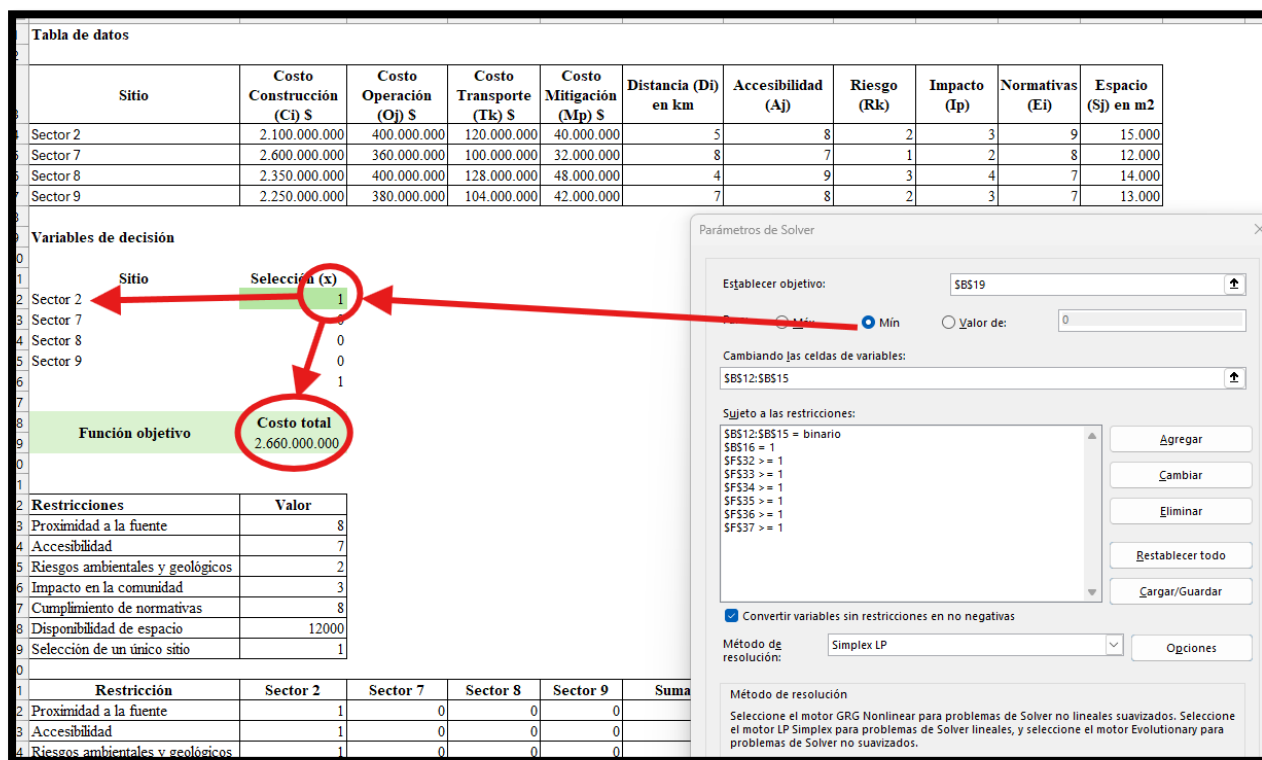
Red arrows in the image point from the text in the previous block to the corresponding fields in the Solver dialog box:

- From "Se configuró la celda objetivo para minimizar el costo total." to the "Establecer objetivo" field.
- From "Se definieron las celdas variables como las ubicaciones posibles para la PTAR." to the "Por cambiando las celdas de variable" field.
- From "Se agregaron las restricciones relevantes para asegurar que la solución cumpla con los criterios definidos (ver figura 3)" to the "Restricciones" list.

6. Ejecución y resultados

- Se ejecutó el Solver para encontrar la solución óptima.

Figura 4. Resultados del modelo Solver en Excel.



- El resultado mostró que el modelo seleccionó el **Sector 2** como la ubicación óptima para la PTAR, minimizando el costo total a **2.600.000.000 de pesos**.
- Verificación de Restricciones:** Todas las restricciones fueron cumplidas, lo que indicaba que la solución era factible y óptima.

Figura 5. Informe de resultados del modelo Solver en Excel.

Microsoft Excel 16.0 Informe de respuestas
 Hoja de cálculo: [Modelo PL.xlsx]Datos
 Informe creado: 09/10/2024 16:16:48
Resultado: Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas.
 Motor de Solver
 Opciones de Solver

Celda objetivo (Min)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$19	Costo total		2.660.000.000

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$B\$12:\$B\$15				

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$B\$16	Selección (x)	1	\$B\$16=1	Vinculante	0
\$F\$32	Proximidad a la fuente Suma	1	\$F\$32>=1	Vinculante	0
\$F\$33	Accesibilidad Suma	1	\$F\$33>=1	Vinculante	0
\$F\$34	Riesgos ambientales y geológicos Suma	1	\$F\$34>=1	Vinculante	0
\$F\$35	Impacto en la comunidad Suma	1	\$F\$35>=1	Vinculante	0
\$F\$36	Cumplimiento de normativas Suma	1	\$F\$36>=1	Vinculante	0
\$F\$37	Disponibilidad de espacio Suma	1	\$F\$37>=1	Vinculante	0
\$B\$12:\$B\$15=Binario					

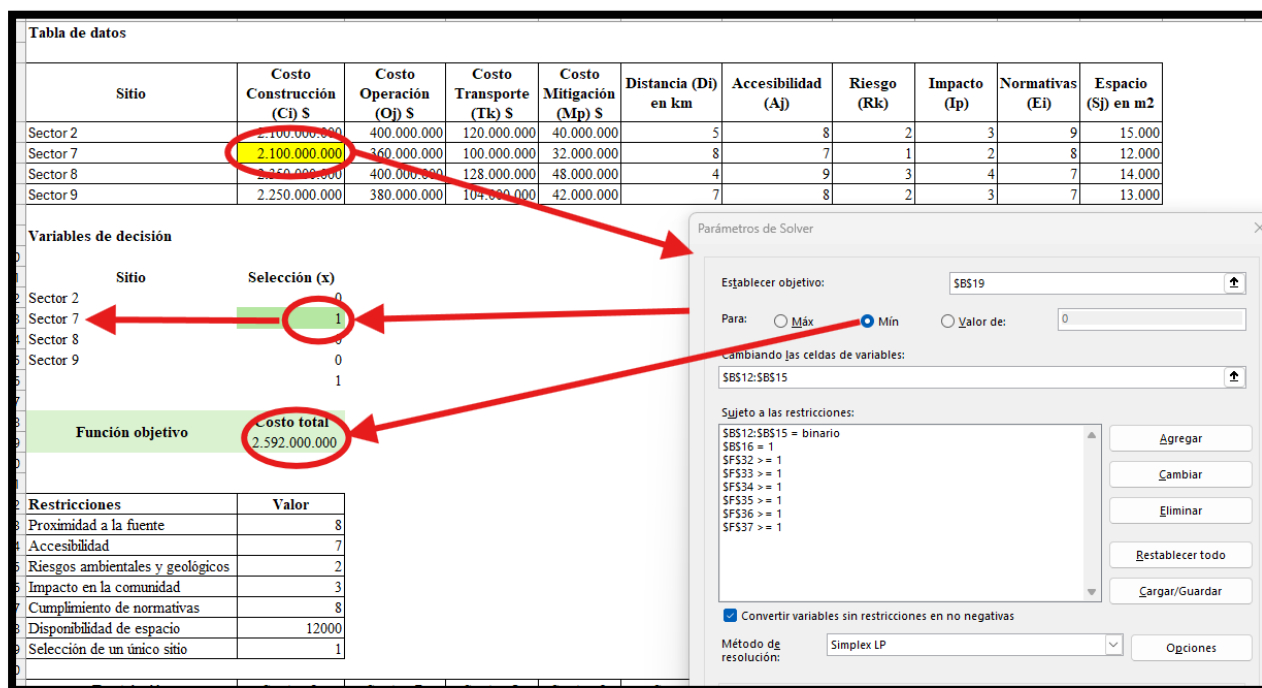
7. Interpretación de los resultados

- Se interpretaron los resultados del Solver, confirmando que la simulación reflejaba correctamente las características del modelo planteado.
- Limitaciones del Ejercicio:** Se reconoció que, debido a la simulación y a la falta de datos precisos, los resultados no necesariamente representan la mejor opción en un escenario real. Sin embargo, el ejercicio sirvió para demostrar cómo se aplica un modelo de programación lineal para resolver problemas de localización óptima.

3.4.1 Escenarios

El modelo permite apreciar los resultados si cambian alguno de los valores asociados a los costos considerados en su formulación. Por ejemplo, si el costo de construcción en el sector 7 disminuye, se recalcula para ofrecer otra localización.

Figura 6. Informe de resultados del modelo Solver en Excel. Escenario alternativo



Microsoft Excel 16.0 Informe de respuestas
 Hoja de cálculo: [Modelo PL.xlsx]Datos
 Informe creado: 09/10/2024 16:27:10
 Resultado: Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas.
 Motor de Solver
 Opciones de Solver

Celda objetivo (Min)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$19	Costo total	2.660.000.000	2.592.000.000

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$B\$12:\$B\$15				

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$B\$16	Selección (x)	1	\$B\$16=1	Vinculante	0
\$F\$32	Proximidad a la fuente Suma	1	\$F\$32>=1	Vinculante	0
\$F\$33	Accesibilidad Suma	1	\$F\$33>=1	Vinculante	0
\$F\$34	Riesgos ambientales y geológicos Suma	1	\$F\$34>=1	Vinculante	0
\$F\$35	Impacto en la comunidad Suma	1	\$F\$35>=1	Vinculante	0
\$F\$36	Cumplimiento de normativas Suma	1	\$F\$36>=1	Vinculante	0
\$F\$37	Disponibilidad de espacio Suma	1	\$F\$37>=1	Vinculante	0
\$B\$12:\$B\$15	Binario				

4. Conclusiones

La revisión de los distintos enfoques metodológicos y los criterios clave considerados en la localización de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) arroja conclusiones fundamentales. Primordialmente, se evidencia la relevancia crítica de seleccionar ubicaciones idóneas para las PTAR, dado su impacto directo en la efectividad del tratamiento de aguas residuales y en la preservación del medio ambiente y la salud pública.

Este análisis revela una diversidad de criterios recurrentes que se consideran esenciales en la elección de sitios para las PTAR, tales como aspectos legales y regulaciones ambientales, riesgos naturales, proximidad a áreas pobladas y zonas recreativas, así como la disponibilidad de recursos hídricos y las características topográficas del terreno. La ponderación de estos factores es indispensable para garantizar la operatividad eficiente y la sostenibilidad ambiental de las PTAR.

La complejidad inherente a la toma de decisiones en la localización de PTAR se hace evidente al observar la variedad de metodologías utilizadas en los estudios revisados, que van desde modelos matemáticos hasta análisis multicriterio con herramientas como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y lógica difusa. Esta diversidad de enfoques refleja la necesidad de evaluar múltiples aspectos técnicos, sociales, ambientales y económicos para tomar decisiones informadas y equilibradas.

En este contexto, se destaca la importancia de adoptar un enfoque integral y multidisciplinario en la localización de PTAR, que considere la interrelación entre diversos factores y la implicación de múltiples partes interesadas. Los estudios revisados proporcionan una base sólida para desarrollar estrategias efectivas de localización de PTAR que cumplan con los estándares de calidad ambiental y satisfagan las necesidades de las comunidades locales. Por lo tanto, la revisión de la literatura especializada subraya la necesidad de una cuidadosa consideración de una amplia gama de factores en la localización de PTAR y aboga por la adopción de enfoques integrados y holísticos para abordar este desafío de manera efectiva.

La selección de alternativas de localización, destinados a recibir las aguas residuales locales en La Unión, implica considerar diversos criterios fundamentales según los autores mencionados previamente.

La aplicación de estos criterios garantiza que las ubicaciones alternativas sean fácilmente accesibles, seguras y apropiadas para el tratamiento de aguas residuales, al tiempo que se satisfacen las necesidades y preocupaciones de la comunidad local y se protege el entorno ambiental circundante. En este sentido, la consideración integral de estos aspectos facilita la toma de decisiones informadas y equilibradas para la selección de sitios óptimos de localización de plantas de tratamiento de aguas residuales en La Unión.

El modelo de programación lineal propuesto para la localización de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el municipio de La Unión, Valle del Cauca, ha sido diseñado con base en criterios multidimensionales que permiten evaluar diversos factores fundamentales en la toma de decisiones.

Entre estos criterios destacan las consideraciones legales, ambientales, de seguridad, así como las condiciones topográficas, de accesibilidad y climáticas. La flexibilidad del modelo permite incorporar restricciones que simulan las exigencias reales del proyecto, tales como la capacidad máxima de tratamiento de las plantas, los costos asociados a la instalación y operación de estas, y el cumplimiento de normativas ambientales vigentes.

De este modo, se logra un enfoque que facilita la toma de decisiones estratégicas para asegurar que las plantas sean ubicadas en sitios que optimicen tanto los costos operativos como los beneficios sociales y ambientales.

Gracias a este diseño, el modelo no solo permite determinar la localización óptima de las PTAR de manera eficiente, sino que también proporciona una base para la planificación a largo plazo. La simulación de distintos escenarios mediante el uso de valores supuestos asegura la adaptabilidad del modelo a contextos cambiantes, garantizando que las decisiones puedan ajustarse a medida que se obtengan datos más precisos.

En última instancia, el modelo permite a los tomadores de decisiones minimizar los costos relacionados con la construcción y operación de las plantas, maximizando al mismo tiempo el impacto positivo en el entorno y la población local. Este enfoque, aunque apoyado en datos hipotéticos, demuestra la viabilidad del uso de técnicas avanzadas de programación lineal para resolver problemas complejos de infraestructura en contextos municipales.

5. Recomendaciones

Monitoreo Continuo: Se recomienda establecer un sistema de monitoreo continuo de la calidad del agua antes y después de la implementación de la PTAR. Esto permitirá evaluar el impacto del tratamiento de aguas residuales en la calidad del agua y realizar ajustes si es necesario.

Educación y Concienciación: Es fundamental llevar a cabo campañas de educación y concienciación pública sobre la importancia del tratamiento adecuado de aguas residuales y los beneficios de la PTAR para la salud pública y el medio ambiente. Esto ayudará a garantizar el apoyo y la participación activa de la comunidad en el proyecto.

Mantenimiento Preventivo: Se debe establecer un programa de mantenimiento preventivo regular para garantizar el funcionamiento óptimo y la vida útil prolongada de la PTAR. Esto incluye inspecciones periódicas, limpieza de equipos y reparaciones necesarias para evitar fallos y minimizar costos de operación a largo plazo.

Capacitación del Personal: Es importante proporcionar capacitación adecuada al personal encargado de operar y mantener la PTAR. Esto garantizará que estén familiarizados con los procesos de tratamiento, los protocolos de seguridad y las mejores prácticas operativas, lo que contribuirá a la eficiencia y eficacia del sistema.

Planificación de Contingencias: Se deben desarrollar planes de contingencia para hacer frente a situaciones de emergencia, como vertidos accidentales o fallos en el sistema. Esto incluye la identificación de medidas de respuesta rápida, la coordinación con autoridades locales y la comunicación efectiva con la comunidad.

Referencias bibliográficas

- Alcaldía Municipal de La Unión. (2023). *Ficha normativa urbanística a cero*. La Unión: Departamento Administrativo de Planeación. Obtenido de https://launionvalledelcauca.micolombiadigital.gov.co/sites/launionvalledelcauca/content/files/001116/55798_ficha-01.pdf
- Andrade, Y., & Castro, L. (2017). *Diseño hidráulico de una planta de tratamiento de agua residual en el hospital nuevo del municipio de Zipaquirá- Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/a4caba9c-2862-4e70-82aa-0349bd469d2d/content>
- Barrantes, E., & Cartín, M. (2017). Eficacia del tratamiento de aguas residuales de la Universidad de Costa Rica en la Sede de Occidente, San Ramón, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 193-197. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v9n1/1659-4266-cinn-9-01-00193.pdf>
- Barrera, S. D., Ramos, J., Camacho, L., Escalante, N., & Torres, M. (2005). Aplicación de un modelo numérico para la priorización de la inversión en tratamiento de aguas residuales en Colombia. *Revista de Ingeniería*(22), 76-83. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n22/n22a9.pdf>
- Buitrago, R. (2010). *Propuesta de optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de Casa Grajales S.A. y grupo Clozano Frexco S.A. de la Unión Valle del Cauca*. Tuluá: Unidad Central del Valle. Obtenido de <https://repositorio.uceva.edu.co/bitstream/handle/20.500.12993/76/T0007571.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Concejo Municipal. (2000). *Acuerdo No. 009 del 2000 “Por medio del cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de La Unión - Valle”*. La Unión: Concejo Municipal. Obtenido de <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/20811/24935-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Estrada, J., & Palacio, J. (2018). *Localización de equipamientos en el municipio de Rionegro mediante un análisis de optimización basado en SIG*. Envigado: Universidad EIA. Obtenido de <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/3cdc9b59-deae-48dd-95a8-b262ce0a4682/content>
- Gorani, M., & Ebraheem, J. (2012). *Location Optimization of Wastewater Treatment Plants Using GIS: A Case Study in Umm Durman/Karary* . Obtenido de Annual Conference of Postgraduate Studies and Scientific Research: <https://core.ac.uk/download/pdf/71673981.pdf>
- Lahera, V. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, 12(2), 58-69. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/401/40115676004.pdf>

- Municipio de La Unión. (2020). *Bases del plan de desarrollo. Parte I: Diagnóstico*. La Unión: Municipio de La Unión. Obtenido de https://concejo-municipal-de-la-union-valle.micolombiadigital.gov.co/sites/concejo-municipal-de-la-union-valle/content/files/000131/6520_1_parte-i_diagnostico_pdm_me-la-juego-por-la-union-vf1.pdf
- Municipio de La Unión. (2023). *Proyecto de acuerdo modificadorio*. La Unión: Concejo Municipal. Obtenido de https://launionvalledelcauca.micolombiadigital.gov.co/sites/launionvalledelcauca/content/files/001117/55801_acuerdo-modificadorio.pdf
- Peña, D. L., Ordoñez, C., & Arana, C. (2017). Modelo para la evaluación de alternativas de localización de una PTAR para una ciudad en el Valle del Cauca Colombia. *Scientia Et Technica*, 22(2), 167-174. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84953103008.pdf>
- Pilar, J., Ruberto, A., & Gómez, M. (2017). Optimización multiobjetivo aplicada a la elección de la localización de la planta de tratamiento de agua en Misión Nueva Pompeya, Chaco. *UNC*(30), 1-8. Obtenido de https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/30779/RIUNNE_FING_AC_Pilar-Ruberto-G%c3%b3mez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rodríguez, J., García, C., & Pardo, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), 149-164. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v19n46/v19n46a13.pdf>
- Ruberto, A., Pilar, J., & Gómez, M. (2015). Localización de planta de tratamiento de agua aplicando técnicas de optimización. *Revista Argentina de Ingenieria*, 5, 75-80. Obtenido de https://repositorio.unne.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/28435/RIUNNE_FING_AR_Ruberto-Pilar-G%c3%b3mez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Shahnoradi, B., & Asghar, A. (2013). Site selection for wastewater treatment plant using integrated fuzzy logic and multicriteria decision model: A case study in Kahak district. *J Adv Environ Health Res*, 1(1), 1-12. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/255723343_Site_selection_for_wastewater_treatment_plant_using_integrated_fuzzy_logic_and_multicriteria_decision_model_A_case_study_in_Kahak_district
- Zhou, Y., Song, Y., Li, S., Quin, W., & Sun, J. (2022). A Location Selection Method for Wastewater Treatment Plants Integrating Dynamic Change of Water Ecosystem and Socio-Cultural Indicators: A Case Study of Phnom Penh. *Water*(14), 1-18. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/22/3637>