

**PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA EN EL CASCO
URBANO DEL MUNICIPIO DE TENJO, CUNDINAMARCA**

**GERMAN EDUARDO ROBAYO RAMOS
MAURICIO RIVAS PALACIO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2020

**PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA EN EL CASCO
URBANO DEL MUNICIPIO DE TENJO, CUNDINAMARCA**

**GERMAN EDUARDO ROBAYO RAMOS
MAURICIO RIVAS PALACIO**

**Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
DAVID TRIVIÑO RODRÍGUEZ
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2020

Nota de aceptación:

Ing. Orlando Castiblanco

Ing. William Suarez

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Iván Ramírez Marín

Las directivas de la universidad de América, como los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

Dedicatoria

Este trabajo representa los esfuerzos, la dedicación y el compromiso durante los últimos cinco años para llegar a esta fase de mi vida; darme cuenta de todo lo que he aprendido con el paso de los años, en conocimientos y lecciones, por medio vivencias personales y académicas, y también me enseñó a agradecer a las personas que hicieron parte de este corto pero sustancioso ciclo. Principalmente a mi círculo familiar, padres y hermano. Los tres siempre apoyándome incondicionalmente y dando ese impulso necesario para avanzar y alcanzar las metas que me he propuesto. Todo lo que soy como persona actualmente, es gracias a sus consejos y enseñanzas. A mi demás familia, por sus palabras de fortaleza y cariño que me ayudaron crecer como persona. Los compañeros de vida, amigos y amigas que se han cruzado en este camino pero que dejaron grandes recuerdos, con los que gocé, aprendí y viví experiencias que siempre estarán presentes. Por último, pero no menos importante, a Dios por la bendiciones que ha traído a mi vida.

German Eduardo Robayo Ramos

La culminación de una etapa única en la vida se refleja en este logro en este acontecimiento tan valioso, donde me encuentro plenamente agradecido y honrado por todas las personas que me acompañaron, me aguantaron y me guiaron en los distintos momentos, a las personas conocidos y extraños que de una u otra manera estuvieron en este camino, a mi madre apoyo incondicional en todos los aspectos con paciencia y cariño infinito, a mi padre otro pilar fundamental de mi vida siempre firme, a mis hermanos menores alegres solidarios y amables, a todos mis amigos y amigas distintos todos entre sí, cómplices de lecciones de vida, tertulias, epopeyas y aventuras, a mis compañeros de clase o trabajo y mis profesores siempre enseñándome algo más y no solo académicamente, a mi extensa familia tanto materna como paterna con palabras de aliento y amor inacabable, a Dios por todo y más.

A todos ellos, por todo el amor compartido, por las vivencias y enseñanzas conseguidas y todo lo demás que se escapa a estas letras a ustedes les dedico esto.

Mauricio Rivas Palacio

Agradecimientos

Al ingeniero Henry Camacho, quien fue la persona que nos presentó el proyecto y confió en nosotros para la ejecución del mismo. Agradecemos por el aporte de sus conocimientos que permitieron realizar este trabajo de la mejor manera, sobrellevando todas las adversidades presentadas.

A nuestro director de tesis, el ingeniero David Triviño, que, a pesar de la distancia, siempre estuvo dispuesto a escucharnos y apoyarnos con sus conocimientos y su tiempo, para que el proyecto se ejecutara de la mejor forma posible.

A los orientadores de trabajo de grado José Silva y Harvey Milquez, por sus comentarios positivos y apuntes sobre el desarrollo de este trabajo, que permitieron alcanzar los requisitos necesarios para cumplir los objetivos.

Por último, a la Universidad de América por facilitarnos sus instalaciones y laboratorios para realizar nuestra fase experimental, y por supuesto, a todo su equipo de personas que siempre estaban dispuestos a brindar su ayuda.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES	
22	
1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA	22
1.2 DEFINICIONES RELACIONADAS AL AGUA LLUVIA	23
1.2.1 Ciclo hidrológico	23
1.2.2 Escorrentía superficial	24
1.2.3 Fenómeno de primer lavado	25
1.3 APROVECHAMIENTO AGUA LLUVIA	25
1.3.1 Captación de Agua lluvia	27
1.3.2 Transporte de Escorrentía	28
1.3.3 Tratamiento	30
2. DIAGNÓSTICO DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA LLUVIA	36
2.1 SELECCIÓN PUNTOS ESTRATÉGICOS DE MUESTREO	36
2.1.1 Factores de incidencia en la selección de puntos de muestreo	37
2.1.2 Descripción de Puntos de muestreo	37
2.2 DETERMINACIÓN NUMERO DE MUESTREOS	39
2.3 CAPTACIÓN DE MUESTRAS EN PUNTOS SELECCIONADOS	40
2.4 MÉTODO DE PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA	41
2.5 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS AGUA LLUVIA A ANALIZAR	43
2.5.1 Potencial de Hidrógeno (pH)	43
2.5.2 Conductividad eléctrica	43
2.5.3 Sólidos suspendidos totales (SST)	44
2.5.4 Sólidos totales (ST)	45
2.5.5 Sólidos Sedimentables (SS)	46
2.5.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	47

2.5.7 Alcalinidad	47
2.5.8 Turbidez	48
2.5.9 Dureza total	49
2.5.10 Aceites y Grasas	50
2.5.11 Hidrocarburos Disueltos	51
2.5.12 Metales (Plomo, Cadmio y Cobre)	51
2.6 RESULTADOS DIAGNOSTICO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA LLUVIA EN TENJO, CUNDINAMARCA	52
2.7 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA Y DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA LLUVIA EN LUGARES SIMILARES	54
2.7.1 Campus universitario de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJB), sede Bogotá	54
2.7.2 Zona residencial barrió Nueva Zelandia en UPZ San José de Bavaria, localidad de Suba, Bogotá.	55
2.7.3 Edificios Laboratorio de Hidráulica y CADE del Campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá	57
2.8 DETERMINACIÓN DE CARACTERIZACIÓN PONDERADA DEL AGUA LLUVIA DE ESCORRENTÍA	58
3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA LLUVIA	63
3.1 PRESENTACIÓN DE ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO Y SU NORMATIVIDAD	63
3.1.1 Potabilización	64
3.1.2 Sector Agropecuario	66
3.1.3 Recarga a fuentes subterráneas	68
3.1.3.1 Casos de estudio.	69
3.2 MÉTODO DELPHI Y APLICACIÓN	70
3.3 MODELO DE PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)	71
3.3.1 Selección y descripción de criterio en alternativas consideradas	72
3.3.2 Metodología de aplicación del modelo AHP	73
3.3.3 Selección de la mejor alternativa de aprovechamiento	79
4. DESARROLLO DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA	81

4.1 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS FRENTE A NORMATIVIDAD	81
4.2 CÁLCULO CAUDAL DE DISEÑO	82
4.2.1 Curvas de intensidad-duración-frecuencia (curvas IDF)	83
4.2.2 Coeficiente de escorrentía superficial	84
4.3 SELECCIÓN DE ETAPAS Y PROCESOS DE TRATAMIENTO	86
4.3.1 Desarenador	89
4.3.2 Sedimentación primaria	89
4.3.3 Esquema general del proceso de tratamiento	90
4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE PROCESO	91
4.4.1 Dimensionamiento del desarenador de dos canales	92
4.4.2 Dimensionamiento de un sedimentador primario circular	94
5. ANÁLISIS FINANCIERO DE LA PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA	95
5.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN, GASTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M) DEL PROYECTO	97
5.1.1 Determinación costos de inversión	97
5.1.2 Determinación costos de operación y mantenimiento (O&M)	99
5.3 DETERMINACIÓN BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO	101
5.3.1 Determinación de los costos del agua con la propuesta.	101
5.4 VIABILIDAD DEL PROYECTO	102
6. CONCLUSIONES	105
7. RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	115

LISTAS DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1: Mapa del sistema de alcantarillado y acueducto casco urbano del Municipio de Tenjo	22
Ilustración 2: Esquema ciclo hidrológico.	23
Ilustración 3: Sistemas de reutilización de aguas municipales, por campo de aplicación	26
Ilustración 4: Modalidades de captación de agua según la finalidad de uso	28
Ilustración 5: Representación sistema de alcantarillado separado	29
Ilustración 6: Representación sistema de alcantarillado combinado	30
Ilustración 7: Ubicación espacial de los tres puntos de muestreo	38
Ilustración 8: Representación de la captación en puntos de muestreo	41
Ilustración 9: Potenciómetro Hanna PHPE4	43
Ilustración 10: Conductímetro	44
Ilustración 11: Filtración para medición de sólidos suspendidos	45
Ilustración 12: Sedimentación en cono Imhoff	46
Ilustración 13: Turbidímetro	49
Ilustración 14: Titulación con Na ₂ EDTA y negro de Eriocromo	50
Ilustración 15: Diagrama de flujo elaboración de la caracterización del agua lluvia.	59
Ilustración 16: Censo Nacional Agropecuario	66
Ilustración 17: Estructura AHP para el análisis de selección de alternativa de aprovechamiento de agua lluvia.	73
Ilustración 18: Etiquetas para criterio y alternativas.	74
Ilustración 19: Desarenador rectangular de flujo horizontal	89
Ilustración 20: Sedimentador primario. (Circular y rectangular)	90
Ilustración 21: Esquemas general del tratamiento.	91

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1: Distribución de los pesos alternativos para los criterios.	75
Gráfico 2: Distribución de los pesos alternativos para las alternativas en relación a los criterios.	77
Gráfico 3: Distribución de los valores ponderados para las alternativas.	79
Gráfico 4: Curvas IDF estación Tibaitata (Mosquera).	84

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Tipos de Tratamiento de Aguas	30
Tabla 2: Determinación de tiempo y método de conservación de la muestra.	42
Tabla 3: Resultado de los parámetros fisicoquímicos en el casco urbano del municipio de Tenjo.	53
Tabla 4: Resultado de los parámetros fisicoquímicos de los diferentes puntos en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJB), sede Bogotá	55
Tabla 5: Resultado de los parámetros fisicoquímicos en zona residencial UPZ San José de Bavaria	56
Tabla 6: Resultado de los parámetros fisicoquímicos de pozos en LH y CADE Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá	58
Tabla 7: Aplicativo de promedio aritmético y geométrico a parámetros fisicoquímicos.	61
Tabla 8: Caracterización ponderada del agua lluvia de escorrentía.	62
Tabla 9: Parámetros Fisicoquímicos del agua para el consumo humano	65
Tabla 10: Distribución a) del suelo para diferentes cultivos, b) de zonas de producción pecuaria	66
Tabla 11: Parámetros fisicoquímicos del agua para sector Agrícola y Pecuario.	67
Tabla 12: Parámetros fisicoquímicos del agua para reinyección en fuentes subterráneas.	68
Tabla 13: Descripción de los criterios considerados para el modelo AHP.	72
Tabla 14: Escala de Preferencia por pares (Saaty)	74
Tabla 15: Determinación de pesos alternativos para los criterios (Modelo AHP)	75
Tabla 16: Índice aleatorio (RI)	76
Tabla 17: Determinación de la consistencia de los criterios (Modelo AHP)	76
Tabla 18: Determinación de valores ponderados para las alternativas (Modelo AHP)	79
Tabla 19: Comparación del diagnóstico de agua lluvia contra la normatividad para el sector agropecuario.	81
Tabla 20: Coeficientes de escorrentía (C)	85
Tabla 21: Áreas y subáreas del suelo urbano central en Tenjo.	86
Tabla 22: Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario.	88
Tabla 23: Velocidades de sedimentación para diferentes tamaños de arenas a una temperatura de 16 °C	92
Tabla 24: Criterio de diseño de los desarenadores	92
Tabla 25: Criterios del dimensionamiento de un desarenador de dos canales	93
Tabla 26: Criterios de diseño para sedimentadores primarios circulares	94

Tabla 27: Resultados dimensionamiento de dos tanques circulares de sedimentación primaria.	95
Tabla 28: Resumen de valores de parámetros en efluente	96
Tabla 29: Costos de inversión del tratamiento	98
Tabla 30: Costos anuales sobre prestación de servicios.	99
Tabla 31: Gastos energéticos anuales para el desarenador de dos canales.	100
Tabla 32: Gastos energéticos anuales para el sedimentador primario circular.	100
Tabla 33: Costos anuales de mantenimiento de procesos unitarios.	100
Tabla 34: Desglose valor unitario de contribución.	102
Tabla 35: Resumen cálculos del VPN (Actual y con proyecto)	103

TABLA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1: Numero de muestras poblaciones infinitas	40
Ecuación 2: Cálculo de Sólidos Suspendidos Totales	45
Ecuación 3: Cálculos de Sólidos totales	46
Ecuación 4: Cálculo de Demanda Química de Oxígeno (DQO)	47
Ecuación 5: Cálculo de Alcalinidad	48
Ecuación 6: Cálculo de la Dureza	49
Ecuación 7: Cálculo de Grasas y Aceites	51
Ecuación 8: Cálculo de Hidrocarburos Disueltos	51
Ecuación 9: Promedios a) Aritmético, b) Geométrico	60
Ecuación 10. Índice de consistencia (CI)	75
Ecuación 11: Caudal pluvial de diseño	82
Ecuación 12: Cálculo del coeficiente de escorrentía ponderado.	85
Ecuación 13: Ecuaciones de diseño de desarenadores	93
Ecuación 14: Ecuaciones para el diseño de un sedimentador primario circular	95
Ecuación 15: Cálculo Valor Presente Neto (VPN)	102
Ecuación 16: Cálculo de la Tasa Interés de Oportunidad (TIO)	103
Ecuación 17: Cálculo relación beneficio/costo	104

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A: Guías de laboratorio – Características físicas y químicas fundamentales del agua. Fundación Universidad de América	116
Anexo B: Resultados fisicoquímicos agua lluvia Tenjo: Laboratorio QUIMCONTROL LTDA.	123
Anexo C: Encuesta de selección de alternativa (Método Delphi)	124
Anexo D: Tablas del informe de costos de inversión y de operación y mantenimiento de alternativas (PTARM CANOAS)	125
Anexo E: Cotizaciones materiales, insumos y equipos	128
Anexo F: Datos pluviométricos casco urbano municipio de Tenjo. Precipitaciones mensuales y anuales (IDEAM)	129
Anexo G: Tabla de Distribución Normal Tipificada	130

RESUMEN

Asignar un aprovechamiento del agua lluvia de escorrentía como es el propósito de la empresa EmserTenjo, requería crear una ruta de trazabilidad donde se analizó la composición fisicoquímica del agua, para estudiar las diferentes alternativas de aprovechamiento, y, de ahí, seleccionar la más adecuada para adaptar este recurso, para luego diseñar un tratamiento para mejorar la calidad del agua lluvia, y, por último, estimar los costos de la propuesta.

Por ende, el primer paso fue obtener el diagnóstico del agua lluvia por escorrentía experimentalmente en la zona de estudio, es decir, el casco urbano del municipio Tenjo. Definiendo el número de muestras necesarias para que el diagnóstico del agua lluvia fuera representativo, fue necesario consultar por medio de revisiones bibliográficas, caracterizaciones del agua lluvia en zonas con características geo demográficas afines al área de estudio, como los son campus universitarios y urbanizaciones en la ciudad de Bogotá, las cuales presentaban similitudes en los factores de incidencias para la toma de muestras que se plantearon en el proyecto. Con la recolección de datos, se logró obtener una caracterización con un número mayor de parámetros analizados y más representativos usando métodos matemáticos.

Aplicando herramientas estadísticas como el modelo AHP, se seleccionó la opción de adecuación del agua lluvia para el sector agropecuario como la mejor alternativa de aprovechamiento, frente a las otras dos planteadas, potabilización, y recarga a fuentes subterráneas. Decantando la alternativa de aprovechamiento, comparando con la normativa expuesta en el Decreto 1594 de 1984, se identificaron los parámetros que estaban fuera de especificación, y que requerían de un tratamiento adecuado, para ajustar este recurso que garantizara su uso. Basado en la bibliografía, se seleccionaron dos etapas de tratamiento; la etapa de pretratamiento y de tratamiento primario, con sus respectivamente unidades, un desarenador y sedimentador primario.

Por último, se estimaron los costos de la inversión en obras civiles y equipos, gastos anuales de operación y mantenimiento (O&M) de las unidades de tratamiento, para luego, establecer la viabilidad del proyecto determinando sus ganancias (VPN) en un periodo de cinco años, y su relación beneficio/costo.

PALABRAS CLAVES

Agua lluvia, Aprovechamiento, Escorrentía superficial, Tratamiento de aguas, Sector agropecuario.

ABSTRACT

Assign a use of rainwater run-off as is the purpose of the company EmserTenjo, request to create a traceability route where the physicochemical composition of the water is analyzed, study the different use alternatives and from there, select the most appropriate to adapt this resource, to then design a treatment to adapt the rainwater, and finally, to estimate the costs of the proposal.

Therefore, the first step was to obtain the diagnosis of rainwater by run-off experimentally in the study area, that is, the urban area of the Tenjo municipality. Defining the number of samples necessary for the diagnosis of rainwater were representative, it was necessary to consult, through bibliographic reviews, characterizations of rainwater in areas with geodemographic characteristics related to the study area, such as the university campus and urbanizations in the city of Bogotá, which show similarities in the incidence factors for sampling that were raised in the project. With data collection, a characterization with a larger number of analyzed and more representative parameters can be obtained using mathematical methods.

Applying statistical tools such as the AHP model, you can select the option of adaptation of rainwater for the agricultural sector as the best alternative for use, compared to the other two planted, purification, and recharge to underground sources. Decanting the use alternative, comparing with the regulations set forth in Decree 1594 of 1984, identifying the parameters that are outside the specification, and that require adequate treatment, to adjust this resource that guarantees its use. Based on the bibliography, two stages were selected; the pre-treatment and primary treatment stage, with its respective units, a sand trap and primary settler.

Lastly, the investment costs in civil works and equipment, annual operation and maintenance (O&M) expenses of the treatment units were estimated, to then establish the viability of the project determining its earnings (NPV) in a period of five years, and its benefit/cost ratio.

KEY WORDS

Rainwater, Harness, Surface run-off, Water treatment, Agricultural sector.

INTRODUCCIÓN

El propósito de este proyecto es buscar implementar una alternativa que permita mitigar una problemática que ha ido en aumento con el paso de los años, aunque por medio de la normas emitidas por entes estatales se controle el avance, se sigue presentando el problema de contaminación en fuentes hídricas como ríos, lagunas o lagos, afectando directamente la salud pública, el desarrollo y sostenimiento económico de la población que dependen del suministro de estas fuentes y principalmente, el desabastecimiento de agua.

Este proyecto parte del diseño que presenta la empresa de servicios públicos de Tenjo (EmserTenjo), de la mano del Gobierno Municipal, donde buscan la implementación de un sistema de alcantarillado separando la conexión existente entre el alcantarillado doméstico con el pluvial. Esto con el fin, de que cuando se presenten temporadas de invierno, o fenómenos naturales (como el fenómeno de la niña) que contribuyen a un aumento de precipitaciones sobre el municipio de Tenjo, se reduzca la probabilidad de saturar la planta de tratamiento de aguas residuales. Con un sistema de alcantarillado exclusivo para el agua pluvial, se crea la necesidad de implementar un tratamiento idóneo para estas aguas contaminadas, que de no ser tratadas y drenar libremente, terminarían por afectar de forma directa, las características fisicoquímicas y microbiológicas de la fuente donde sean depositadas.

Para el municipio de Tenjo, que posee recursos hídricos muy limitados para abastecer la totalidad de la demanda, y además de esto, el proceso de extracción de agua presenta pérdidas considerables que empeoran aún más la situación actual. Su búsqueda para afrontar este escenario, se ha decantado en invertir en fuentes de suministro externas que permitan contrarrestar el desabastecimiento en el municipio, esto ha generado un gasto adicional en su presupuesto, al igual, que se ha creado una dependencia que puede desencadenar una situación poco alentadora. Esto sumado, a una problemática ambiental que engloba la contaminación sobre las fuentes hídricas que se han incrementado con el paso de los años, y que se potencializa en pocas de invierno por la saturación de la planta de tratamiento de las aguas residuales municipales. La implementación de proyectos por parte del gobierno municipal, está orientada a identificar posibles escenarios donde se evalúen la aplicación de fuentes hídricas adicionales con las que el municipio cuente para aumentar la oferta de este recurso, y, que, de igual manera, contribuyan con la minimización de la problemática ambiental que se presenta, dan pie a propuestas como la mencionada en el proyecto.

Consecuente a lo anterior, adecuar algún recurso requiere de un tratamiento idóneo que garantice a calidad del mismo. El tratamiento de aguas contaminadas

conlleva a dos caminos: el primero es mejorar sus características de acuerdo a la normatividad ambiental para luego ser drenadas en un cuerpo de agua y no afectar drásticamente sus propiedades originales, o realizar el proceso de inyección hacia las fuentes de captación, que permitirá alargar el ciclo de vida de estos cuerpos subterráneos. El segundo camino, es lograr por medio del tratamiento un recurso hídrico que posea las propiedades óptimas para su aprovechamiento. Dentro de las alternativas de aprovechamiento se encuentran el proporcionar un mayor abastecimiento en el sector agropecuario o de cultivo de flores, que representan la mayor participación en las actividades económicas y por su funcionalidad, un alto consumo de agua anualmente que es complementado entre recursos propios y el sistema de acueducto. Otra alternativa, es alcanzar el estado de potabilización del agua lluvia para aumentar la oferta de un recurso adecuado para el consumo humano, combatir una escasez futura, permitir el crecimiento económico y mejorar la calidad de vida de la comunidad la cual tiene acceso a esta.

La búsqueda de un tratamiento idóneo tiene como punto de partida, definir el uso para el cual se va disponer el agua tratada, conocer las características físico químicas que establece los entes encargados de la vigilancia, control y el cumplimiento de las normas que establecen los parámetros mínimos para el uso del agua y no perjudicar la salud pública. Esta elección de tratamiento requiere de un proceso de caracterización de las precipitaciones, en particular sobre la obtenida en el primer lavado, ya que en este periodo de tiempo, se presentan las concentraciones más altas de materia orgánica, compuestos químicos, hidrocarburos, metales pesados y carga microbiana que cuando se presentan periodos de sequía, y que por medio del proceso de escorrentía superficial en el casco urbano, estos contaminantes son arrastrados hacia sistema de alcantarillado pluvial.

El desarrollo de este proyecto, pretenden servir como base de partida para futuros proyectos de implementación sobre un posible tratamiento del agua lluvia en municipios o localidades que presenten alguna problemática con escasez de agua salobre, o que presenten la oportunidad de reutilizar el agua lluvia para buscar un aprovechamiento específico que permita contribuir a la capacidad extraída por medios propios, ayudar a suplir la demanda insatisfecha, y adicional a esto, lograr aumentar la accesibilidad para toda la población.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de aprovechamiento de agua lluvia en el casco urbano del municipio de Tenjo

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar los parámetros fisicoquímicos de las precipitaciones en el casco urbano del municipio de Tenjo.
- Seleccionar la mejor alternativa de aprovechamiento del agua lluvia.
- Desarrollar el diseño conceptual de la planta de tratamiento de agua lluvia.
- Realizar el análisis financiero de la implementación del proceso de aprovechamiento de agua lluvia.

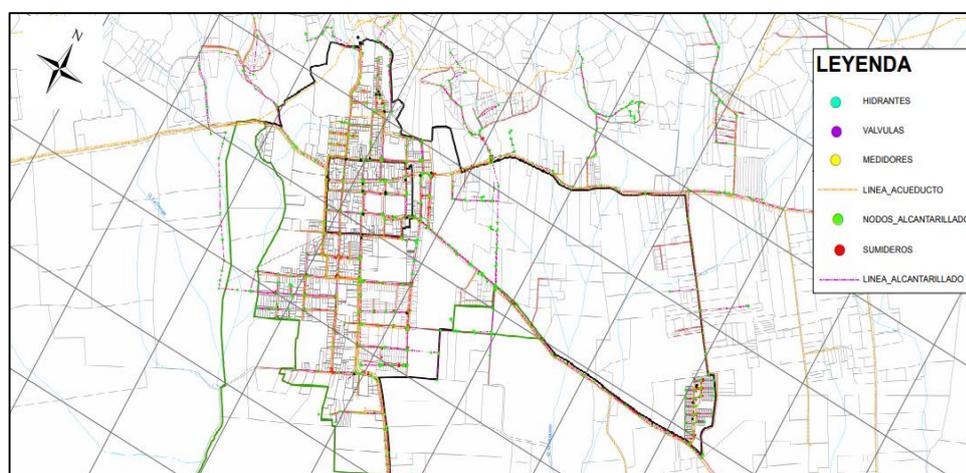
1. GENERALIDADES

1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA

La empresa de servicios públicos del municipio de Tenjo (EmserTenjo), es la entidad municipal que se encarga de la prestación de servicios de primera necesidad como el abastecimiento de agua potable hacia toda la población del municipio; además, que presta servicios adicionales tales como, recolección y manejo de residuos sólidos, y residuos especiales (baterías, llantas y demás) a lo largo de todo el territorio municipal, el desarrollo de actividades de aseo de calles y sitios públicos de Tenjo, el manejo de aguas residuales mediante sus dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), al igual, que desarrolla tareas en el mantenimiento del acueducto y el alcantarillado municipal¹.

El municipio de Tenjo que mediante la empresa EmserTenjo, obtienen su recurso hídrico principalmente de una captación subterránea de agua por medio de tres pozos. Este recurso extraído y purificado tiene como vía de distribución el acueducto que lo direcciona hacia la población con la finalidad de prestar un servicio para usos domésticos, recreativos y también destinada a actividades económicas como la ganadería, la agricultura y el cultivo de flores para exportación y comercio nacional. Por medio de la *ilustración 1*, se denota la cobertura total del sistema de acueducto y alcantarillado en la zona de estudio para la captación del agua lluvia de escorrentía, evidenciando los puntos ingreso (sumideros) hacia el sistema de transporte del recurso (red de alcantarillado).

Ilustración 1. Mapa del sistema de alcantarillado y acueducto casco urbano del Municipio de Tenjo



Fuente: SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA PLANEACIÓN Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL (SIGOT). POT municipales (Tenjo). [Consultado el 20 de mayo de 2020]. Disponible en Internet: <https://sigot.igac.gov.co>

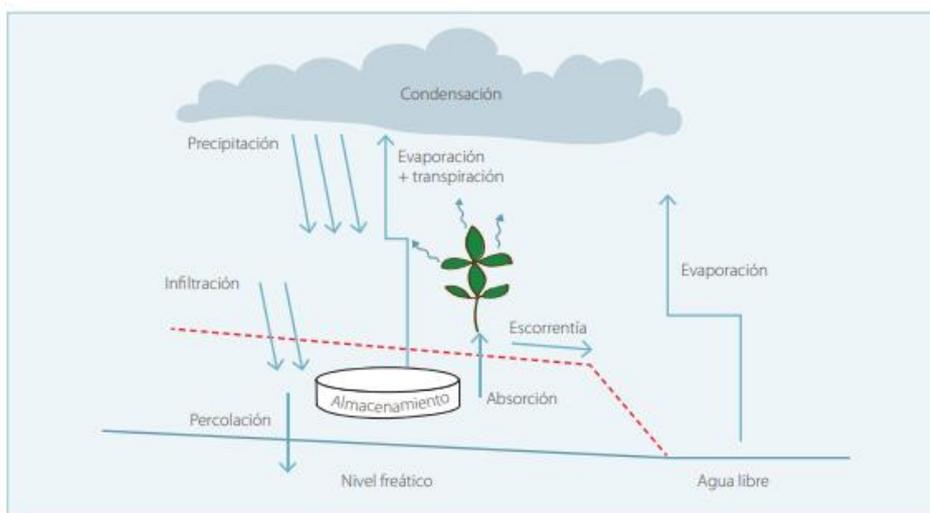
¹Empresa Pública de Tenjo (EmserTenjo). Entidad. Disponible en: <http://www.empsertenjo.gov.co/>

1.2 DEFINICIONES RELACIONADAS AL AGUA LLUVIA

1.2.1 Ciclo hidrológico. El agua está en continuo movimiento, por motivos de radiación solar y de la gravedad, el agua se desplaza continuamente desde las tierras y los océanos hacia la atmósfera en forma de vapor, y a su vez, vuelve a caer sobre las tierras, los océanos y otras masas de agua en forma de precipitación. La sucesión de estas etapas se denomina ciclo hidrológico. El ciclo presenta diferencias cuantitativas y cualitativas en sus diversos componentes y fases, conforme a la región o zona, y en base a esto, se ha aprendido a convivir con sus características naturales revisando e indicando los posibles cambios provocados por el manejo y uso de las tierras.

Al comprender el ciclo hidrológico, con el desarrollo de la ciencia y la tecnología para uso y manejo del agua, es posible orientarse a la búsqueda de un mejor aprovechamiento de este recurso en sus diversas fases y formas dentro del ciclo hidrológico, ayudando a definir los límites de los activos del agua y a explicar las diferencias espaciales y temporales en la distribución del agua. La ilustración 2, indica las diversas etapas del ciclo natural del agua y se consideran las tierras, la atmósfera y el mar como lugares de acopio de agua².

Ilustración 2. Esquema ciclo hidrológico.



Fuente: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar de América Latina. Santiago, Chile. 2013. p 12.

El equilibrio natural del agua en el ciclo hidrológico puede describirse relacionando la precipitación como producto de la adición de la evapotranspiración, más escorrentía y la relación de variaciones en el agua acumulada. Esto significa que el agua aportada por la precipitación es objeto de

² SCAE-AGUA. Sistema de contabilidad Ambiental y Económica para el agua. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Naciones Unidas. 2011. p 99-100

evaporación o transpiración por conducto de la vegetación (evapotranspiración), o fluye hacia los ríos o arroyos (escorrentía), o se acopia en masas de agua naturales o construidas (variaciones en el agua acumulada). Es preciso afirmar, que el ciclo puede sufrir alteraciones debido a actividades humanas de extracción y devolución al medio ambiente⁴.

1.2.2 Escorrentía superficial. La escorrentía puede ser superficial o subsuperficial, pero mayormente se presenta de forma subsuperficial, es decir, el agua que no circula en régimen de lámina libre, sino que se infiltra, escapa de la evapotranspiración, y circula horizontalmente por la parte superior de la zona no saturada hasta volver a la superficie. La distribución entre la escorrentía superficial y la subsuperficial está determinada por la tasa de infiltración del terreno, según su topografía (textura y estructura) y la capacidad de almacenamiento, las cuales dependen, básicamente, de factores climatológicos, geológicos, e hidrológicos (intensidad y la duración de la lluvia)³.

La escorrentía superficial es la parte de la precipitación que no llega a penetrar el perfil de suelo y, por consiguiente, circula sobre la superficie del terreno. Esta se puede presentar por lluvias muy intensas que superan la capacidad de infiltración de agua en el suelo o que fluyen sobre superficies poco permeables (suelos delgados, terrenos rocosos, caminos, patios, techos, etc.). Este tipo de escorrentía puede ser aprovechada para usos doméstico, animal o riego. Para ello, se requiere de manejar y captar después de que se inicia, ya que, si no hace, puede derivar en un problema de difícil control y causar daños, además, de producir erosión hídrica que destruye los suelos.

Como aplicativo al proyecto, en la escorrentía urbana se registra una alta carga de contaminante, lo que incluye una gran cantidad de basuras y desechos orgánicos y bacterianos, además, de productos químicos como aceites, anticongelantes, detergentes, plaguicidas y otros contaminantes arrastrados desde las calzadas para automóviles, los patios traseros de las viviendas, y las zonas de estacionamiento⁴. Ante el aumento de conciencia acerca del peligro potencial de descargarla en el medio ambiente sin tratamiento previo se han venido presentado propuestas que busquen reducir este impacto, y, además, sacar un provecho de estas aguas.

³ FAO. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar de América Latina. Santiago, Chile. 2013. p 15

⁴ SCAE-AGUA. Sistema de contabilidad Ambiental y Económica para el agua. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Naciones Unidas. 2011. p 71, 101

1.2.3 Fenómeno de primer lavado. Se les denomina así a las precipitaciones iniciales de la lluvia, las cuales arrastran concentraciones de contaminantes hacia un cuerpo receptor, donde se presentan cambios en la calidad del agua que es arrastrada después de la lluvia de inicio de temporada. Durante esta fase, la contaminación del agua que ingresa a los desagües pluviales en áreas con altas proporciones de superficies impermeables suele estar más concentrada en comparación con el resto de la tormenta. En consecuencia, estas altas concentraciones de escorrentía urbana resultan en altos niveles de contaminantes descargados al sistema de alcantarillado pluvial de aguas superficiales⁵.

1.3 APROVECHAMIENTO AGUA LLUVIA

Las precipitaciones de manera indirecta se encargan de recargar los embalses, pantanos, ríos y acuíferos de los cuales el ser humano habitualmente obtiene el recurso hídrico, la ausencia parcial de las mismas (o en algunos casos la ausencia total de precipitaciones) en determinadas zonas geográficas afecta directamente a millones de personas, que sufren restricciones de uso cada vez más habituales⁶. Por ende, ante el panorama actual de aumento de situaciones de escasez y disminución paulatina del agua no contaminada en el entorno global debido al aumento del consumo, contaminación y mala gestión del recurso hídrico, el aprovechamiento de otras fuentes hídricas es una opción real y de desarrollo crucial para el devenir de este recurso indispensable, escenario donde el agua lluvia posee un gran potencial de aportar y aliviar parcialmente la demanda creciente de agua.

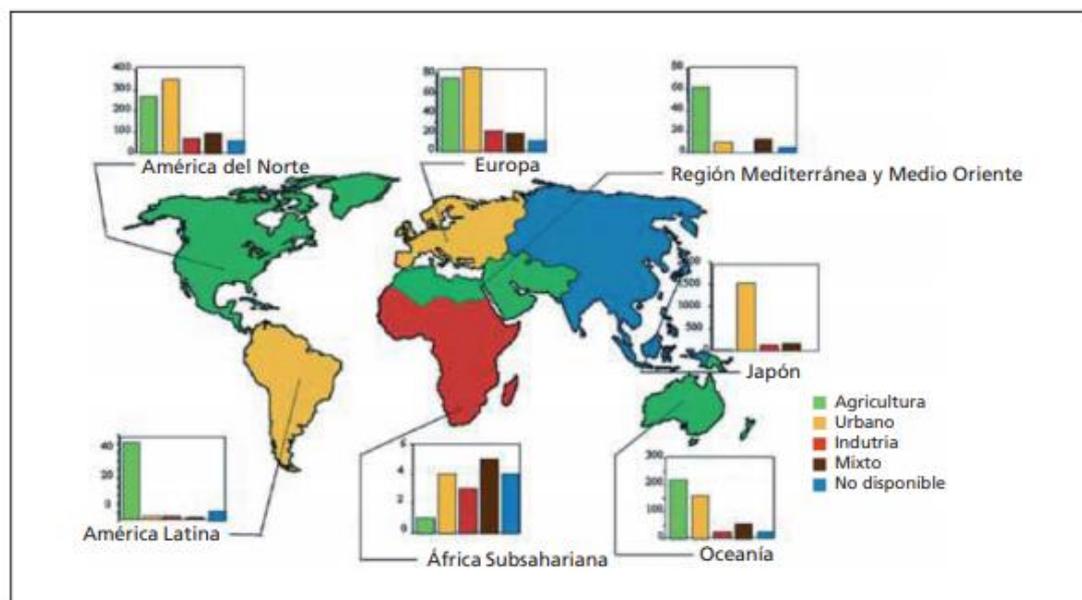
En los últimos años, se conocen más de 3300 instalaciones para el tratamiento y regeneración de aguas residuales, con diversos grados de etapas de acondicionamiento, y aplicadas para varios fines, como el riego agrícola, diseño urbano y usos recreativos, procesamiento industrial, la producción indirecta de agua potable, y la recarga de aguas subterráneas⁷. La ilustración 3 muestra el número de sistemas de reutilización de agua municipal en las diferentes regiones del mundo, según el uso de aplicación, agrícola, urbano, industrial y mixto (multipropósito).

⁵ MAESTRE, A, PITT, R. The National Stormwater Quality Database, Version 1.1. Center for Watershed Protection. Report prepared for U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington. 2005.

⁶ PEREZ, Ivan. Aprovechamiento de Aguas Pluviales. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Universidad Politécnica de Catalunya. España. 2009. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7222/pfc%202009.058%20mem%C3%B2ria.pdf>

⁷ FAO. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2013. p 11-14

Ilustración 3. Sistemas de reutilización de aguas municipales, por campo de aplicación



Fuente. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Manual de captación y aprovechamiento del agua lluvia 2013 [consultado el 22 de mayo de 2020]. Disponible en <http://www.fao.org/3/ai128s/ai128s00.pdf>

En la actualidad, el aprovechamiento del agua lluvia se muestra como fuente potencial de agua en las ciudades de países en vías de desarrollo, donde debido a los problemas de escasez y sobrecarga de otras fuentes hídricas, esta opción ha venido presentando un mayor auge por ser una práctica muy interesante desde el punto de vista económico y ambiental⁸. Mediante estudios se ha evidenciado como los rendimientos y la rentabilidad de la producción agropecuaria puede mejorarse significativamente con la captación de agua de lluvia⁹. También, el aprovechamiento puntea como una gran opción como fuente de agua potable para poblaciones con difícil y visible limitación al acceso a este recurso, indispensable para las actividades diarias de las personas.

En contexto nacional, en Colombia las aguas pluviales urbanas actualmente son subutilizadas debido a que no se encuentran comprendidas como un recurso; simplemente se ha combatido la problemática de drenar las aguas pluviales a zonas aledañas de la ciudad, con la utilización de los cauces urbanos que han sido canalizados y el alcantarillado diseñado para recolectar toda el agua producto de la escorrentía superficial, originando en los sistemas hídricos la pérdida de la riqueza natural y su capacidad de respuesta ante las crecientes presentadas. Así mismo, por el aumento de las superficies impermeables en las ciudades, los sistemas de drenaje resultan ser incapaces para infiltrar los

⁸ HATT, B. E., Deletic, A. & Fletcher, T. D. (2006). Integrated treatment and recycling of stormwater: a review of Australian practice. *Journal of Environmental Management*. p 7

⁹ FAO. Manual de captación y aprovechamiento del agua lluvia, Experiencias América Latina. Santiago, Chile. 2000

volúmenes de agua circulantes, generando con mayor frecuencia las inundaciones¹⁰. Con el aumento de conciencia en las instituciones educativas y gubernamentales, se presentarán alternativas viables para el aprovechamiento gradual de estas aguas, por medio de diversos artículos han enfatizado en realizar una captación del agua lluvia para usos domésticos, destinado para limpieza de fachadas, para inodoros y/u orinales, entre otros.

En este proyecto se busca presentar alternativas de aprovechamiento de agua lluvia, que permitan abarcar esta problemática actual, así, favorecer y potencializar su óptimo uso en sectores productivos como el agropecuario, en el consumo humano o en la recarga de las fuentes subterráneas de extracción del recurso (pozos). En base a esto y mediante las referencias consultadas, fue posible plantear las etapas que conlleva este proceso. Por ende, se establecen cinco (5) etapas como las principales en el proceso, las cuales son: captación, transporte, tratamiento y almacenamiento o posterior distribución.

1.3.1 Captación de Agua Lluvia. La captación de agua de lluvia es considerada como la recolección de la escorrentía superficial para propósitos de producción agropecuaria y forestal¹¹. Existen distintos métodos de captación actualmente, la mayoría de las técnicas de captación de lluvia tienen un origen empírico, que han sido desarrolladas y perfeccionadas en los últimos 30 años gracias al aporte de diferentes instituciones y países¹². Hay una gran variedad de técnicas adaptadas a diferentes situaciones, las que cumplen diferentes finalidades. La FAO define la captación como la técnica capaz, individualmente o combinadas con otras, de aumentar la disponibilidad de agua para uso doméstico, animal o vegetal. Por lo general, son técnicas mejoradas de manejo de suelos, manejo de cultivos, la construcción y manejo de obras hidráulicas que permiten captar, derivar, conducir, almacenar y/o distribuir el agua de lluvia¹³.

En el siguiente diagrama se pueden evidenciar las opciones o modalidades de captación existentes, derivadas según su uso final doméstico, agrónomo o animal, las cuales pueden ser captadas por la escorrentía, pozos, techos u otras.

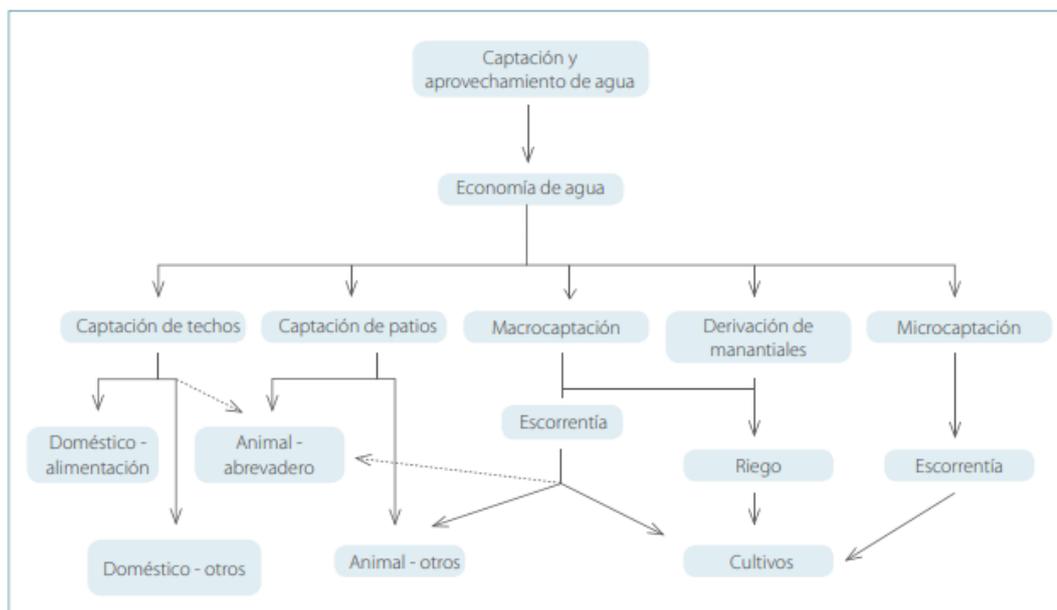
¹⁰ HERNÁNDEZ, J., Bayón, J., Fresno, D., Pérez, M., Jordana, J., Muñoz, F., et al. (2006). Construcción de pavimentos permeables para el control en origen de la escorrentía urbana: ejemplo práctico del aparcamiento del palacio de deportes de La Guía. Universidad de Cantabria, Universidad de Oviedo y Ayuntamiento de Gijón.

¹¹ VEENHUIZEN, Rene van. Manual captación y aprovechamiento de agua lluvias. Oficina Regional de la FAO para América Latina. Santiago, Chile. 2000

¹² SILVA, Maria S. L.; MENDONÇA, Cláudio E. S.; ANJOS, José B. dos; HONÓRIO, Antônio P. M.; SILVA, Aderaldo de S.; BRITO, Luiza T. de L. Barragem subterrânea: água para a produção de alimentos. Petrolina, 2007a, Cap. 6, p. 121-137.

¹³ FAO. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar de América Latina. Santiago, Chile. 2013. p 88

Ilustración 4. Modalidades de captación de agua según la finalidad de uso



Fuente: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Santiago, Chile. 2013. [consultado el 20 de mayo de 2020 Disponible en: [http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO _ Noticias/docs/captacion_ agua_de_ lluvia.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/captacion_agua_de_luvia.pdf)

En la captación del agua lluvia, por medio de la escorrentía superficial, que es el tipo de captación que se estudia en este proyecto, es la parte de la precipitación que no llega a penetrar el perfil de suelo, y, por consiguiente, puede circular libremente sobre la superficie del terreno. Las lluvias muy intensas producen escorrentía que puede ser aprovechada para diferentes usos (doméstico, animal, riego, etc.)¹⁴. Generalmente se busca aumentar la cantidad de agua lluvia recuperada disponible para el uso destinado de esta, siendo una estrategia contar con la presencia de una superficie inclinada preferiblemente, hacia la zona de recolección o transporte. Se puede presentar arrastre de contaminantes en forma de partículas sólidas de diversos tamaños los cuales deberán ser retenidos o separados posteriormente.

1.3.2 Transporte de Escorrentía. En esta etapa el agua lluvia de escorrentía tras ser captada en la superficie independientemente del método de recolección, se moviliza mediante tuberías, alcantarillado y/o canaletas dentro de un sistema de transporte hidráulico. Como se desarrolla este proyecto, el transporte de la escorrentía va de la mano con la captación, la cual se realiza en el sistema alcantarillado pluvial municipal del casco urbano de Tenjo, este cuenta con un sector de alcantarillado separado y otro, combinando el pluvial con el doméstico.

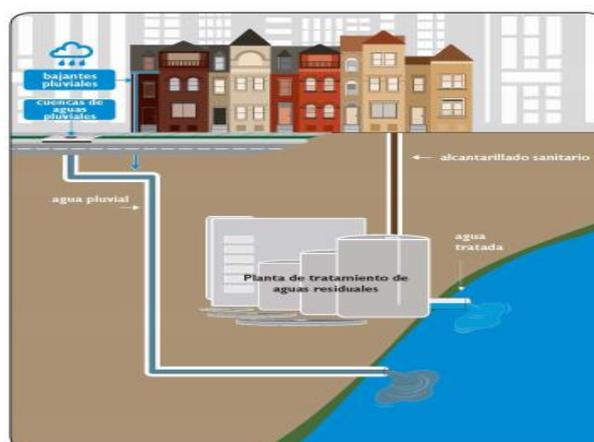
¹⁴ FAO. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar de América Latina. Santiago, Chile. 2013. p 15

Estos sistemas de alcantarillado poseen filtros, como lo son rejillas ubicadas en los sumideros, que cumple la función como un primer pretratamiento de la escorrentía, con la finalidad de eliminar contaminantes de gran tamaño evitando posibles taponamientos e incidentes a lo largo de la red de alcantarillado. El destino final de esta movilización hídrica es el tratamiento, almacenamiento y/o vertimiento¹⁵.

1.3.2.1 Alcantarillado separado. Los sistemas de alcantarillado separados son la primera opción tradicionalmente para el diseño y construcción de sistemas de recolección de aguas residuales y lluvias en el territorio nacional, utilizados para la recolección y el transporte de las aguas residuales y las aguas lluvias desde su generación hasta las plantas de tratamiento de las mismas o hasta los sitios de vertimiento.

En este sistema las aguas residuales y las aguas lluvias son recolectadas y evacuadas por sistemas totalmente independientes; en tal caso, el sistema separado de alcantarillado de aguas residuales usualmente se denomina alcantarillado de aguas residuales; y el sistema por el cual se recolectan y se transportan las aguas lluvias se denomina alcantarillado de aguas lluvias o pluvial¹⁶.

Ilustración 5. Representación sistema de alcantarillado separado



Fuente: CLEAN WATERWAYS. HEALTHY NEIGHBORHOODS [consultado el 13 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.njcleanwaterways.com/combined-sewers>

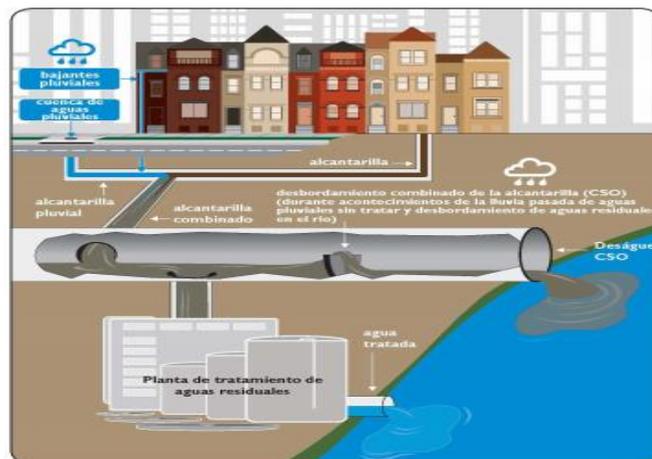
1.3.2.2 Alcantarillado combinado. Los sistemas de alcantarillado combinados son aquellos en los cuales tanto las aguas residuales como las aguas lluvias son

¹⁵ Norma OS.060. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Bogotá. Colombia. Disponible en: <http://ww3.vivienda.gob.pe/DGPRVU/docs/RNE/T%C3%ADtulo%20II%20Habilitaciones%20Urbanas/22%20OS.060%20DRENAJE%20PLUVIAL%20RBANO.pdf>

¹⁶ ACUEDUCTO. Plan maestro de acueducto y alcantarillado. Agua a alcantarillado de Bogotá. 2006. Disponible en: <https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/empresa/DocumentotecnicoDTS.pdf>

recolectadas y transportadas por el mismo sistema de tuberías. Tiene mayor aplicabilidad en aquellas localidades donde no existan condiciones que permitan el uso de otro tipo de sistemas y en áreas urbanas densamente pobladas, donde los volúmenes anuales drenados de aguas residuales son mayores que los de aguas lluvias o cuando resulte ser la mejor alternativa técnica, económica y ambiental, teniendo en cuenta consideraciones de tratamiento y disposición final de las aguas combinadas.¹⁷

Ilustración 6. Representación sistema de alcantarillado combinado



Fuente: CLEAN WATERWAYS. HEALTHY NEIGHBORHOODS [consultado el 13 de mayo de 2020]. Disponible en <https://www.njcleanwaterways.com/combined-sewers>

1.3.3 Tratamiento. Es la etapa posterior tras la captación y transporte, puede estar precedida de una etapa de almacenamiento y consta de la aplicación de diversos procesos fisicoquímicos necesarios para llevar la condición fisicoquímica del agua inicial a la condición requerida. Esta etapa se divide según los niveles de aplicación de los diversos procesos.

Tabla 1 Tipos de Tratamiento de Aguas

Tipos de tratamiento	
Primario	Cribado, Sedimentación, Neutralización y Flotación
Secundario	Aireación y Sedimentación secundaria
Terciario	Intercambio iónico, Adsorción, Ozonización, Electroquímica y Fotocatálisis.

Fuente: elaboración propia

¹⁷ MINVIVIENDA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. TÍTULO D. Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias. (2016). p. 10-14. Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf

1.3.3.1 Tratamiento primario. Este primer tratamiento consta en la reducción de los sólidos suspendidos del cuerpo acuoso mediante técnicas de carácter físico valiéndose del efecto de la gravedad. Esta etapa de tratamiento reduce considerablemente la presencia de contaminantes sólidos de diverso tamaño, pero no es muy eficaz en la eliminación de agentes microbiológicos.¹⁸ Los tratamientos puntuales que se enfocan en este cometido son:

a. Cribado: Se emplea con el objetivo de reducir el porcentaje de sólidos en suspensión de distintos tamaños mediante el paso del efluente a través de rejillas de diferentes tamaños, dependiendo la cantidad de estas, de la diversidad de tamaños en los sólidos presentes, con la finalidad de agrupar y extraer estos residuos, posteriormente, pueden disponerse en relleno sanitario o ser eliminados por incineración o por digestión anaerobia. El cribado tiene un bajo rango de efectividad ya que elimina del 5% al 25% de los sólidos en suspensión.

b. Sedimentación: Este proceso se utiliza para eliminar los sólidos suspendidos en el agua residual empleando la diferencia de peso específico de las partículas sólidas suspendidas en el efluente a tratar. Puede realizarse este proceso en una o varias etapas, continuas o discontinuas según el nivel de sólidos presentes. es un método que elimina del 40% al 60% de los residuos presentes¹⁹. Se puede aplicar este tratamiento manteniendo las propiedades físicas constantes como el tamaño, forma o peso específico de los sólidos presentes, o afectando estas propiedades agrupando partículas mediante un agente floculador, para esta modalidad de sedimentación se tiene en cuenta la velocidad de formación de los flocs, que dependerá de las propiedades físicas iniciales de los sólidos.

Según Jairo Romero se distinguen distintos momentos al aplicar la sedimentación según su propósito²⁰ siendo los siguientes:

- I. Sedimentación primaria:** Se remueven los sólidos sedimentables y los sólidos flotantes en aguas residuales crudas.
- II. Sedimentación intermedia:** Se remueven los sólidos de origen biológico preformados presentes en biorreactores filtrantes.

¹⁸ BAEZA, Jaime. Reutilización de aguas residuales para riego. Máster Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. Universidad de Alicante. España. año. p. 19. Disponible en: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/jaume-baeza.pdf>

¹⁹ RAMALHO, Rubens, Tratamiento de aguas residuales. Facultad de Ciencia e Ingeniería. Universidad Laval. Canadá. 1996. p 92-93

²⁰ ROMERO, Jairo, Teoría y principios de diseño. Facultad de Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingenieros. Colombia. 2000. P 631.

III. Sedimentación secundaria: Se remueven la biomasa y sólidos suspendidos de biorreactores que tratan con lodos activados.

IV. Sedimentación terciaria: Se remueven los sólidos suspendidos y floculados en plantas de tratamiento de aguas residuales.

c. Flotación: Este método se emplea para separar sólidos que no se pueden remover mediante sedimentación porque poseen una densidad aproximadamente igual a la del agua o relativamente inferior²¹, y el efecto gravitatorio no es eficaz. El proceso se basa en la inyección de un gas, aire generalmente, generando burbujas que se adhieren a los sólidos y los elevan a la superficie para lograr la separación o remoción de grasas, aceites y sólidos.

d. Neutralización: Es el proceso de ajuste de pH del agua por medio de adición de un ácido o una base dependiendo el pH objetivo y el pH inicial del efluente²². Este proceso se lleva a cabo antes de ser vertido en un medio receptor, un alcantarillado y antes de hacer un tratamiento químico o biológico. Los compuestos químicos empleados son específicos según el origen y el destino del agua a tratar. Suelen ser sales ácidas o bases fuertes que puedan afectar la seguridad de la operación.

1.3.3.2 Tratamiento secundario. El tratamiento secundario es el encargado de garantizar la descomposición y evacuación del material biológico en las aguas residuales²³. Este material puede poseer presencia de virus, bacterias, hongos, protozoos entre otros tipos de vida microscópica como también especies químicas orgánicas, es decir compuestos que pueden poseer carbono, oxígeno, azufre o nitrógeno etc. El tratamiento secundario se rige bajo procesos de naturaleza aerobia o anaerobia donde se busca degradar activamente estos residuos hasta lograr acumularlos como sólidos suspendidos siendo fácilmente extraíbles pudiéndolos regresar a recursos hídricos, o extraerlos para uso posterior como lodos activos en otro tipo de procesos. Al igual que el tratamiento primario, éste tiene varios procesos, los cuales son:

a. Aireación: Consiste en el abastecimiento progresivo de oxígeno para que las bacterias aerobias presentes en el agua residual, descompongan los residuos orgánicos. El material resultante se acumula al fondo del tanque o contenedor denominándose lodo activado. Posteriormente se decanta el biomaterial en

²¹ GUNT HAMBURG. Tratamiento de aguas, procesos mecánicos (2014). p.1. Disponible en: https://www.gunt.de/images/download/flotation_sedimentation_spanish.pdf

²² UNIVERSIDAD DE CORUÑA. Fichas técnicas de etapas de procesos de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. 2014. p. 2,3. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Neutralizaci%C3%B3n.pdf/e7996c1d-1265-54c0-07d8-c0a79ce2cd91>

²³ BERNARDO SERVÍN MASSIEU, Tratamiento de aguas residuales.2008 [sitio web]. Ciudad de México. Disponible en: <http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000057-b3f9cb4e88/residual.es.pdf>

forma de lodo. El proceso puede variar en la forma de aplicación de aire sea mediante una turbina a motor, que al girar oxigena el efluente, o un sistema inyector de aire de manera dispersa, focalizada y/o superficial.²⁴

b. Sedimentación Secundaria: Este método, al igual que el anterior, consiste en la descomposición del material articulado empleando bacterias y microorganismos y generalmente se aplica junto a la aireación. La sedimentación secundaria es una operación formadora de flóculos permitiendo su asentamiento donde las impurezas serán retiradas y acumuladas en el lodo para ser degradadas más fácilmente²⁵. Este proceso posee eficiencias a su salida del 90% aproximadamente, siendo el fluente claro y muy bajo en contenido orgánico.

1.3.3.3 Tratamiento terciario. El tratamiento terciario de las aguas residuales puede ser entendido como cualquier práctica adicional a los procesos biológicos secundarios, cuyo objetivo es el de eliminar contaminantes orgánicos no biodegradables, organismos patógenos y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo²⁶. Este es el tratamiento más completo comparado con los dos anteriores, pero posee métodos de altos costos de operación que no son muy usados. Este tratamiento hace énfasis en la depuración de la carga orgánica residual y también a aquellos residuos que no fueron retirados exitosamente en los anteriores tratamientos. Este tratamiento es de carácter fisicoquímico. Los procesos que hacen parte del tratamiento terciario son:

a. Intercambio iónico: Es una operación en la que se utilizan resinas de intercambio iónico, éstas son capaces de retener los iones disueltos en el agua para luego cederlos a otra fuente logrando depurar el agua a altos niveles de pureza. La aplicación habitual de estos sistemas, es, por ejemplo, la eliminación de sales cuando se encuentran en bajas concentraciones. Estos intercambiadores de iones son sólidos insolubles o líquidos inmiscibles, que poseen cationes o aniones susceptibles a un cambio reversible y estequiométricamente con los iones del mismo signo presentes en soluciones de electrolitos, con los cuales son puestos en contacto²⁷.

²⁴ BELZONA. Tratamiento de aguas residuales, Mapa de la plata. 2010. p.19. Disponible en: https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf

²⁵ USAID. Guía de referencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en centro América. Estados Unidos. p 19. Disponible en: https://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo= odoc_73992_1_23102012.pdf

²⁶ LOZANO, William. Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. Bogotá, Colombia. p 132

²⁷ PAUER, Ricardo. Generalidades sobre el intercambio iónico. Conceptos introductorios. Seminario de Agua y Energía. Rosario 1990. Disponible en: http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/02_Generalidades_sobre_el.pdf

b. Adsorción: Este proceso se basa en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido, este proceso se usa para eliminar compuestos orgánicos y para mejorar factores sensoriales del agua (olor, color, sabor). Este proceso es común por usar el carbón activado como adsorbente, sin embargo, hay diversas aplicaciones de este método con adsorbentes de origen natural. El concepto de este proceso corresponde a la transferencia de una molécula de la fase líquida hacia la fase sólida. Este fenómeno obedece a las leyes de equilibrio entre la concentración en fase líquida y la fase sólida del soluto, sobre la superficie del material adsorbente²⁸.

c. Ozonización: Es una tecnología avanzada de oxidación, donde el ozono mejora la biodegradabilidad de los residuos haciendo más fácil el tratamiento biológico convencional. Utilizar el método de ozonización, aunque es efectivo para disminuir los impactos ambientales, no es tan común usarlo debido a sus altos costos. La oxidación directa de la pared celular constituye su principal modo de acción, por lo cual, el ozono es eficaz para eliminar bacterias, virus, protozoos, nemátodos, hongos, agregados celulares, esporas y quistes. Por otra parte, actúa a menor concentración y con menor tiempo de contacto que otros desinfectantes como el cloro, dióxido de cloro y mono cloraminas²⁹.

d. Electroquímica: Este proceso requiere electricidad para producir una reacción química que ayudará a la eliminación y/o destrucción del contaminante. El sistema está compuesto por un ánodo (oxidación) y un cátodo (reducción). En el área del tratamiento de las aguas residuales, por ejemplo, la electrocoagulación ha demostrado ser altamente efectiva en la eliminación de coloides, ayudando a la reducción de la DQO, eliminación de sales (amonio, sulfatos, fosfatos), eliminación de PCBs, cianuros, nitritos, fenoles, tensioactivos, tintes y colorantes, eliminación de grasas, aceites y emulsiones, electro-deposición de metales pesados (Zn, Pb, Ni, Cr) y, más recientemente, eliminación de contaminantes emergentes³⁰.

²⁸ CYTED. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. Disponible en: http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

²⁹ CosemarOzono. Tratamiento con Ozono. Recuperación de aguas residuales. Disponible en: https://www.cosemarozono.com/descargas/recuperacion_aguas_residuales.pdf

³⁰ MOYA, María José. Tecnologías electroquímicas en tratamiento de aguas: Electrocoagulación. Módulo 3. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/86621/1/Tema-TECNOLOGIAS-ELECTROQUIMICAS.pdf>

e. Fotocatálisis: La fotocatálisis emplea radiación UV y/o visible (luz solar en algunos catalizadores) como fuerza motriz de tratamiento de aguas. Este proceso causa la aceleración de una reacción fotoquímica mediante la presencia de un catalizador, se da lugar a la eliminación de materia orgánica y metales pesados disueltos en el agua residual. Dentro de la fotocatálisis se tienen dos tipos de técnicas: procesos heterogéneos (semiconductor) y los procesos homogéneos (catalizador disuelto). La fotocatálisis se aplica cuando se requiere el uso de un catalizador que absorbe la energía radiante y acelere la oxidación de la energía solar que llega a la superficie terrestre²⁴.

2. DIAGNÓSTICO DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DEL AGUA LLUVIA

El diagnóstico consiste en realizar una recolección de datos de ciertos parámetros físicoquímicos de muestras previamente identificadas para su posterior análisis e interpretación, con el fin, de determinar una estandarización de aquellos parámetros físicoquímicos seleccionados. Este ejercicio permite identificar patrones que permitan normalizar el proceso posterior de tratamiento, teniendo una referencia sólida acerca del comportamiento de estos parámetros por medio de la estandarización, para ello, se requiere de una adecuada práctica de muestreos en condiciones similares y así, no presentar una alta dispersión en los resultados.

Una parte esencial en el trabajo de estandarización de un proceso en específico, es el análisis de los datos obtenidos, esto se realiza mediante algunas herramientas estadísticas que permiten evaluar e identificar los patrones representativos de las muestras adquiridas y lograr así, una estandarización veraz y sólida que permitan una adecuada utilización de estos datos.

2.1 SELECCIÓN PUNTOS ESTRATÉGICOS DE MUESTREO

La selección de los puntos de muestreos representativos inició con la delimitación espacial del proyecto, la cual representa el casco urbano en el municipio de Tenjo, dado la existencia del sistema de alcantarillado pluvial. En base al proyecto Juan Gerena y Mónica Mora³¹, donde evaluaron los parámetros físicoquímicos del agua lluvia de escorrentía, en tres puntos de diferentes sectores, el industrial, el residencial y zonas de parqueo; de igual modo, determinaban la incidencia de los suelos de estos sectores hacia un sistema de drenaje urbano sostenible en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Para ello, se establecieron puntos específicos de muestreos, los cuales presentaban propiedades importantes en cuanto a sus parámetros físicoquímicos previamente seleccionados a determinar y, asociados a las actividades presentes en los tres sectores evaluado. Por medio de esto, es posible establecer una caracterización representativa del agua lluvia de escorrentía, cuando se presenta el fenómeno de primer lavado en los sectores analizados.

³¹ GERENA, Juan David. MORA Mónica Viviana. Evaluación de parámetros Físicoquímicos en agua lluvia de escorrentía en tres puntos con tipos de suelos industrial, residencial y vehicular en Bogotá con protección a sistemas urbanos de drenaje sostenible. Universidad Santo Tomás de Aquino. Facultad de Ingeniería Ambiental. Bogotá. 2017.

La adaptación hacia el presente proyecto, se basa principalmente en la selección e identificación de tres (3) puntos estratégicos de muestreo que tengan acceso al sistema de alcantarillado, dado que este es el método de captación planteado en el proyecto. Estos puntos deben evidenciar factores de alta incidencia en su ubicación que decanten en su elección, dado que estos puntos pudieran presentar los parámetros fisicoquímicos más críticos y así, obtener un diagnóstico representativo de la escorrentía en el casco urbano del municipio de Tenjo.

2.1.1 Factores de incidencia en la selección de puntos de muestreo. La importancia de identificar criterios de selección, que marquen una relevancia notoria en el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del agua lluvia será clave para elaborar un diagnóstico³². En base en esto, se lograron identificar cuatro (4) factores que presentaban una gran incidencia a la hora de realizar una adecuada selección estratégica y representativa de los puntos de muestreo y posterior captación del agua lluvia en el casco urbano del municipio de Tenjo. Los factores identificados que representan alta importancia son los siguientes:

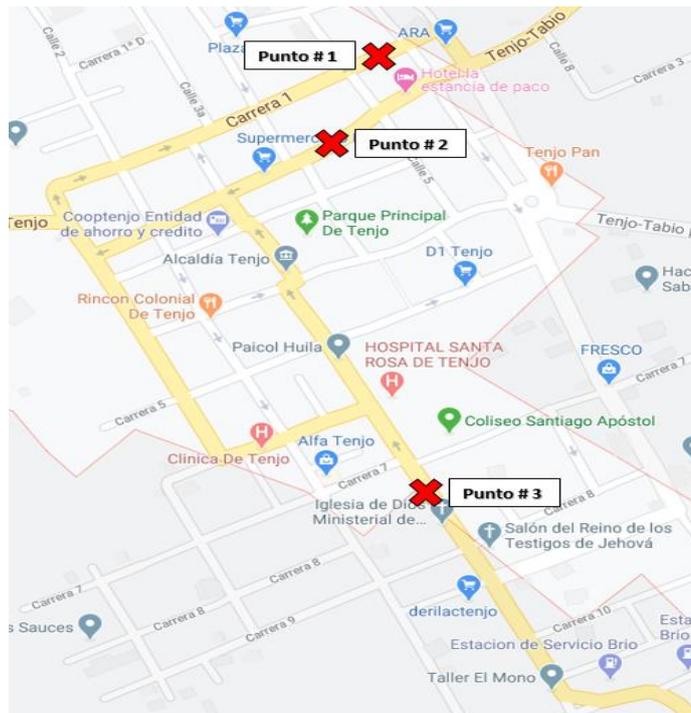
- I. Alto flujo vehicular y peatonal
- II. Presencia de zonas de parqueo vehicular.
- III. Caudal de escorrentía alto (según perfil de vías).
- IV. Disponibilidad de vertederos a la red de alcantarillado.

El cumplimiento de estos cuatro factores en cada uno de los diferentes puntos de captación de muestras de agua lluvia seleccionados, permitieron que las muestras captadas en los puntos presenten los parámetros fisicoquímicos más críticos, con los picos más altos de contaminación orgánica e inorgánica y, un alto contenido de compuestos indeseados, haciendo que su posterior análisis sea más concluyente a la hora de seleccionar el tratamiento adecuado para lograr un recurso apto para su aprovechamiento en ámbito doméstico, agropecuario o recarga a fuentes subterráneas.

2.1.2 Descripción de Puntos de muestreo. Como se mencionó anteriormente, fue necesario identificar y seleccionar tres (3) puntos de muestreos en una ubicación estratégica, con la finalidad de obtener una caracterización representativa del agua lluvia en el casco urbano del municipio de Tenjo. Relacionando lo anterior, con los cuatro factores de incidencia expuestos, se logró realizar la selección de los puntos de muestreo que están conectados directamente a la red de alcantarillado municipal y que está dispuesta para el vertimiento del agua lluvia de escorrentía en el sistema, que son los siguientes:

³² GOONETILLEKE, A, THOMAS, E & GILBERT, D. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. Journal of Environmental Management, vol. 74. p. 31-42, 2005.

Ilustración 7. Ubicación espacial de los tres puntos de muestreo



Fuente: Google Maps. [Consultado el 10 de febrero de 2020]. Disponible en <https://www.google.es/maps/place/Tenjo+Bogot%C3%A1,+Cundinamarca/@4.8704678,-74.1448814,16.75z/data=!4m5!3m4!1s0x8e3f80d>

La descripción detallada de los tres (3) puntos de muestreo seleccionados siguiendo los aspectos identificados en los antecedentes, se especifica a continuación, identificando las características demográficas que permitieron su adecuada elección, al igual, que permite demostrar que se cumplen los criterios de incidencia que se establecieron en los incisos anteriores.

A. Punto de muestreo Número 1

- Vertedero ubicado entre la carrera 1 y las calles 5 y 6 del casco urbano.
- Zona principalmente comercial y parcialmente residencial, por lo cual presenta un alto flujo peatonal y vehicular durante gran parte del día.
- Vía principal que conduce hacia municipio vecinos de la sabana de Bogotá, como Tabio, Cajicá y Chía. Además, es una ruta importante que permite retornar hacia el centro del pueblo. Alto flujo de transporte público y vehículos de carga.
- Presenta zonas de parqueo de automóviles y motocicletas, debido a que es zona comercial, y tiene presencia de taller de motocicletas y ferretería.
- Su perfil favorece el alto flujo de escorrentía, al igual, que conecta con vías perpendiculares contiguas con un desnivel más pronunciado que arrastran gran flujo de agua lluvia.

B. Punto de muestreo Número 2

- Vertedero ubicado entre la carrera 2 y las calles 4 y 5 del casco urbano.
- Zona netamente comercial, por lo cual presenta un alto flujo peatonal y vehicular durante gran parte del día.
- Vía principal central que atraviesa el casco urbano completamente de oriente a occidente. Vía contigua a calzadas de entrada y salida del casco urbano y ruta directa hacia el Parque principal municipal. Presenta alto flujo de transporte público y vehículos de carga.
- Presenta zonas de parqueo de automóviles y motocicletas, debido a su gran zona comercial, tiene presencia supermercados, restaurantes y centros comerciales.
- Su perfil favorece el alto flujo de esorrentía, al igual, que conecta con vías perpendiculares contiguas con un desnivel más pronunciado que arrastran gran flujo de agua lluvia.

Punto de muestreo Número 3

- Vertedero ubicado entre la calle 3 y las carreras 7 y 8 del casco urbano.
- Zona principalmente residencial y parcialmente comercial, por lo cual presenta un alto flujo peatonal y vehicular durante gran parte del día.
- Calle principal central que atraviesa gran porcentaje del casco urbano de norte a sur. Vía principal de entrada y salida del casco urbano hacia Bogotá y ruta directa hacia el Parque principal y Hospital municipal. Presenta alto flujo de transporte público y vehículos de carga.
- Limita con sitios de esparcimiento como el polideportivo, canchas múltiples, también con conjuntos residenciales, restaurantes y supermercados.
- Su perfil favorece el alto flujo de esorrentía, al igual, que conecta con vías perpendiculares contiguas con un desnivel más pronunciado que arrastran gran flujo de agua lluvia.

2.2 DETERMINACIÓN NUMERO DE MUESTREOS

Para estimar un numero de muestras que permita obtener una caracterización representativa del agua lluvia en casco urbano del municipio de Tenjo, se empleó la fórmula del tamaño de la muestra para poblaciones infinitas, ya que no es posible determinar el número exacto de elementos que componen el universo a analizar, y donde suponemos que los elementos escogidos, independientemente de su número, son representativos de toda la población³³. La ecuación que representa el muestreo para poblaciones infinitas es:

³³ UPB. Determinación del tamaño muestra mediante el uso de árboles de decisión. Universidad Privado Boliviana. Investigación & Desarrollo. 2011

Ecuación 1. Numero de muestras poblaciones infinitas

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2}$$

Fuente: UNIVERSIDAD PRIVADO BOLIVARIANA. Determinación del tamaño muestra mediante el uso de árboles de decisión. Investigación & Desarrollo., 2011. [Consultado el 20 de marzo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/315138192_DETERMINACION_DEL_TAMANO_MUESTRAL_MEDIANTE_EL_USO_DE_ARBOLES_DE_DECISION

, dónde: **n** representa el número de muestras, **Z** representa un valor asociado al nivel de confianza, **p** probabilidad de éxito, o proporción esperada, **q** la probabilidad de fracaso, y **e** precisión (error máximo aceptable).

Para este caso de estudio, se consideró un nivel de confianza del 85%, lo que representa que el error máximo aceptable es 15%, dado que se expresa como **1- α** (nivel de confianza). Con el nivel de confianza y el error máximo establecidos, por medio de las tablas de distribución normal [ANEXO G], donde se obtiene un valor de Z igual a 1,01. Por otro lado, precisar la probabilidad de éxito y de fracaso del muestreo es difícil por el desconocimiento poblacional de los parámetros a medir; por ende, es recomendable asumir un valor del 50% para cada probabilidad.

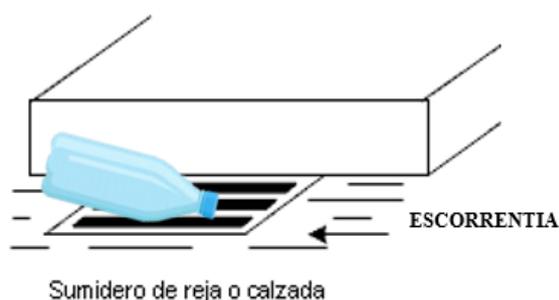
Sustituyendo valores analizados anteriormente en la ecuación 1, se determinó que el número de muestreos necesarios para realizar el diagnóstico del agua lluvia de escorrentía es **$n \approx 11$**

2.3 CAPTACIÓN DE MUESTRAS EN PUNTOS SELECCIONADOS

Partiendo de los tres (3) puntos de muestreo ya seleccionados, se identificó la alternativa de captación donde la composición de la recolección de muestras (escorrentía) se asemejará lo mayor posible al fluido que circula a través del sistema de alcantarillado pluvial. Esto se refiere más precisamente al paso anterior de la circulación, es decir, el punto de alimentación hacia la red de alcantarillado, definidos como sumideros de reja, los cuales normalmente se encuentran ubicados hacia los costados de las vías o calzadas, y cumplen estrictamente la función de dar acceso de la escorrentía hacia el sistema de alcantarillado.

Como lo especifica Carlos Severiche (2013), en el manual de Métodos analíticos para la determinación de Parámetros fisicoquímicos básicos en aguas³⁴, se requiere de un recipiente plástico o de vidrio para la captación y conservación de la muestra. Por ende, la recolección de las muestras se realizó en un recipiente plástico con aforo de 2 litros de capacidad, purgado previamente tres veces con la misma muestra, antes de recoger la cantidad de muestra final, a la cual se le analizaron sus parámetros fisicoquímicos para la estandarización del agua lluvia. La representación gráfica de la metodología de captación de muestras en los tres puntos de muestreo se muestra en la siguiente figura:

Ilustración 8. Representación de la captación en puntos de muestreo



Fuente: elaboración propia

La etapa de captación en los diferentes tres puntos de muestreo seleccionados, se determinó que se realizaría durante un periodo de tiempo no superior a 20 minutos de inicio de las precipitaciones, esto debido a que durante ese intervalo de tiempo, se presenta el fenómeno hidrológico de **“primer lavado”** y es allí, donde la escorrentía arrastra agua lluvia con concentraciones de contaminantes altas³⁵ hacia un cuerpo receptor, lo cual permitió obtener la muestra que disponían de los parámetros fisicoquímicos más críticos presentados durante las precipitaciones.

2.4 MÉTODO DE PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA

Para definir el método en que las diferentes muestras captadas fueron conservadas para garantizar un resultado confiable del análisis fisicoquímico de parámetros anteriormente mencionados, es necesario establecer una selección de guías o manuales de técnicas analíticas para parámetros específicos de la caracterización del agua lluvia. Basado en esto, el manual de Carlos Severiche

³⁴ SEREVICHE, Carlos Alberto. CASTILLO, Marlon Enrique. ACEVEDO, Rosa Leonor. Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas. Cartagena de Indias. Colombia. 2017. Disponible en Internet: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf>

³⁵ LEE, J. H, BANG, L. H. KETCHUM, J. First flush analysis of urban storm runoff. Science of the Total Environment, vol. 293, pp. 163-175, 2002.

(2013) y la guía metodológica del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR)³⁶ establecen factores importantes a tener en cuenta, como el tiempo y condiciones de preservación de muestras, al igual que, sugiere la técnica o método de determinación del parámetro físicoquímicos seleccionado para la caracterización del agua lluvia en el casco urbano del municipio de Tenjo.

La compilación de la información sobre preservación y custodia de las muestras, en base a estos documentos mencionados y referenciándolo al proyecto, se muestra es la siguiente tabla.

Tabla 2. Determinación de tiempo y método de conservación de la muestra.

Parámetro	Tiempo conservación	Tipo de recipiente	Preservación	Técnica / Método
pH	6 horas	-	-	Potenciómetro
Conductividad	24 horas	-	-	Potenciómetro
Sólidos Suspendidos	7 días	P-V	Refrigerar entre 2 - 5 °C	Gravimetría
Sólidos Totales (ST)	7 días	P-V	Refrigerar entre 2 - 5 °C	Gravimetría
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	7 días	P-V	Refrigerar entre 2 - 5 °C	Reflujo abierto con Dicromato
Alcalinidad	48 horas	P-V	Refrigerar entre 2 - 5 °C	Volumetría
Turbidez	48 horas	P-V	Refrigerar entre 2 - 5 °C	Turbidímetro
Dureza Total	6 meses	P-V	-	Título métrico
Aceites y Grasas	28 días	V	HCl pH < 2 + Refrigerar	Extracción y Gravimetría
Hidrocarburos disueltos	90 días	P-V	Refrigerar entre 2 - 5 °C	Detector Ionizado de Llama o Espectrofourometro
Metales	90 días	P-V	HNO3 pH < 2 + Refrigerar	Espectroscopio de absorción atómica (EAA)

Fuente: elaboración propia

Como lo aseguran los documentos, el superar el tiempo o modificar las condiciones de preservación puede alterar notablemente la veracidad de los resultados obtenidos. Por ende, se establece que parámetros como pH y conductividad son necesario de determinar *in situ*, dado que su tiempo de conservación es muy corto para llevar las muestras hacia el laboratorio, además, que no requiere de equipos fijos, lo que facilita su medición en el lugar de la captación.

³⁶ VIVES DE ANDREIS, José Benito. Manual de Técnicas analíticas para la determinación de parámetros físicoquímicos y contaminantes marinos. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Santa Marta. Colombia. 2003. Disponible en Internet: <http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/7010manualTecnicasanaliticas.pdf>

Dentro de la determinación de metales, se estableció un total de tres (3) metales de alto impacto, en términos de contaminación, toxicidad y aporte para la opción de tratamiento seleccionada. La disposición de tiempo y condiciones de conservación, para los cinco metales seleccionados es equivalente para todos.

2.5 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS AGUA LLUVIA A ANALIZAR

En el ámbito ambiental, los parámetros fisicoquímicos son valores de algunas propiedades del agua que indican su estado actual determinando su calidad, posible uso, efecto en la salud humana o animal, o posible afectación al medio ambiente. A continuación, se describen varios parámetros:

2.5.1 Potencial de Hidrógeno (pH). Esta propiedad determina el nivel de alcalinidad o acidez del agua, teniendo rangos de 0 a 7 para medio ácido, neutro con un valor de 7,0 y básico 7,0-14. El pH es definido como $-\log[H^+]$. Prácticamente todas las fases del suministro de agua y tratamiento de agua residual como neutralización ácido-base, agua blanda, precipitación, coagulación, desinfección y control de corrosión dependen del pH³⁷.

El pH para las muestras de los tres puntos seleccionados anteriormente se midió in situ, como lo estipula el manual de toma de muestra desarrollado por el Instituto Nacional de Salud³⁸, mediante un potenciómetro Hanna PHPE4 calibrado apropiadamente, dando resultados neutros o levemente ácidos.

Ilustración 9. Potenciómetro Hanna PHPE4



Fuente: elaboración propia

2.5.2 Conductividad eléctrica. La conductividad es la propiedad que presentan las soluciones para conducir el flujo de la corriente eléctrica y depende de la presencia de iones, su concentración y la temperatura de medición. El agua

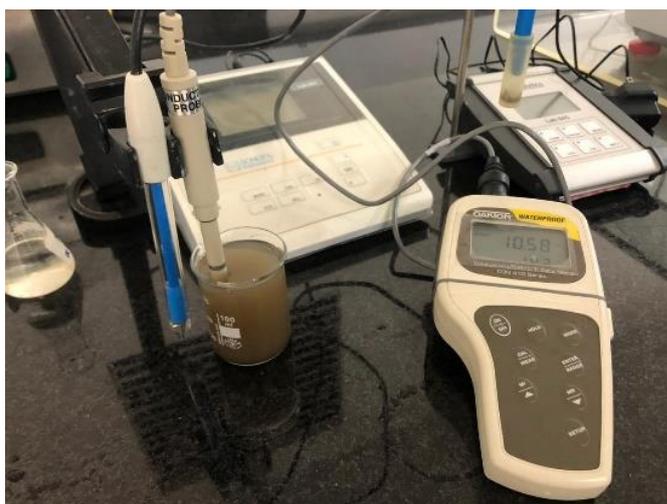
³⁷ INS. Instituto Nacional de Salud. Manual de métodos fisicoquímicos básicos para el análisis de aguas para el consumo humano. Subdirección Red Nacional de Laboratorios. Bogotá, Colombia. 2011. p 39

³⁸ INS. Programa de vigilancia por Laboratorio de la calidad de Agua para consumo humano. Grupo Salud Ambiental "Jaime Eduardo Ortiz". Bogotá, Colombia. 2011. p 46

destilada y fresca tiene una conductividad de 0,5 a 2 microhmios/Cm., incrementándose después de unas cuantas semanas de almacenamiento, debido a la absorción de CO₂ de la atmósfera. La conductividad del agua potable en las unidades SI, tiene un rango de 50 a 1500 microhmios³⁹.

Este parámetro se registró en el laboratorio de la Universidad de América tras 18 horas de recolección de muestras en los tres puntos seleccionados, empleando un equipo OAKLON calibrado previamente, los resultados poseen variaciones leves.

Ilustración 10. Conductímetro



Fuente: elaboración propia

2.5.3 Sólidos suspendidos totales (SST). Los sólidos suspendidos están constituidos por la materia suspendida cuyo origen proviene de diversos tipos, de fuente orgánica o inorgánica los cuales van desde la arcilla hasta basuras que es retenida sobre un filtro de fibra de vidrio, cuando se ha pasado una muestra de agua residual previamente agitada. Por esto la determinación de los sólidos suspendidos es de gran valor en el análisis de aguas contaminadas; siendo considerado como uno de los mejores parámetros usados para evaluar la contaminación de las aguas residuales domésticas y determinar la eficiencia de las plantas de tratamiento³⁹.

Se empleó el método gravimétrico para determinar sólidos suspendidos, el cual consta de una operación de filtración con agua procedente del muestreo a través de un embudo equipado con papel filtro. Se acelera el movimiento del agua muestra adicionando agua destilada. Los sólidos suspendidos quedarán en el papel filtro para proceder a operación de secado a una temperatura entre 103 y

³⁹ GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p 10-12, 20-25

105 °C. Posteriormente se pesará el papel filtro seco con los residuos. Se aplica la siguiente ecuación para su determinación:

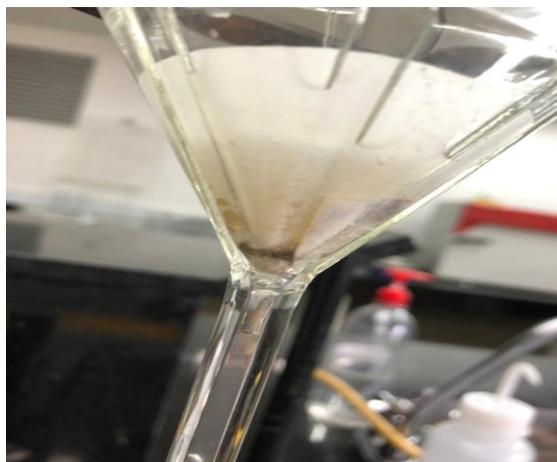
Ecuación 2. Cálculo de Sólidos Suspendidos Totales

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V}$$

Fuente: UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guías de laboratorio. Características físicas y químicas fundamentales del agua. *Ver anexo A

Donde **m_2** corresponde al peso del papel filtro con el residuo secado, **m_1** el peso del papel antes del proceso y **V** el volumen empleado de muestra.

Ilustración 11: Filtración para medición de sólidos suspendidos



Fuente: elaboración propia

2.5.4 Sólidos totales (ST). Es el residuo que queda después de la evaporación y el secado a una temperatura definida. Está integrada por la materia tanto orgánica como inorgánica que se encuentra en el agua residual; la cantidad de sólidos presentes en el agua residual indicará qué tratamiento es necesario para remover dichos contaminantes⁴⁰.

Para la medición de los sólidos totales en la muestra se inició con un proceso de secado en mufla a 550 °C en capsulas de porcelana para asegurar su peso libre de agua, prosiguiendo a evaporar 100 ml de muestra en plancha a una temperatura entre 103 y 105 °C para luego pesar finalmente y así, obtener el peso neto de los sólidos totales presentes en la muestra de agua lluvia. Para la determinación se emplea la siguiente ecuación:

⁴⁰ GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p 20

Ecuación 3. Cálculos de Sólidos totales

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V}$$

Fuente: Fuente: UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guías de laboratorio. Características físicas y químicas fundamentales del agua. *Ver anexo A

Donde m_2 corresponde al peso de la capsula más el residuo tras el secado en plancha, m_1 el peso de la capsula recién adecuada y V el volumen empleado de muestra.

2.5.5 Sólidos Sedimentables (SS). Hacen parte tanto de los sólidos disueltos como de los suspendidos, y son la cantidad de sólidos que se pueden juntar y sedimentar en un determinado periodo de tiempo. Indican que porcentaje de los sólidos totales se puede extraer de manera física facilitando la posterior escogencia para otros tratamientos requeridos. Las partículas sólidas presentes en un agua, puede sedimentarse debido a su densidad o pueden permanecer flotando en ella⁴¹.

La medición de este parámetro consto de un proceso de sedimentación a lo largo de un tiempo en reposo de una hora, para 1L de muestra en el cono Imhoff acoplado a un soporte universal, agitando vigorosamente tras 45 minutos de reposo. Los niveles de sólidos sedimentables obtenidos fueron bajos.

Ilustración 12. Sedimentación en cono Imhoff



Fuente: elaboración propia

⁴¹ GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p 24

2.5.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO). Es una medida del oxígeno equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible a oxidación por un oxidante químico fuerte. La oxidación bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura y tiempo, transforma la materia orgánica en dióxido de carbono y agua. Cuantifica la cantidad de contaminantes oxidados por medios químicos en un cuerpo acuoso. Este parámetro es bastamente afectado por la presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas⁴².

La medición de la demanda química de oxígeno se realizó mediante la técnica de reflujo abierto, esta consiste en la reacción del ácido sulfúrico H₂SO₄ y el dicromato de potasio K₂Cr₂O₇ que en medio ácido, oxidando la mayoría de sustancias orgánicas e inorgánica. El procedimiento consistió en la adición de H₂SO₄ y K₂Cr₂O₇ a la muestra. Se acopla posteriormente al condensador y se conserva la temperatura con reflujo de agua fría mediante 2 horas. Se diluyo la muestra en agua destilada y a temperatura ambiente se ejerció una titulación con SAF o sulfato de amonio ferroso con indicador ferroina hasta lograr un cambio de azul a café rojizo. Se repite el procedimiento con un blanco experimental de solo agua destilada para aplicar esta ecuación:

Ecuación 4. Cálculo de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

$$DQO \left(\frac{mgO_2}{L} \right) = \frac{(A - B) \cdot M \cdot 8000}{V} * f$$

Fuente: Fuente: UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guías de laboratorio. Características físicas y químicas fundamentales del agua. *Ver anexo A

Donde **A** es el volumen de SAF usado en el blanco, **B** el volumen de SAF usado en la muestra, **M** la molaridad del SAF, **V** el volumen de muestra y **f** el factor de solución del SAF.

2.5.7 Alcalinidad. La alcalinidad de un agua es su capacidad para neutralizar ácidos. Mayormente, en los recursos acuíferos naturales es causado por las sales de bicarbonato disueltos, que se forma por la acción del CO₂ sobre los materiales básicos. Otras sales débiles como Silicatos, Fosfatos, Boratos, también pueden contribuir en pequeñas cantidades a la alcalinidad, al igual que, algunos ácidos orgánicos pocos resistentes a la oxidación biológica forman sales que aumentan la alcalinidad en las aguas contaminadas y en estado anaerobio. Aunque son muchos los materiales que pueden contribuir a la alcalinidad, en

⁴² GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p, 150-151.

aguas naturales o tratadas; esta es primariamente una función del contenido de Carbonatos, Bicarbonatos e Hidróxidos⁴³.

Para este procedimiento se titula la muestra de agua con H₂SO₄ con fenolftaleína como indicador, desde un color transparente hasta un viraje de color rosa púrpura. El valor de alcalinidad presente se determina aplicando la siguiente fórmula:

Ecuación 5. Cálculo de Alcalinidad

$$\text{Alcalinidad} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(A) \cdot M \cdot 5000}{V}$$

Fuente: UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guías de laboratorio. Características físicas y químicas fundamentales del agua. *Ver anexo A

Donde **A** es el volumen consumido de H₂SO₄, **M** la molaridad de H₂SO₄ y **V** el volumen de muestra empleado.

2.5.8 Turbidez. La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que la solución se disperse y absorba en lugar de transmitirse en línea recta a través de la muestra. El método está basado en una comparación de la intensidad de la luz desviada por la muestra bajo condiciones definidas, frente a la luz desviada por una suspensión estándar de referencia, bajo las mismas condiciones. A mayor intensidad de la luz desviada mayor será la turbidez. La turbidez en el agua es causada principalmente por materiales en suspensión tales como arcilla, lodos, materia orgánica o inorgánica finamente disueltos, compuestos orgánicos coloreados y otros microorganismos⁴³.

Este parámetro se registró usando un turbidímetro (modelo), el cual se calibró con soluciones de turbidez de 0,01, 10 y 1000 NTU. Los resultados fueron consistentes.

⁴³ GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p, 30-31

Ilustración 13. Turbidímetro



Fuente: elaboración propia

2.5.9 Dureza total. La dureza total del agua se define como la suma de las concentraciones de los iones de calcio y magnesio. Químicamente la dureza del agua es una propiedad causada por la presencia de cationes metálicos polivalentes y se manifiesta por su reacción con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones para formar incrustaciones. Los principales iones causantes de la dureza son el calcio Ca y el magnesio, Mg. Los iones hierro, Fe y aluminio, Al se consideran también causantes de dureza, pero su solubilidad al pH del agua natural es tan limitada, que sus concentraciones se consideran despreciables. La dureza del agua se origina por contacto de agua con el suelo de formación rocosa y en áreas donde la capa del suelo es gruesa y hay calizas presentes, por lo que refleja la naturaleza de las formaciones geológicas con las que ha tenido contacto⁴⁴.

La determinación de la dureza fue realizada mediante un método título métrico que consistió en una titulación de la muestra, acidificada previamente a pH 2 con HNO₃, donde se llevó a pH 10 la muestra con solución buffer y se tituló con Na₂EDTA con negro de eriocromo como indicador. La titulación se completaba cuando el color viraba de rojo vino a azul oscuro. Este proceso se replicó con agua destilada como blanco analítico para satisfacer la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Cálculo de la Dureza

$$Dureza \left(\frac{mgCaCO_3}{L} \right) = \frac{(A - B).M.100000}{V}$$

Fuente: UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Guías de laboratorio. Características físicas y químicas fundamentales del agua. *Ver anexo A

⁴⁴ GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p 36-37

, donde **A** es el volumen de Na₂EDTA usado en la muestra, **B** el volumen de Na₂EDTA usado en el blanco, **M** la molaridad del Na₂EDTA, y **V** el volumen de muestra.

Ilustración 14. Titulación con Na₂EDTA y negro de Eriocromo



Fuente: elaboración propia

2.5.10 Aceites y Grasas. El término de grasas y aceites incluye aquellas sustancias de carbono de cadena larga, principalmente ácidos grasos, grasas ceras y aceites cuya concentración en el agua produce manchas aceitosas sobre la superficie del agua corriente o represada. El término grasa, entonces se aplica a una variedad de sustancias orgánicas que son extraídas de suspensiones o de soluciones acuosas por el hexano o por el freón. Para el tratamiento las acumulaciones de grasa sobre las paredes, interfieren con los procesos de tratamientos como tanques de Imhoff, lodos activados y procesos de digestión⁴⁵.

La determinación de aceites y grasas se realizó mediante extracción Soxhlet, en un principio se adecuó el lecho filtrante compuesto de papel filtro y muselina en un embudo Buchner y se filtró a través de él con vacío la muestra acuosa. El papel filtro se separó y se secó en un horno por 30 minutos a 103°C. Se pesaron los vasos de extracción del Soxhlet y con solvente hexano se limpió el recipiente de muestra para extraer residuos grasos y se conectó el equipo Soxhlet al baño de aceite a 110°C durante 4 horas. Se eliminó el solvente residual en una campana extractora y tras desecar los vasos se pesó. El contenido de grasas y aceites se determina por medio de la siguiente ecuación.

⁴⁵ GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p 154-156

Ecuación 7. Cálculo de Grasas y Aceites

$$GyA \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(Pf - Pi) \cdot 10^6}{V}$$

Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Manual de análisis de aguas, 1995, página 155.

Donde **Pf** corresponde al peso final de la extracción, **Pi** al peso inicial de los vasos previo a la extracción Soxhlet y **V** el volumen de muestra.

2.5.11 Hidrocarburos Disueltos. El petróleo está constituido principalmente por hidrocarburos los cuales son compuestos orgánicos, ramificados, que se pueden dividir en dos grandes grupos: alifáticos y aromáticos; entre estos, los aromáticos resultan ser los más tóxicos dado su efecto cancerígeno. Su presencia puede ser natural o artificial y puede poseer efectos adversos para la salud y las dinámicas celulares de los microorganismos acuáticos⁴⁶.

La obtención de este parámetro es similar a grasas y aceites, siendo un proceso continuo donde el extracto del parámetro anterior se disolvió en n-Hexano, se agito con barra magnética y se filtró a través de embudo Buchner para luego eliminar el solvente residual mediante campana de extracción. Se pesa el resultado final tras extracción. Previamente se pesó el vaso Soxhlet vacío. El contenido de hidrocarburos se calcula en base a la siguiente ecuación.

Ecuación 8. Cálculo de Hidrocarburos Disueltos

$$GyA \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(Pf - Pi)}{V}$$

Fuente: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2003. p 99-102

Donde **Pf** corresponde al peso final de la extracción, **Pi** al peso inicial de los vasos previo a la extracción Soxhlet y **V** el volumen de muestra.

2.5.12 Metales (Plomo, Cadmio y Cobre). La presencia de metales en agua potable, aguas residuales, y en los cuerpos de aguas receptores, constituye un serio problema, ya que su toxicidad afecta adversamente a los seres vivos que consumen agua, a los sistemas de tratamiento de aguas residuales y a los ecosistemas. Los metales pueden ser analizados y determinados por medio de

⁴⁶ INVEMAR, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2003. p 99-102

técnicas como la espectroscopia de absorción atómica, polarografía o colorimetría.

Los metales se pueden clasificar según su condición física en:

- **Metales filtrables disueltos**, los cuales se presentan por los constituyentes de una muestra no acidificada que pasan a través de un filtró de membrana de 0,45 micras.
- **Metales Suspendidos**, son los componentes de una muestra sin acidular que son retenidos por un filtro de membrana 0,45 micras.
- **Metales Totales**, son representados por la concentración de metales determinados en una muestra sin filtrar tras una digestión intensa, o la suma de fracciones disuelta y suspendida.
- **Metales Extraíbles con ácido**, son la concentración de metales en solución, tras el tratamiento de una muestra sin filtrar con ácido mineral diluido caliente

La medición de los tres metales (Pb, Cd y Cu) se realizó por medio de la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (AA), la cual comprende el estudio de absorción de energía radiante (generalmente en las regiones ultravioletas y visible) por átomos neutros en estado gaseoso. El elemento que se determina debe ser reducido al estado elemental, vaporizado e introducido en un haz de radiación procedente de la fuente. Esto se logra llevando un soluto de la muestra, como niebla fina a una llama apropiada, la cual cumple la función de celda donde se deposita la muestra en la espectroscopia de absorción ordinaria.

La cantidad de energía absorbida en la llama a una longitud de onda característica, es proporcional a la concentración del elemento en la muestra en un intervalo de concentraciones limitadas⁴⁷.

2.6 RESULTADOS DIAGNOSTICO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA LLUVIA EN TENJO, CUNDINAMARCA

Los valores de la Tabla 3, se obtuvieron en el laboratorio de la Fundación Universidad de América y el laboratorio externo QUIMCONTROL LTDA para parámetros fisicoquímicos de aceites-grasas, hidrocarburos y metales (Plomo, Cobre, y Cadmio).

⁴⁷ GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p 44-50

Tabla 3. Resultado de los parámetros fisicoquímicos en el casco urbano del municipio de Tenjo.

Parámetro	Unidades	Resultados		
		Punto 1	Punto 2	Punto 3
pH	und.	6,89	7,08	6,32
Conductividad	mS/cm	10,7	11,23	10,61
Solidos Suspendidos	mg/L	56,3	66,5	74,5
Solidos Totales	mg/L	50,6	58,7	70
Solidos sedimentales	mg/L.h	61,1	69,9	77,8
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg O ₂ /L	38,4	40,2	44,6
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	64	62	82
Turbidez	UNT	454,2	439	374,3
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	55	35	85
Aceites y grasas	mg/L	1,3	2,2	2,4
Hidrocarburos disueltos	mg/L	2,13	2,87	3,02
Pb	mg Pb/L	0,08	0,15	0,17
Cu	mg Cu/L	0,085	0,08	0,092
Cd	mg Zn/L	0,058	0,062	0,073

Fuente: elaboración propia

Los resultados de la anterior tabla, corresponden a un muestreo del agua lluvia por escorrentía de los tres puntos planteados en la metodología del proyecto restando dos muestreos en los tres puntos geográficos para cumplir con la totalidad de los muestreos propuestos; por situaciones externas al alcance del proyecto, pandemia mundial, se recurrió a información externa para completar el número total de muestreos requeridos, siendo necesario complementar esta información por medio de una revisión bibliográfica, acerca de casos de estudio, que permitan suministrar valores similares a los obtenidos experimentalmente, con el fin de obtener un diagnóstico más concluyente, aunque cabe la posibilidad de que el resultado final posea una alta incertidumbre en sus valores.

2.7 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA Y DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA LLUVIA EN LUGARES SIMILARES

2.7.1 Campus universitario de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJB), sede Bogotá. El objetivo de este proyecto desarrollado por estudiantes de los grupos de investigación Hidrociencia e ISAD, de la Pontificia Universidad Javeriana⁴⁸, buscaban identificar diez (10) puntos de captación con la finalidad de evaluar la viabilidad económica y técnica del aprovechamiento del agua lluvia en el campus, y analizar su adaptabilidad revisando estándares de calidad de los mismos. Las ubicaciones de los puntos seleccionados se identificaron en cubiertas de diferentes edificios del campus, en sumideros aledaños a edificios y áreas comunes, también en canales y sistemas de drenajes a lo largo de la institución.

La ejecución de la metodología por medio de tres campañas experimentales, consto con la preselección de cinco puntos (la ubicación de los puntos: **[3]** Canal suroriental del campo de fútbol, **[4]** Cubierta del edificio de parqueaderos Don Guillermo Castro, **[5]** Caja de recolección del sótano del edificio de parqueaderos Don Guillermo Castro, **[7]** Cubierta del edificio de aulas Fernando Barón S.J, **[10]** Sumidero del edificio de la Facultad de Psicología Manuel Briceño Jáuregui S.J.), en la institución educativa de los diez anteriormente mencionados, determinando sus propiedades físicas y organolépticas, concentración en metales pesados, concentración en constituyentes orgánicos, concentración en constituyentes inorgánicos y contaminación, siguiendo los procedimientos indicados en las normas técnicas correspondientes de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998), donde especifican la metodología para el muestreo, la cadena de custodia y su posterior análisis de parámetros fisicoquímicos, al igual que, la norma ISO 9308-1 (2002), por las cuales se obtuvieron resultados con una confiabilidad del 95%.

Los resultados de la calidad de agua de los diferentes parámetros evaluados en los puntos preseleccionados (3, 4, 5, 7 y 10) del campus universitario PUJB, se evidencian en la siguiente tabla.

⁴⁸ Torres, A, et al. Aprovechamiento de agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá (PUJB). Bogotá. 2009. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jaime_LaraBorrero/publication/230887967_Aprovechamiento_de_aguas_lluvias_en_el_campus_de_la_Pontificia_Universidad_Javeriana_sede_Bogota_PUJB/links/5d4455f14585153e5935c909/Aprovechamiento-de-aguas-lluvias-en-el-campus-de-la-Pontificia-Universidad-Javeriana-sede-Bogota-PUJB.pdf

Tabla 4. Resultado de los parámetros fisicoquímicos de los diferentes puntos en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJB), sede Bogotá

Parámetro	Unidades	Resultado promedio por punto				
		3	4	5	7	10
Color Verdadero	UPC	75	-	-	-	70
pH	und	8,46	6,24	6,01	6,29	7,85
Turbidez	UNT	72,43	-	-	4,2	32,55
SST	mg/L	171,1	5	40	13	111,7
DBO ₅	mg/L	42,7	12	72	-	30
Conductividad	µS/cm	295,33	-	-	-	-
N-NH ₄	mg/L	4,48	-	-	2,8	5,04
Fe	µg/L	677,6	310,5	458,5	132	483,9
Cd	µg/L	78,4	12	19,3	41,2	32,8
Pb	µg/L	-	169,9	167,3	-	-
Mn	µg/L	-	13,4	-	-	-
Hg	µg/L	-	126,8	150,7	-	-
Ni	µg/L	-	-	-	11,3	11,3
Coliformes Fecales	UFC/100mL	-	-	-	-	240
Escherichia coli	UFC/100mL	-	-	-	-	170

Fuente: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Aprovechamiento de agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Bogotá. 2009. [consultado el 7 de junio de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230887967_Aprovechamiento_de_aguas_lluvias_en_el_campus_de_la_Pontificia_Universidad_Javeriana_sede_Bogota_PUJB

La selección de este artículo para realizar el diagnóstico de parámetros de calidad del agua lluvia en el municipio de Tenjo, se debió a las similitudes climatológicas con respecto a humedad, temperaturas promedio diarias e hidrológicas (intensidad de precipitaciones, periodos de lluvia), además, que la zona en que está ubicado específicamente el campus universitario, se ven reflejados ciertos factores de incidencia que fueron primeramente mencionados para la selección de puntos de muestro en el casco urbano del municipio de Tenjo, como lo son alto flujo peatonal, presencia de zonas de parqueo vehicular, y la disponibilidad de vertederos, sumideros o canales para la captación de la escorrentía.

2.7.2 Zona residencial barrio Nueva Zelandia en UPZ San José de Bavaria, localidad de Suba, Bogotá. Esta investigación se desarrolló en tres escenarios diferentes (industrial, residencial y vehicular), los cuales presentaban características particulares; esto con el fin de analizar la calidad del agua lluvia de escorrentía asociada a las actividades que se llevaban a cabo en cada lugar, y observar la variación de los parámetros seleccionados en cada uno de los puntos⁴⁹.

⁴⁹ GERENA, Juan David. MORA Mónica Viviana. Evaluación de parámetros Fisicoquímicos en agua lluvia de escorrentía en tres puntos con tipos de suelos industrial, residencial y vehicular en Bogotá con protección a sistemas urbanos de drenaje sostenible. Universidad Santo Tomás de Aquino. Facultad de Ingeniería Ambiental. Bogotá. 2017.

Para obtener una similitud en los resultados de los parámetros fisicoquímicos determinados en esta investigación, con la desarrollada en el casco urbano del municipio de Tenjo, se eligieron los resultados conseguidos específicamente en la zona residencial. Este escenario hace referencia a una zona residencial la cual se ubica en la carrera 48 # 174 en el barrio Nueva Zelandia perteneciente a la Unidad de Planeamiento Zonal (UPZ) San José de Bavaria dentro de la localidad de Suba; el punto de muestreo para la captación se realizó cerca de un conjunto residencial el cual posee un sistema de evacuación de aguas lluvias por medio de canales facilitando la captación de muestras a analizar. El número total de muestras realizadas se determinó aplicando el modelo de poblaciones finitas, determinando un total de 12 muestreos en el área de estudio y los análisis de laboratorio se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad Santo Tomas, los resultados ponderados para la zona residencial se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Resultado de los parámetros fisicoquímicos en zona residencial UPZ San José de Bavaria

Parámetros	Unidades	Resultado
Conductividad	µS/cm	0,17
Turbiedad	NTU	26,5
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L DO	2,9
Sólidos totales (ST)	mg/L	85,4
Sólidos volátiles Totales (SVT)	mg/L	54,7
pH	und.	7,1
Acidez	mg/L CaCO ₃	14,1
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	7,8
Nitritos	mg/L NO ₂	0,078
Nitratos	mg/L NO ₃	25,4
Dureza total	mg/L CaCO ₃	47,3
Dureza carbonácea	mg/L CaCO ₃	27,1
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	165

Fuente: GERENA, Juan David. MORA Mónica Viviana. Evaluación de parámetros fisicoquímicos en agua lluvia de escorrentía en tres puntos con tipos de suelo residencial en Bogotá con proyección a SUDS. Universidad Santo Tomás de Aquino. Facultad de Ingeniería Ambiental. Bogotá. 2017. [consultado el 7 de junio de 2020]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9236/2017juangerena.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Este punto de muestro presenta factores espaciales, que concuerdan con los factores de incidencia que fueron tenidos en cuenta para la selección de puntos de muestreos en la captación de agua lluvia por escorrentía en el casco urbano del municipio de Tenjo, como la presencia de zonas de parqueo, la existencia de viviendas y vías comerciales, las cuales aseguran el alto flujo vehicular y

peatonal en la zona de estudio. Esto brinda una consistencia entre los datos de ambas fuentes, y se puede lograr una homogeneidad de ambas muestras.

2.7.3 Edificios Laboratorio de Hidráulica y CADE del Campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. El presente trabajo realizado por Nathalia Buitrago⁵⁰ se enfoca en la caracterización y cuantificación del agua de escorrentía de techo en dos edificios del campus de la Universidad Nacional de Colombia: el Laboratorio de Hidráulico y el CADE, para el estudio de un prediseño de una piscina de retención en el campus universitario.

Establecieron como parámetros importantes para caracterizar en el análisis de la calidad del agua de escorrentía en techos, como el pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos disueltos, además, de metales pesados y sulfatos. Sin embargo, fue conveniente hacer una caracterización físico-química completa a las primeras muestras tomadas, con el objetivo de establecer con certeza otros determinantes que pueden ser importantes de monitorear debido a las condiciones propias de la zona de estudio. Para la toma de muestras se procuró escoger eventos de precipitación con diferentes características de intensidad, duración y tiempo seco antecedente, con el propósito de observar los diversos comportamientos de los determinantes monitoreados. Mediante el estudio se encontró que los eventos de precipitación en la zona de estudio generalmente se presentan entre la 1 y 2 p.m., con duración inferior a 2 horas.

La captación de la muestras en los techos de los edificios, se tomaron directamente en las tuberías de descarga de agua lluvia, donde se le midieron parámetros in situ como conductividad, oxígeno disuelto, y pH, durante los primeros 5, 10, 15, 20, 30, 40, y 70 minutos desde que observa la descarga hacia los pozos. La medición en el pozo del laboratorio de hidráulica, corresponde a eventos del 29 de noviembre de 2010, igual para el muestreo en el pozo CADE-LEH. Los resultados del muestreo que se realizó en ambas locaciones se muestran en la siguiente tabla.

⁵⁰ BUITRAGO, Nathalia. Cuantificación y caracterización de la calidad del agua de escorrentía de techo para el prediseño de una piscina de retención en el campus de la Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Colombia. 2011. P 90-110

Tabla 6. Resultado de los parámetros fisicoquímicos de pozos en LH y CADE Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá

Parámetro	Unidades	Laboratorio Hidráulica	Pozo del CADE
		Resultado	Resultado
Turbiedad	UNT	64,9	16,8
Color verdadero	UPC	35	15
pH	unidades	6,9	6,6
Conductividad	mS/cm 25C	144,4	37,7
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	73	15
Acidez total	mg/L CaCO ₃	14	10
CO ₂ Libre	mg/L CaCO ₃	6,2	4,4
Dureza total	mg/L CaCO ₂	76	18
Calcio	mg/L CaCO ₃	62	14
Magnesio	mg/L CaCO ₃	73	15
Hierro	mg/L Fe ⁺³	0,36	<0,1
Manganeso	mg/L Mn ⁺⁷	0,05	<0,05
Amonio	mg/L N-NH ₄	1,2	1,3
Nitritos	mg/L N-NO ₂	0,003	0,02
Nitratos	mg/L N-NO ₃	0,04	0,27
Cloruros	mg/L Cl	1	2,1
Sulfatos	mg/L SO ₄	12,5	93
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80	17
Sólidos Totes	mg/L	206	50
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	126	33
Zinc	mg/L	0,06	<0,06

Fuente: BUITRAGO, Nathalia. Cuantificación y caracterización de la calidad del agua de escorrentía de techo para el prediseño de una piscina de retención en el campus de la UN. 2017 Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Colombia. 2011. P 103. [Consultado el 8 de junio de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/4146/11/NathaliaBuitrago2011.pdf>

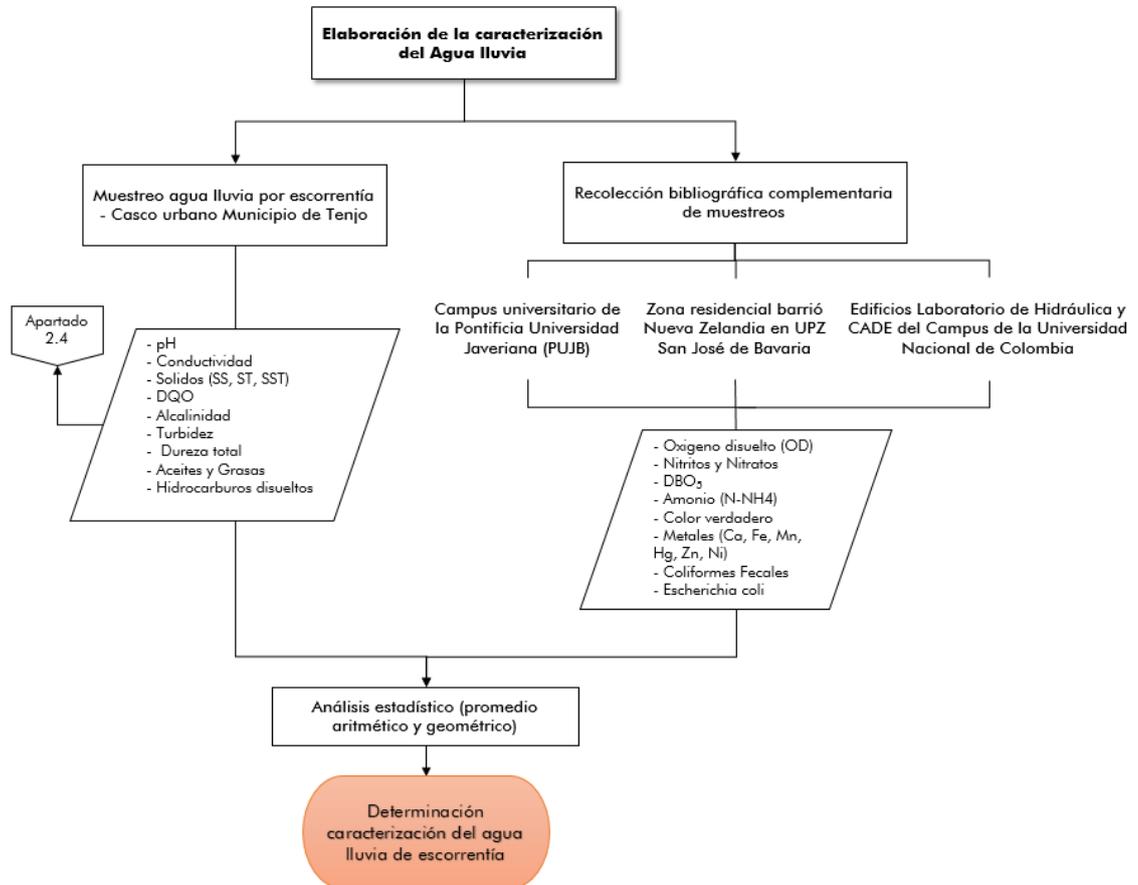
Los resultados obtenidos en los muestreos de ambas edificaciones, se compararon con investigaciones similares con la finalidad de establecer e identificar el rango (alto, medio o bajo) en que se encuentran los valores de concentración de los parámetros medidos. Además, se compararon frente a los límites establecidos por la legislación Colombiana en el Decreto 1594 de 1984 para el uso humano, agrícola y pecuario.

2.8 DETERMINACIÓN DE CARACTERIZACIÓN PONDERADA DEL AGUA LLUVIA DE ESCORRENTÍA

Recolectando los diferentes resultados de muestreo realizados en diferentes ubicaciones como campus universitarios (Pontificia Javeriana y Universidad Nacional), y zonas residenciales sobre del agua lluvia de escorrentía, para complementar el diagnóstico obtenido en el área de estudio (casco urbano Tenjo), se crea una ruta para elaborar una caracterización ponderada que logre abarcar todos los proyectos analizados, y así, obtener valores con mayor

conclusión para identificar el tratamiento requerido posteriormente. La ruta se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Ilustración 15. Diagrama de flujo elaboración de la caracterización del agua lluvia.



Fuente: elaboración propia

Aunque se encuentra una alta desigualdad en algunos parámetros, como lo recomienda Metcalf & Eddy, es necesario realizar un análisis estadístico de los datos⁵¹, donde la mejor opción es implementar un arreglo ponderado sobre el número total de datos obtenidos en la caracterización de cada sitio en específico. La elección del método empleado ideal depende de la distribución de los datos recolectados, la variabilidad en los datos hace que el promedio aritmético se vea afectado por los valores extremos. Para este caso, se debe emplear el promedio geométrico que se ve menos afectado por la variabilidad en los datos. Las ecuaciones para realizar un ponderado son⁵²:

⁵¹ METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Terceros edición, Vol 1. McGraw Hill. p. 124-130

⁵² ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición. 2004. P 102-103

Ecuación 9. Promedios a) Aritmético, b) Geométrico

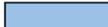
$$\text{a) } \bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad \text{b) } \bar{X}_g = (X_1 \times X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n)^{1/n}$$

Fuente: ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición. 2004.

La metodología de aplicación del promedio aritmético y geométrico en los datos obtenidos mediante experimentación (Tenjo) y revisión bibliográfica (UPZ San José, PUJB y U. Nacional), se puede ver en la **Tabla 7**, donde se especifica a que parámetros se le aplicó el respectivo promedio en base a lo recomendado por Romero. Parámetros tales como conductividad, sólidos (SS, ST, SST), DQO y turbidez presentan una variabilidad superior en factores mayores de 10, por ende, se aplicó un promedio geométrico. Por otro lado, los resultados de algunos metales como (Mn, Hg, Ni, Pb, Cu y otros) y aceites e hidrocarburos sus valores son similares, lo que facilita el uso de un promedio aritmético. Los resultados del procedimiento de ponderación se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 7. Aplicativo de promedio aritmético y geométrico a parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Unidades	SUBA	TENJO			JAVERIANA					U. NACIONAL			
pH	und.	7,1	6,89	7,08	6,32	8,46	6,24	6,01	6,29	7,85	6,9	6,6		
Conductividad	mS/cm	0,17	10,7	11,23	10,61	295,33					144,4	37,7		
Solidos Suspendidos (SS)	mg/L		56,3	66,5	74,5						80	17		
Solidos Totales (ST)	mg/L		50,6	58,7	70						206	50		
Solidos sediméntales (SST)	mg/L		61,1	69,9	77,8	171,1	5	40	1	111,7	126	33		
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg O ₂ /L	165	38,4	40,2	44,6									
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L		64	62	82						73	15		
Turbidez	UNT	26,5	454,2	439	374,3	72,43			4,2	35,55	64,9	16,8		
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	47,3	55	35	85						76	18		
Aceites y grasas	mg/L		1,3	2,2	2,4									
Hidrocarburos disueltos	mg/L		2,13	2,87	3,02									
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L DO	2,9											5,6	6,38
Nitritos	mg/L NO ₂	7,8											0,003	0,02
Nitratos	mg/L NO ₃	0,078											0,04	0,27
Demanda Biológica de Oxígeno, DBO ₅	mg O ₂ /L							42,7	12	72	30			
Color Verdadero	UPC	25,4						75			70	35	15	
N-NH ₄	mg/L							4,48		2,8	5,04	1,2	1,3	
Pb	mg Pb/L													
Cu	mg Cu/L		0,08	0,15	0,17									
Cd	mg Cd/L		0,085	0,08	0,092	0,0784	0,012	0,0193	0,0412	0,0328				
Ca	mg Ca/L												62	14
Fe	mg Fe/L		0,058	0,062	0,073	0,6776	0,3105	0,4585	0,132	0,4839	0,36	0,1		
Mn	mg Mn/L												0,05	0,05
Hg	mg Hg/L							0,1268	0,1507					
Zn	mg Zn/L												0,06	0,06
Ni	mg Ni/L												0,0113	0,0113
Coliformes Fecales	UFC/100mL												240	
Escherichia coli	UFC/100mL												170	

 Aritmético  Geométrico

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Caracterización ponderada del agua lluvia de escorrentía.

Parámetro	Unidades	Valor
pH	und.	6,85
Conductividad	mS/cm	16,61
Solidos Suspendedos (SS)	mg/L	51,98
Solidos Totales (ST)	mg/L	73,48
Solidos sedimentables (SST)	mg/L	40,51
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg O ₂ /L	86,00
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	51,33
Turbidez	UNT	65,86
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	46,86
Aceites y grasas	mg/L	1,97
Hidrocarburos disueltos	mg/L	2,67
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L DO	4,96
Nitritos	mg/L NO ₂	0,08
Nitratos	mg/L NO ₃	0,09
Demanda Biológica de Oxígeno, DBO ₅	mg O ₂ /L	32,44
Color Verdadero	UPC	37,07
N-NH ₄	mg/L	2,50
Pb	mg Pb/L	0,17
Cu	mg Cu/L	0,13
Cd	mg Cd/L	0,06
Ca	mg Ca/L	29,46
Fe	mg Fe/L	0,19
Mn	mg Mn/L	0,03
Hg	mg Hg/L	0,14
Zn	mg Zn/L	0,06
Ni	mg Ni/L	0,011
Coliformes Fecales	UFC/100mL	240,0
Escherichia coli	UFC/100mL	170,0

Fuente: elaboración propia

Dentro de los parámetros que presentan una desigualdad considerable entre los distintos casos de estudio de caracterización del agua lluvia de escorrentía, se encuentran la conductividad y la turbidez, estos parámetros dependen directamente de la temperatura a la cual se hace la medición, y en específico la conductividad, que requiere que su medición sea lo más cercano a su hora de captación y en el lugar del muestreo (*in situ*)⁵³. Por otro lado, parámetros físicos y químicos como el pH, los sólidos sedimentables, algunos metales y el color verdaderos, presentan un patrón sin muchas alteraciones en sus valores comparando los resultados.

La recolección de resultados de diagnósticos en puntos de muestreos diferentes, pero que presentan características geo-demográficas similares a la zona de estudio del proyecto, como se mencionó en cada referencia, permiten que, por medio de estas, se pueda complementar y aumentar la robustez de los datos en la caracterización fisicoquímica del agua lluvia de escorrentía, con el fin, de obtener un diagnóstico más detallado y representativo.

⁵³ DINAMA, LAB. Manual de procedimiento analítico para aguas y efluentes. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Edición 1996. p 7. Disponible en: http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinama.pdf

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA LLUVIA

Una vez ya determinada la caracterización del agua lluvia del casco urbano municipio en el municipio de Tenjo, por medio del análisis experimental de sus parámetros fisicoquímicos, y complementando la información mediante referencias bibliográficas (revistas institucionales y proyectos investigativos), es necesario, identificar y seleccionar la alternativas de aprovechamiento más adecuada para su posterior aprovechamiento.

Como se ha venido mencionando en el desarrollo del diagnóstico del caso de estudio en la delimitación especificada, se han planteado tres diferentes alternativas en las cuales se puede destinar a uso. Las opciones de alternativas son: Potabilización, destinada para aumentar la oferta del recurso de agua potable hacia la comunidad, a la vez que, ayudar a contrarrestar la escasez propia que presenta el municipio en la actualidad. La segunda opción, es emplear este flujo para el sector agropecuario, esta alternativa favorecería a un sector productivo que abarca cerca del 70% de las actividades económicas del municipio, además, de aumentar la productividad del sector en épocas de sequía. Por último, se ha planteado la alternativa de crear un sistema de recarga o reinyección de este recurso, hacia fuentes subterráneas de extracción (pozos), el cual traería beneficios como el incremento de su vida útil, al igual, que ayudaría a recuperar ciertas propiedades y características esenciales del área de captación.

Para realizar una adecuada selección entre las tres alternativas expuestas, es necesario utilizar una herramienta analítica con principio estadístico, que permita identificar la mejor alternativa frente a criterios claves a la hora de ejercer una elección. Es por eso, que se ha aplicado el modelo AHP combinándolo con el método Delphi para la recolección de información.

3.1 PRESENTACIÓN DE ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO Y SU NORMATIVIDAD

El proceso de evaluación y comparación de la normativa establecida por entes gubernamentales Nacionales e internacionales sobre las condiciones mínimas de las características fisicoquímicas finales del recurso, frente al diagnóstico establecido mediante un muestreo propio y consulta bibliográfica, se compara para valorar cuantitativamente aspectos con respecto al aprovechamiento de las diferentes opciones que se han planteado en el proyecto, las cuales abarcan el tratamiento del agua lluvia proveniente del sistema de alcantarillado con el fin de

reutilizarla para usos destinados al consumo humano o el consumo agropecuario, estas con el fin de combatir un posible desabastecimiento y garantizar un flujo continuo; por último, enfocar el aprovechamiento del agua lluvia hacia la recarga a fuentes subterráneas para así lograr aumentar su ciclo de vida productivo.

Cada opción de aprovechamiento requiere de diferentes parámetros fisicoquímicos, al igual, que los valores máximos permitidos por ley de estos parámetros presentan variaciones entre cada uno. Por ende, establecer una correcta evaluación y una posterior comparación, sustentara la elección de la opción más adecuada para el aprovechamiento del agua lluvia.

3.1.1 Potabilización. El municipio de Tenjo obtiene su recurso hídrico principalmente de una captación subterránea de agua por medio de tres pozos que tienen la capacidad de producir 48 Litros/segundo y aproximadamente extraer anualmente 1'513726 metros cúbicos de agua; pero este proceso tiene unas pérdidas superiores del 46%⁵⁴, lo que deduce que la cantidad de agua potable obtenida se reduce a 817.412 metros cúbicos, lo que hace que la demanda del municipio no se satisfaga en su totalidad. Debido a esta problemática en el municipio de Tenjo, se realizaron acuerdos mediante un contrato con la entidad prestadora del servicio hídrico, Empresas Públicas de Cundinamarca (EPC), donde se estipulaba la compra de cerca de 805.065 metros cúbicos provenientes del acueducto de la ciudad de Bogotá D.C., los cuales ayudaran a suplir la necesidad de agua potable⁵⁵.

Con una población cercana 20.386 habitantes⁵⁶, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), en el 2018 y ante el inminente crecimiento de la población en los próximos años como lo reporta el DANE, que para el 2020 Tenjo tendrá un crecimiento cercano del 0,5% de la población total⁵⁷, debido a fenómenos sociales, como la ampliación del eje urbano, las migraciones y la llegada de industrias de gran tamaño con extenso recurso de personal humano. El conjunto de la problemática actual de una ineficiente extracción por falta de mantenimiento y control del proceso, y la dependencia notable de agentes

⁵⁴ Sitio Web Alcaldía de Tenjo, Cundinamarca. Datos básicos acueducto. Página 3. Disponible en Internet: http://www.tenjo-cundinamarca.gov.co/Proyectos/ConozcamasProyectos/2535_rehabilitacion-acueducto.pdf

⁵⁵ NIEVES, Edna Catalina. PRECIADO, Jair. La problemática ambiental y territorial del municipio de Tenjo (Cundinamarca): último municipio verde de la Sabana de Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2015. disponible en Internet: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/10562/11529>

⁵⁶ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Tenjo, Cundinamarca (25799). Disponible en Internet: http://orabo.gov.co/apc-aa-files/a65cd60a57804f3f1d35afb36cfcf958/tenjo_ficha_25799.pdf

⁵⁷ SISTEMA DE ESTADÍSTICAS TERRITORIALES (TerriData). Comparaciones Municipios. Página 54. Disponible en Internet: <https://terridata.dnp.gov.co>

externos para cubrir la demanda insatisfecha en el municipio de Tenjo, es necesario optar por el aprovechamiento de este recurso que, en principio, tendría un gran potencial para ayudar a mitigar todas las problemáticas mencionada anteriormente.

Para llegar a obtener un recurso hídrico óptimo para el consumo humano, como lo estipula la Resolución 2115 del 2007⁵⁸, presentada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), se debe tener en cuenta la resolución anterior ya que establece todas las características fisicoquímicas y microbiológicas que debe cumplir el agua para garantizar la salud de sus consumidores, lo cual hace que, el posterior tratamiento del agua lluvia captada llegue hasta la tercera y última fase para asegurar su calidad. Esto incide en un elevado costo en el tratamiento con respecto a las demás opciones de aprovechamiento.

Tabla 9. Parámetros Fisicoquímicos del agua para el consumo humano

Criterios admisibles del recurso para consumo Humano		
Características físicas	Expresada como	Valor max. Aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2
Compuestos químicos	Expresada como	Valor max. Aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0.02
Arsenico	As	0.01
Bario	Ba	0.7
Cadmio	Cd	0.003
Cianuro libre y disociable	CN	0.05
Cobre	Cu	1.0
Cromo total	Cr	0.05
Mercurio	Hg	0.001
Niquel	Ni	0.02
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Hidrocarburos Aromaticos Policiclicos (HAP)	HAP	0.01
Carbono Organico Total	COT	5.0
Nitritos	NO ₂	0.1
Nitratos	NO ₃	10
Fluoruros	F	1.0
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO ₃	200
Cloruros	Cl ⁻	250
Aluminio	Al ³⁺	0.2
Dureza Total	CaCO ₃	300
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Molibdeno	Mo	0.07
Sulfatos	SO ₄ ²⁺	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO ₄ ²⁻	0.5

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución N° 2115. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

⁵⁸ Resolución N° 2115. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Bogotá. Colombia. 22 de junio de 2007. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

3.1.2 Sector Agropecuario. Para un municipio como Tenjo, donde el 96.87% del territorio corresponde al sector rural, y que sus principales actividades económicas son la ganadería, la agricultura y el cultivo de flores para exportación y comercio nacional; donde estas actividades representan el 72,6% del PIB municipal. Al tener la mayor participación en la economía del municipio, requiere una alta cobertura de sus servicios públicos; por eso, el sistema de acueducto municipal proporciona cerca del 67% del suministro de agua requerida para el desarrollo óptimo de estas actividades, lo cual representa un incremento anual en el consumo del recurso hídrico del municipio⁵⁹. La Tabla 10, detallan la distribución del área usada en los diferentes cultivos y actividades pecuarias en el municipio.

Tabla 10. Distribución a) del suelo para diferentes cultivos, b) de zonas de producción pecuaria

PRODUCTO	AREA FANEGADA	% AREA SEMB.	PRODUCCIÓN
Papa	392	24	4723
Zanahoria	373	23	2049
Maiz	417	25	1312
Cebada	285	17	1137
Hortalizas y otras	111.5	7.0	233.5
Total	1578.5	96.0	9455

a)

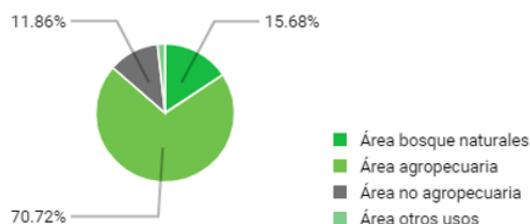
ZONA DE PRODUCCIÓN	AREA EN HAS.
Protectora productiva	1408.00
Pastoreo Extensivo	999.51
Pecuaria de alta productividad	7418.03
Agrícola de alta productividad	1492.30
Extractiva de alta productividad	7.79

b)

Fuente: CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES. Distribución del suelo para diferentes cultivos y distribución de zonas de producción pecuaria. 2004 [consultado el 18 de junio de 2020]. Disponible en <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac7a1cc4150d.pdf>

Como lo muestra la ilustración 16, por medio del Censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el 2014, el 70,72% del área rural representa un uso agropecuario, lo cual justifica la alta demanda del recurso hídrico para el desarrollo de actividades.

Ilustración 16: Censo Nacional Agropecuario



Fuente: DANE, Censo nacional agropecuario, 2014. [Consultado el 22 de junio de 2020]. Disponible en <https://www.dane.gov.co/files/images/foros/foro-de-entrega-de-resultados-y-cierre-3-censo-nacional-agropecuario/CNATomo2-Resultados.pdf>

⁵⁹ TOVAR, Daniel Eduardo, LAGUADO, María. La inspección de riesgos agropecuarios en el municipio de Tenjo, Cundinamarca como herramienta clave de la gestión administrativa. Universidad La Salle. Bogotá. 2018. Páginas 19-22.

Dado el alto porcentaje existente de dependencia entre los comercios agropecuarios y la empresa EmserTenjo, por medio del acueducto municipal, es de gran importancia optar por una opción sustentable que ayude potencializar el suministro del recurso para garantizarlo en la producción de estas actividades. Para evaluar la opción de aprovechamiento del agua lluvia hacia el sector agropecuario, se tomó la normatividad Nacional establecida por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) en el decreto 1594 de 1984⁶⁰ en sus artículos 40 y 41, complementada por el libro *Water Reuse for Irrigation Agriculture, Landscapes, and Turf Grass*⁶¹. En base a esto, se podrá evaluar y comparar estos parámetros fisicoquímicos legales frente al diagnóstico obtenido.

Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos del agua para sector Agrícola y Pecuario.

Parámetro	Expresada como	Uso Agrícola	Uso Pecuario
pH	Unidades	4,5-9,0	-
Sólidos totales en suspensión (SST)	mg/L	5,0-35	-
Turbidez	NTU	0,2-35	-
DQO	mg/L	20-50	-
Nitratos + Nitritos	N	-	100,0
Nitrito	N	-	10,0
Aluminio	Al	5,0	5,0
Arsénico	As	0,1	0,2
Berilio	Be	0,1	-
Boro	B	-	5,0
Cadmio	Cd	0,01	0,05
Cinc	Zn	2,0	25,0
Cobalto	Co	0,05	-
Cobre	Cu	0,2	0,5
Cromo	Cr	0,1	1,0
Flúor	F	1,0	-
Hierro	Fe	5,0	-
Litio	Li	2,5	-
Manganeso	Mn	0,2	-
Mercurio	Hg	-	0,01
Molibdeno	Mo	0,01	-
Níquel	Ni	0,2	-
Plomo	Pb	5,0	0,1
Selenio	Se	0,02	-
Vanadio	V	0,1	-
Contenido de Sales	Peso total	-	3,0
Coliformes totales	UFC/100mL	1-200	-

Fuente: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Decreto N°1594 (Artículo 40 y 41). [Consultado el 22 de junio de 2020] Disponible en Internet: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f

⁶⁰ Decreto N°1594 (Artículo 40 y 41). MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Bogotá, Colombia. 1984. Disponible en Internet: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f

⁶¹ LAZAROVA, Valentina, BAHRI, Akica. *Water Reuse for Irrigation Agriculture, Landscapes, and Turf Grass*. CRC Press. 2004

3.1.3 Recarga a fuentes subterráneas. Los propósitos de la recarga de agua subterránea usando agua recuperada pueden ser proporcionar un tratamiento adicional para la reutilización futura, aumentar los acuíferos potables, proporcionar almacenamiento de agua recuperada para su posterior recuperación y reutilización, o para controlar y prevenir el hundimiento del suelo.

La infiltración y la filtración del agua recuperada aprovechan los mecanismos de eliminación natural dentro de los suelos, incluida la biodegradación y la filtración, proporcionando así un tratamiento in situ adicional del agua recuperada y una fiabilidad de tratamiento adicional para el sistema general de gestión de aguas. Este tratamiento contribuye a la necesidad de eliminar costosos procesos avanzados de tratamiento de aguas. La capacidad de implementar dichos sistemas de tratamiento dependerá del método de recarga, las condiciones hidrogeológicas, los requisitos de los usuarios de baja graduación y otros factores⁶².

Para establecer una evaluación acerca de la recarga del agua lluvia reutilizada hacia fuentes subterráneas, es necesario determinar los parámetros fisicoquímicos que favorezcan y maximice su aprovechamiento, por ende, basándose en Guía para la reutilización del agua⁵⁷, presentada por el U.S. Environmental Protection Agency (EPA) se puede determinar las implicaciones que se deben tener en cuenta al optar por esta opción de aprovechamiento.

Tabla 12. Parámetros fisicoquímicos del agua para reinyección en fuentes subterráneas.

	Secondary Effluent (mg/l)
Total dissolved solids	750
Suspended solids	11
Ammonium nitrogen	16
Nitrate nitrogen	0.5
Organic nitrogen	1.5
Phosphate phosphorus	5.5
Fluoride	1.2
Boron	0.6
Biochemical oxygen demand	12
Total organic carbon	12
Zinc	0.19
Copper	0.12
Cadmium	0.008
Lead	0.082
Fecal coliforms/100 mL ^a	3500
Viruses, pfu/100 mL ^b	2118

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2004. Guidelines for Water Reuse. Washington, DC. 2004. p 33

⁶² EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Water Reuse. Washington, DC. 2004. p 31-37

La recarga de agua subterránea elimina la necesidad de instalaciones de almacenamiento en la superficie y los problemas asociados con los depósitos de superficie descubiertos (lagunas), pero poseen ciertas limitaciones como que requieran de extensas áreas de tierra, los costos de tratamiento, monitoreo de la calidad del agua y operaciones de las instalaciones de inyección/infiltración pueden ser elevados, o que la recarga puede aumentar el peligro de contaminación del acuífero debido a un pretratamiento inadecuado o inconsistente.

3.1.3.1 Casos de estudio. Como caso de estudio tenemos el estudio de “*Recarga de Acuíferos mediante pozos de inyección en México*”, donde se presenta que más de 100 acuíferos regionales son sobreexplotados mayormente para fines agrícolas generando impactos ambientales. Un proyecto de recarga de acuíferos fue llevado a cabo en la *Comarca Lagunera de México Norte*, una de las principales zonas agrícolas del país, con existencia de 3.500 perforaciones que extraen agua subterránea del acuífero, lo que resulta en una disminución significativa de la superficie piezométrica y un deterioro de la calidad del agua subterránea.

El proyecto utilizó una cuenca de recarga, adaptada próxima al lecho del Río Nazas, ciudad de Torreón, que cubre un área de 13ha con una capacidad aproximada de 197.000 m³. Se implementaron redes de abastecimiento de agua para transportar el agua superficial de la represa Zarco, por medio del canal de riego Sacramento, a la cuenca de recarga. Dos pozos de monitoreo fueron perforados para observar las respuestas del nivel freático local durante la recarga y doce pozos preexistentes fueron acondicionados con fines de monitoreo adicional del nivel freático. Durante las pruebas realizadas entre mayo y agosto de 2000, un volumen total de 5,2 Mm³ fue transportado desde el canal de Sacramento hasta la cuenca de recarga. De este volumen, 0,2 Mm³ fue evaporado y 5,0 Mm³ fueron infiltrados al subsuelo.

Las recomendaciones del proyecto incluyeron construir nuevas estructuras para controlar la liberación de agua a las cuencas, liberar hasta 0,5 Mm³/semana con el objetivo de evitar los desbordes de la cuenca, construir cuencas de sedimentación paralelas con el fin de reducir los problemas de obstrucción, y construir pozos de adsorción de 20 m de profundidad y más de 0,3 m de diámetro para evitar los horizontes de baja conductividad⁶³.

⁶³ CHAVEZ-GUILLEN, R. 2003. Gestión para la Recarga de Acuíferos y Almacenamiento Subsuperficial. Capítulo 6. Disponible en: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GALE%202005.%20Estrategias%20para%20la%20Gesti%C3%B3n%20de%20Recarga%20de.pdf

Otro caso de estudio, sobre la recarga de fuentes subterráneas, esta vez usando las escorrentía urbano, es “*Recarga Inter-Dunar en Atlantis, Sudáfrica*”, ciudad situada en la costa oeste de Sudáfrica. Esta presenta precipitaciones media anuales de 450 mm; sin embargo, cerca del 65% de los eventos de precipitación ocurren durante los meses de invierno (mayo a septiembre). El acuífero es heterogéneo, anisotrópico y freático a semiconfinado y el rango de transmisividad varía de 50 a 1.300 m²/d. Actualmente, la extracción de agua del acuífero de Atlantis está restringida a dos áreas de pozos, dos grandes cuencas de recarga, que cubren un área aproximada de 500.000 m² y se sitúan unos 500m por encima del gradiente de recarga del acuífero.

Las tres fuentes de agua disponibles para recarga son: Escorrentía urbana, agua subterránea y agua residual tratada. El agua escorrentía es recolectada mediante cuencas de retención. El agua subterránea se extrae del acuífero arenoso, luego es tratada en una planta de intercambio de iones y ablandamiento del agua, y finalmente distribuida, utilizada, colectada, y tratada junto con la escorrentía urbana, para nuevamente ser recargada al interior del acuífero. Para que el agua residual pueda ser utilizada como fuente de agua de recarga, se ha implementado un sistema de alcantarillado separado, esto permite la separación del agua residual proveniente de las áreas residenciales (que es tratada en una planta de lodo activado y mezclada con agua de escorrentía), del agua proveniente de las áreas industriales.

La recarga mejorada de agua subterránea aseguró la sostenibilidad del suministro de agua de Atlantis durante dos décadas y continuará jugando un rol esencial. El plan es altamente costo-efectivo y puede sostener el continuo crecimiento urbano de Atlantis hasta bien entrado el siglo XXI⁶⁴.

3.2 MÉTODO DELPHI Y APLICACIÓN

El método Delphi es una forma de obtener una opinión colectiva de los individuos sobre temas específicos, relaciona particularmente a problemas que son complejos y requieren interpretación intuitiva. Este consiste en realizar un cuestionario iterativo con retroalimentación controlada a un grupo de expertos (cualquier persona con conocimiento y experiencia relevantes de un tema en particular), aplicado de manera individual. Su proceso requiere al menos una encuesta de tres iteraciones; el propósito de la iteración inicial es identificar cuestiones generales relacionadas con los diversos componentes del tema en estudio.

⁶⁴ TREDoux, G., MURRAY, E., CAVE, L. Sistemas de infiltración y otros sistemas de recarga en el sur de África. Gestión de la recarga del acuífero y almacenamiento subsuperficial. 2003

La primera fase es realizar un cuestionario de preguntas abiertas sobre el tema de estudio a un panel de expertos y líderes de opinión; estas respuestas se analizan cualitativamente clasificando, categorizando y buscando temas comunes. Ese análisis posterior, permite el segundo cuestionario donde se evalúan preguntas más específicas, ya que se orientan a la calificación o clasificación de varios ítems que se analizan cuantitativamente. A medida que el investigador retroalimenta los resultados de las rondas anteriores, tiende a converger hacia un consenso de opinión⁶⁵.

La aplicación del método Delphi en el proyecto, se les realizó por medio de un cuestionario en dos rondas a miembros ejecutivos de la empresa en cuestión (dado el conocimiento de la situación actual del municipio), con la finalidad de determinar relevancias e importancia relativa sobre las alternativas y los criterios considerados.

- **Ronda 1:** aplicación de cuestionario para la definición de la importancia relativa entre los criterios considerados.
- **Ronda 2:** aplicación de cuestionario para la definición de la importancia relativa de las alternativas seleccionadas frente a los criterios.

3.3 MODELO DE PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

El modelo de Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés que corresponden a Analytic Hierarchy Process), es un método basado en relevancias en el cual se definen criterios de decisión frente a las diferentes alternativas y sus respectivos pesos por medio de matrices⁶⁶; el modelo AHP es un método que selecciona alternativas en función de una serie de criterios o variables, normalmente jerarquizados, los cuales suelen entrar en conflicto⁶⁷. Este procedimiento se repite teniendo en cuenta todos los criterios; la suma ponderada de estos valores indica las alternativas dominantes y por lo tanto la clasificación de los mismos.

El modelo AHP ha sido aplicado en diversos escenarios en la toma de decisiones como, por ejemplo: la selección de una alternativa a partir de un conjunto de alternativas, la priorización de un conjunto de alternativas, y la gestión de la calidad. Además, de ser aplicado en áreas como la salud, planificación de proyecto, comercialización, entre otros más.

⁶⁵ THANGARATINAM, S and C. W. Redman, The Delphi technique. *Obstet. Gynaecol.* Vol. 7, no. 2, pp. 120– 125, 2005.

⁶⁶ R. Navneet, Bhushan; Kanwal, "The Analytic Hierarchy Process". In *Strategic Decision Making*, London: Springer-Verlag London, 2004, pp. 1–11.

⁶⁷ SAATY, T.L... *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill. 1980

3.3.1 Selección y descripción de criterio en alternativas consideradas. Para que el método AHP sea eficaz, es fundamental elegir bien los criterios, los cuales deben estar muy bien definidos, ser relevantes y mutuamente excluyentes (independencia entre ellos). Es importante que el número de criterios en cada nivel no sea superior a siete (7), para evitar excesivas comparaciones a pares⁶⁸.

La selección de los criterios se ejecutó en base a la bibliografía consultada de Perpiñan⁶⁹ y Galarza⁷⁰, teniendo en cuenta el impacto que tiene sobre las diferentes alternativas y evaluando la incidencia a lo hora de realizar una elección de implementación de un proyecto. Los criterios seleccionados son: a) económico, b) técnico, c) ambiental, d) social, e) normativo y d) mantenimiento. La descripción de cada criterio se muestra en la siguiente tabla, explicando los factores más relevantes de cada criterio, y los cuales son tenidos en cuenta a lo hora de asignar un valor cuantitativo en el cuestionario.

Tabla 13. Descripción de los criterios considerados para el modelo AHP.

Criterio	Indicadores
Económico	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de inversión en infraestructura, equipos, mano de obra, puesta en marcha, interventoría e instalación. • Análisis financiero del proyecto. • Costos operativos.
Técnico	<ul style="list-style-type: none"> • Periodo de entrada en operación del proyecto. • Etapas de tratamiento requeridas. • Nivel de compatibilidad con el plan maestro (políticas de desarrollo).
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el impacto sobre ecosistemas, cuencas. • Maximizar el aprovechamiento de fuentes alternas de suministro actual.
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Beneficio directo hacia la comunidad. • Potencializar actividades relacionadas a las alternativas.
Normativo	<ul style="list-style-type: none"> • Requerimiento de parámetros para el cumplimiento de normas, decreto o leyes.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de ejecución plan de mantenimiento. • Técnica de mantenimiento predictivo. • Costos de mantenimiento.

Fuente: elaboración propia

⁶⁸ PISQUERAS, V. Proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP). Universitat Politècnica de Valencia. 2018. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>

⁶⁹ PERPIÑAN, Adrián. Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector institucional. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2013. p 72

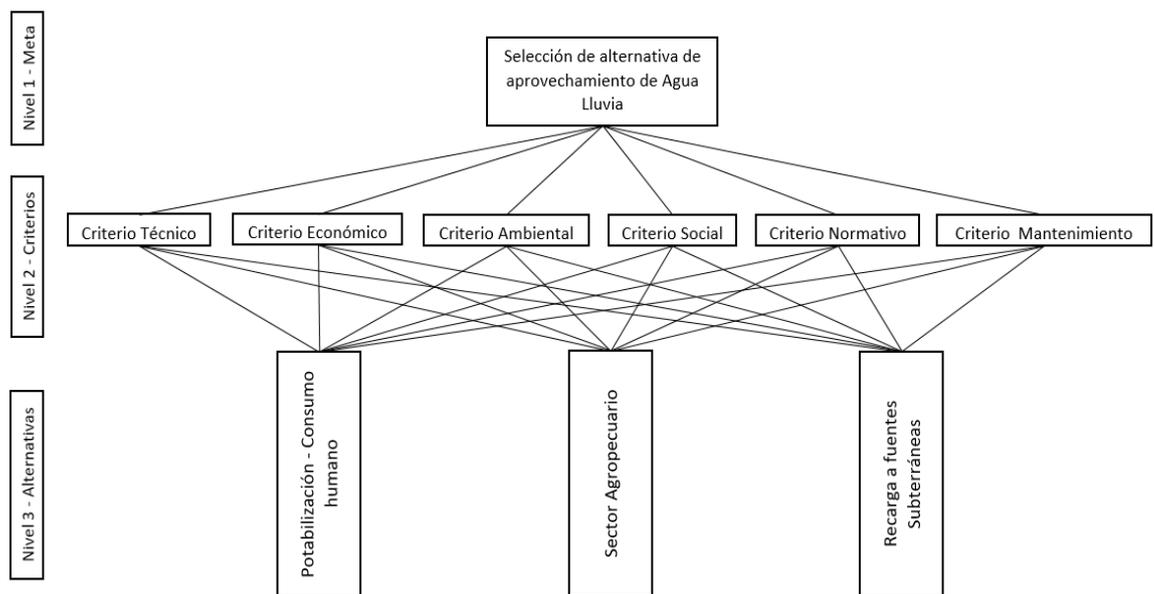
⁷⁰ Galarza, Sandra. Desarrollo de una herramienta de análisis multicriterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia. 2011

Las alternativas, como se expusieron al inicio del capítulo del tercer capítulo y a lo largo del contenido del documento, argumentando sus ventajas y alcance mediante la implementación son las siguientes.

- a) Potabilización
- b) Sector agropecuario
- c) Recarga a fuentes subterráneas

3.3.2 Metodología de aplicación del modelo AHP. El desarrollo del modelo inicia con la descomposición jerárquica en objetivos o metas, criterios, y alternativas consideradas para el aprovechamiento del agua lluvia. Esta relación se plantea por niveles y de esta manera se busca que todos los elementos queden interconectados, al menos de manera indirecta. En esta estructura jerárquica, el objetivo final se encuentra en el nivel más elevado (nivel 1), y los criterios y alternativas en los niveles inferiores (nivel 2 y 3). La estructura aplicada se muestra a continuación evidenciando la confección de cada aspecto.

Ilustración 17. Estructura AHP para el análisis de selección de alternativa de aprovechamiento de agua lluvia.



Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos de los cuestionarios derivados del método Delphi, una vez definida la estructura jerárquica, se comparan los criterios de cada grupo del mismo nivel jerárquico y la comparación directa por pares de las alternativas respecto a los criterios del nivel inferior. Para ello se utilizan la escala de preferencia de pares descrita por Saaty⁷¹, por la cual lograr dar un valor numérico a una apreciación cualitativa, como se muestra en la Tabla 14.

⁷¹ SAATY, T.L... The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill. 1980

Tabla 14. Escala de Preferencia por pares (Saaty)

Opción	Valor numérico
Ambos criterios tienen la misma importancia	1
Un criterio es moderadamente más importante que los otros (preferencia débil)	3
Un criterio es mas importante que los otros	5
Un criterio es mucho mas importante que los otros	7
Un criterio es extremadamente mas importante que los otros	9
Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	2-4-6-8

Fuente: Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill. 1980

La comparación de las diferentes alternativas respecto al criterio del nivel inferior de la estructura jerárquica, como la comparación de los diferentes criterios de un mismo nivel jerárquico dan lugar a una matriz cuadrada denominada “**matriz de comparación**”, donde sus elementos diagonales son igual a uno. Esta matriz cumple con las propiedades de reciprocidad (donde si $a_{ij}=x$, entonces $a_{ji}=1/x$), *homogeneidad* y consistencia (la matriz no debe contener contradicciones en la valoración realizada). La normalización correspondiente de la matriz de comparación, dan la importancia relativa (pesos alternativos) de los diversos criterios y alternativas que se comparan.

Lo primero es establecer etiquetas para cada uno de los criterios y alternativas a comparar, con el fin de facilitar los cálculos y referenciar su representante, como se muestra a continuación.

Ilustración 18. Etiquetas para criterio y alternativas.

<u>Ítem</u>	<u>Criterios</u>	<u>Ítem</u>	<u>Alternativa</u>
A	Económico	1	Potabilización
B	Técnico	2	Agropecuario
C	Social	3	Recarga subterránea
D	Ambiental		
E	Normativo		
F	Mantenimiento		

Fuente: elaboración propia

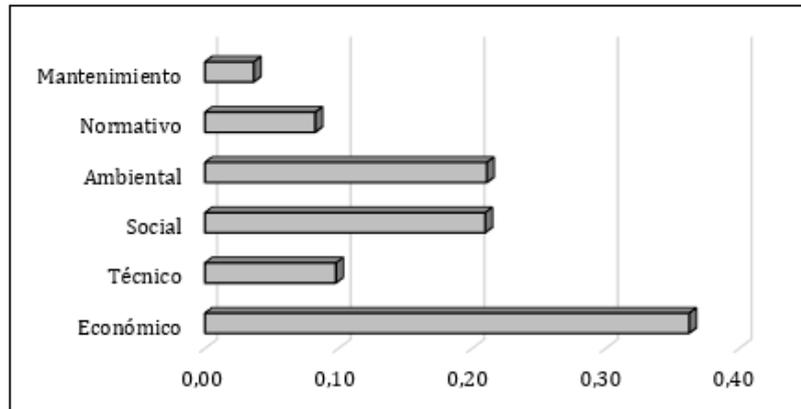
Posterior a su etiquetado, se elabora la matriz de comparación con los resultados de los cuestionarios y su subsiguiente cuantificación con la escala de preferencia, entre los criterios Tabla 15.

Tabla 15. Determinación de pesos alternativos para los criterios (Modelo AHP)

Criterio	A	B	C	D	E	F	$\prod_{i=1}^6$	$(\prod_{i=1}^6)^{1/6}$	Pesos Alternativos
A	1	4	1	3	5	8	480	2,7982	0,3624
B	1/4	1	1/4	2	1/2	3	0,19	0,7565	0,0980
C	1	4	1	1/4	3	6	18	1,6189	0,2097
D	1/3	1/2	4	1	4	7	18,667	1,6287	0,2110
E	1/5	2	1/3	1/4	1	2	0,067	0,6368	0,0825
F	1/8	1/3	1/6	1/7	1/2	1	0,000	0,2814	0,0364
Total	2,908	11,8333	6,7500	6,64	14	27		7,7204	1,0

Fuente: elaboración propia

Gráfico 1. Distribución de los pesos alternativos para los criterios.



Fuente: elaboración propia

Determinar la consistencia de la matriz de orden n , ayuda a evidenciar si los resultados suministrados a la matriz deben ser reevaluados, para ello el índice de consistencia **CI**, aunque, el modelo AHP puede tolerar la inconsistencia a través de la cantidad de redundancia, si valor debe ser cercano a cero para obtener la máxima consistencia posible. El índice de consistencia, se calcula en base en la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Índice de consistencia (CI)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Fuente: Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill. 1980

, donde λ_{max} es el auto valor máximo de la matriz y n el número de criterio o alternativas comparadas.

Este índice de consistencia calculado, se puede comparar con el de una matriz aleatoria, **RI** planteada por Saaty, los cuales toman valores según el número de criterio o alternativas comparadas en la matriz, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Índice aleatorio (RI)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fuente: Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill.

Por último, se determina la Relación de consistencia, **CR**, la cual relaciona el índice de consistencia **CI**, con el Índice aleatorio **RI**. Saaty sugiere que el valor de **CR** debe ser menor que 0,1 (10 %) para validar que se cumple con la consistencia del método AHP. Los resultados de estos indicadores se evidencian en la Tabla 17.

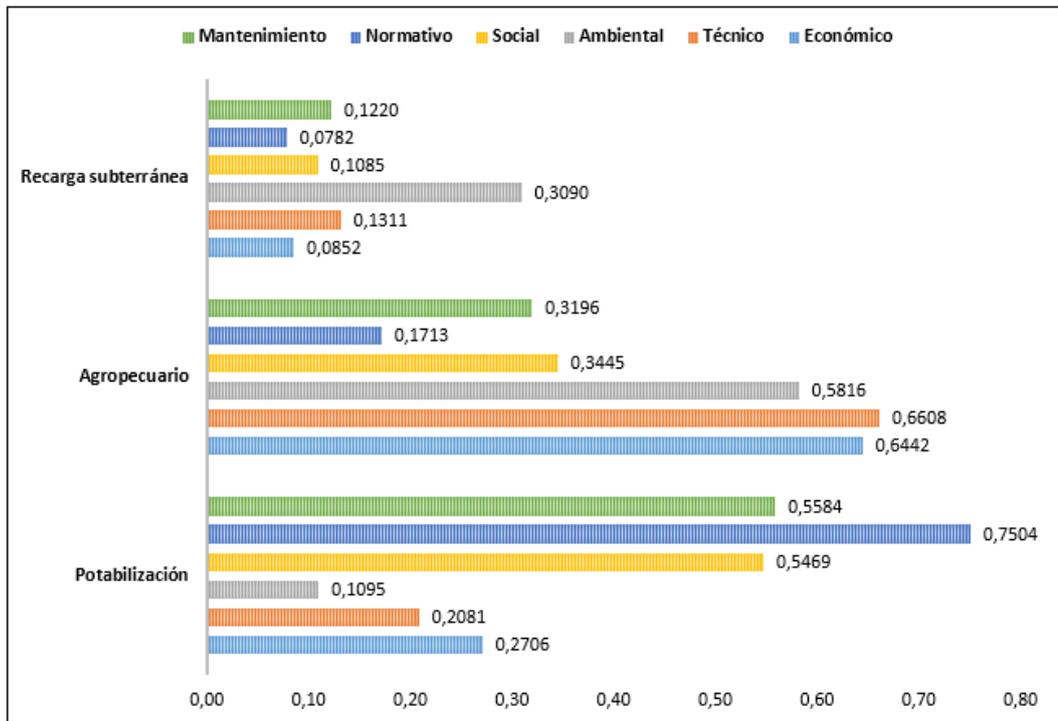
Tabla 17. Determinación de la consistencia de los criterios (Modelo AHP)

Descripción	Valor
λ_{max}	7,1598
Criterios (n)	6
Índice de Consistencia (CI)	0,2320
Índice Aleatorio (RI)	1,24
Relación de Consistencia (CR)	0,0980

Fuente: elaboración propia

El mismo procedimiento anteriormente descrito, se les realizó a las tres (3) alternativas propuestas de aprovechamiento de agua lluvia, evaluando la comparación de cada criterio en las alternativas. De allí, se determinaron sus pesos alternativos correspondientes a cada criterio evaluado y posteriormente, su distribución cuantitativa de los pesos calculados. Dicha distribución, se evidencia en la siguiente gráfica, donde se exponen sus pesos, derivados del cuestionario y asegurando la consistencia de los datos suministrados a las matrices, con un valor de la relación de consistencia, **CR**, menor al 0,1 (10%) para validar la congruencia del método AHP expuesta por Saaty.

Gráfico 2. Distribución de los pesos alternativos para las alternativas en relación a los criterios.



Fuente: elaboración propia

Como conclusiones de esta primera parte de la aplicación del modelo AHP, se puede evidenciar que bajo el criterio evaluado, por medio método Delphi, la comparación entre los seis criterios considerados para la selección de la mejor alternativa de aprovechamiento de agua lluvia en el casco urbano del municipio de Tenjo, el criterio que posee una mayor relevancia y ponderación frente a los demás, es el criterio económico con un peso alternativo de 0,3624, seguido del criterio ambiental (0,2110) y el criterio social (0,2097), como se evidencia en la Figura 1.

Esto se debe principalmente al análisis financiero que elabora la empresa para soportar la inversión de capital, evaluando subcriterio que tienen que ver con el crecimiento del ingreso que implica la puesta en marcha de los aprovechamientos productivos y están directamente relacionados a la generación de valor agregado y a su forma de distribución y gasto, pues el incremento en el ingreso regional será tanto mayor cuanto más grande sea la parte del gasto que se realice dentro de la región⁷². Por otra parte, el criterio ambiental enfoca sus indicadores a subcriterios donde se enfatiza la búsqueda de maximizar el aprovechamiento de fuentes alternas de suministro que se encuentra actualmente, y el impacto que ejerce la alternativa sobre el sector

⁷² OEA. Criterios de la evaluación de las alternativas. Capítulo XII. Organización de los Estados Americanos. Disponible en: <http://www.oas.org/usde/publications/unit/oea22s/ch19.htm#13.1.3%20impacto%20econ%C3%B3mico>

ambiental donde se llegara a implementar. Por último, el criterio social previsto de productores rurales como porcentaje de los actualmente existentes a nivel regional, al igual que, distinguir las posibles mejoras de las condiciones actuales en relación con la distribución y tenencia del recurso hídrico.

Por medio de la Figura 2, se evidencia el comportamiento de los pesos alternativos de cada alternativa, comparadas frente a cada criterio considerado y así, demostrar la incidencia e importancia de cada criterio sobre las alternativas. Para la alternativa de potabilización, el criterio con mayor peso, en relación a las demás, es el normativo; dado que esta alternativa se reglamenta por las normas y/o decretos más estrictos en términos de calidad, necesarios para obtener un recurso óptimo para el consumo humano, y no atentar contra la salud pública. Para ello, requiere de varias etapas de tratamiento, lo cual afecta el criterio económico incrementando los costos evaluados drásticamente, a su vez, el criterio de mantenimiento y técnico, dado que existe una relación de estos criterios, en basa al número de etapas de tratamiento requeridas. El criterio social talvez es el que más favorezca esta alternativa, sustentado en la situación actual y futura sobre la posible escasez de este recurso de alta importancia para las actividades diarias y el desarrollo de la comunidad.

Para la alternativa de aprovechamiento de agua lluvia, con aplicación hacia el sector agropecuario muestra una mayor relevancia en el criterio técnico dado que la dirección de implementación no va en contravía a la del plan maestro de desarrollo municipal, el cual busca potencializar el sector agro que tiene un alto porcentaje en las actividades regionales. También se debe, al que el tratamiento requerido no contempla de muchas etapas para obtener un recurso adecuado para el sector, haciendo que sus costos asociados (financieros y de mantenimiento) sean menores con respecto a la potabilización. El criterio ambiental, se ve favorecido en esta alternativa, puesto que, su implementación aportará un impacto notable en regiones rurales que se dediquen a actividades agropecuarias, cuando se presenten épocas de sequía y desabastecimiento del recurso. El criterio de menos peso alternativo en relación a las otras dos alternativas, es el normativo, establecido por las normas con parámetros menos rigurosos para el recurso final.

Por último, la recarga a fuentes subterráneas de extracción presenta los menores pesos en casi todos los criterio evaluado en el modelo AHP, con excepción del criterio ambiental debido al impacto positivo sobre el ecosistema de los acuíferos; sin embargo, es posible que se necesiten extensas áreas de tierra para la operación y mantenimiento del sistema de suministro de agua, elevando sus costos de inversión, monitoreo y operacional⁷³. Además, requiere de estudios

⁷³ EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Water Reuse. Washington, DC. 2004. p 37. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/20_04

específicos sobre características geológicas e hidrológicas para determinar la capacidad de almacenamiento total utilizable y la velocidad de movimiento del agua desde los terrenos de expansión hasta el área de extracción de agua subterránea, lo cual dificulta su implementación técnica.

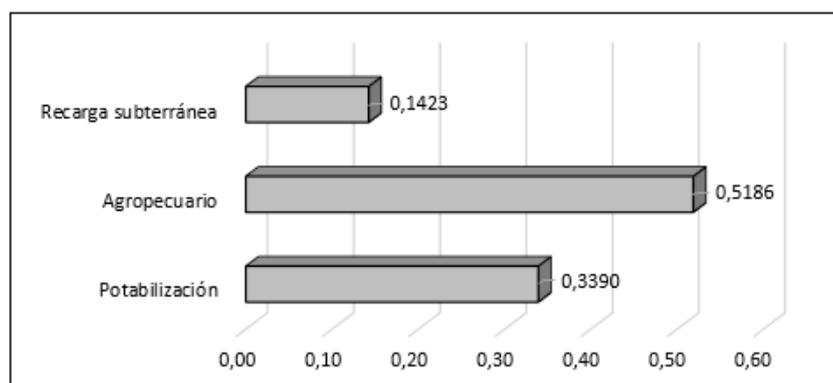
3.3.3 Selección de la mejor alternativa de aprovechamiento. El último paso del modelo AHP, partiendo de los pesos alternativos previamente determinados tanto para los seis (6) criterios, como para las tres (3) alternativas propuestas, es ponderar los valores de los pesos de cada alternativa, con respecto a cada criterio comparado. Los resultados de la Tabla 18, permitirán obtener la mejor alternativa de aprovechamiento de agua lluvia para este caso de estudio.

Tabla 18. Determinación de valores ponderados para las alternativas (Modelo AHP)

Pesos de los Criterios	Criterio / Alternativas	1	2	3
0,3624	A	0,0981	0,2335	0,0309
0,0980	B	0,0204	0,0647	0,0128
0,2097	C	0,0230	0,1219	0,0648
0,2110	D	0,1154	0,0727	0,0229
0,0825	E	0,0619	0,0141	0,0065
0,0364	F	0,0204	0,0116	0,0044
	Total	0,3390	0,5186	0,1423

Fuente: elaboración propia

Gráfico 3. Distribución de los valores ponderados para las alternativas.



Fuente: elaboración propia

Según el análisis realizado mediante la aplicación del método AHP, por medio de la Figura 3, se muestra la mejor alternativa para el aprovechamiento de agua lluvia en municipio de Tenjo, Cundinamarca, es la alternativa de aplicación hacia el sector agropecuario, considerando los criterios económicos, técnicos, sociales, ambientales, normativos y de mantenimiento.

Los resultados obtenidos en este capítulo, serán una pieza clave para el desarrollo de los siguientes capítulos, los cuales abarcan el diseño del

tratamiento del recurso crudo (captado), guiado por la normatividad Nacional vigente para la alternativa seleccionada, y, por último, realizar el análisis financiero de la propuesta que sustente la viabilidad económica del proyecto. Cabe aclarar que, en los criterios económicos y técnicos, no se tuvieron en cuenta aspectos relacionados a la distribución y almacenamiento del recurso, dado que este apartado está fuera de la delimitación planteada.

4. DESARROLLO DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA LLUVIA

Para ejecutar un plan de diseño para una planta de tratamiento, se requiere determinar ciertos aspectos importantes, donde se deben identificar el flujo de trabajo al cual va a operar la planta, los objetivos que buscan alcanzar y los procesos físicos y/o químicos que se requieren para lograrlos.

4.1 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS FRENTE A NORMATIVIDAD

Con un consolidado ponderado de algunas características físicas y químicas del agua lluvia por escorrentía, el paso siguiente para elegir un tratamiento, es evidenciar cuales parámetros cumplen o están fuera de especificación con respecto a la normatividad preestablecida por entes Gubernamentales, e internacionales. Esto permite crear filtros sobre las posibles etapas de tratamiento que se puedan llegar a requerir, para alcanzar los límites permisibles por ley en cada parámetro evaluado. La comparación de cada parámetro obtenido en el diagnóstico y su criterio se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 19. Comparación del diagnóstico de agua lluvia contra la normatividad para el sector agropecuario.

Parámetro	Unidades	Valor	Valor uso Agropecuario	Criterio
pH	und.	6,85	4,5-9,0	Cumple
Conductividad	mS/cm	16,61	-	NA
Sólidos Suspendidos (SS)	mg/L	51,98	5,0-35	No Cumple
Sólidos Totales (ST)	mg/L	73,48	-	NA
Sólidos sedimentales (SST)	mg/L	37,35	-	NA
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg O ₂ /L	58,06	20-50	No Cumple
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	51,33	-	NA
Turbidez	UNT	65,86	0,2-35	No Cumple
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	46,86	-	NA
Aceites y grasas	mg/L	1,97	-	NA
Hidrocarburos disueltos	mg/L	2,67	-	NA
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L DO	4,96	-	NA
Nitritos	mg/L NO ₂	0,08	10,0	Cumple
Nitratos	mg/L NO ₃	0,09	100,0	Cumple
Demanda Biológica de Oxígeno, DBO ₅	mg O ₂ /L	32,44	-	NA
Color Verdadero	UPC	37,07	-	NA
N-NH ₄	mg/L	2,50	-	NA
Pb	mg Pb/L	0,17	5,0	Cumple
Cu	mg Cu/L	0,13	0,20	Cumple
Cd	mg Cd/L	0,06	0,01	No Cumple
Ca	mg Ca/L	29,46	-	NA
Fe	mg Fe/L	0,19	5,0	Cumple
Mn	mg Mn/L	0,03	0,20	Cumple
Hg	mg Hg/L	0,14	0,01	No Cumple
Zn	mg Zn/L	0,06	2,0	Cumple
Ni	mg Ni/L	0,011	0,20	Cumple
Coliformes Fecales	UFC/100mL	240,0	1-200	No Cumple
Escherichia coli	UFC/100mL	170,0	-	NA

Fuente: elaboración propia

Como se denota, por medio de la normatividad existente tanto Nacional como internacional, no es posible determinar un criterio para todos los aspectos evaluados en este proyecto. Por ende, hay parámetros que independientemente de que no sean reglamentados, mediante que tratamientos en paralelo pueden mejorar su concentración, al igual, que optimizar este recurso para generar un mayor impacto, esto sin, implementar procesos adicionales que impliquen aumento de costos.

Por otra parte, los parámetros que acobijan la reglamentación expuesta, dan una línea de ruta hacia la selección de un proceso apropiado para adecuar estos parámetros y así, alcanzar los límites permisibles de la norma para un óptimo aprovechamiento de este recurso. También permite analizar, entre las opciones de tratamientos físicos y químicos, que proceso logran abarcar varios parámetros, con la finalidad de reducir el número de etapas de tratamiento, lo cual influye notablemente el aspecto económico del proyecto.

4.2 CÁLCULO CAUDAL DE DISEÑO

Para la estimación del caudal de diseño, se basó en la metodología expuesta por el Reglamento Técnico de agua potable y saneamiento básico (RAS)⁷⁴, se puede utilizar el método racional, el cual calcula el caudal medio del agua lluvia en base a la intensidad media del evento de precipitación municipal o regional, con una duración igual al tiempo de concentración, teniendo en cuenta el área de drenaje y un coeficiente de escorrentía superficial. La ecuación del método racional es la siguiente.

Ecuación 11. Caudal pluvial de diseño

$$Q = 2.78 \cdot C \cdot i \cdot A$$

Fuente: REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000. [consultado el 24 de junio de 2020] Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_d_.pdf

, donde **C** es el coeficiente de escorrentía superficial, **i** es la intensidad de la lluvia de diseño (mm/h) y **A** área de la cuenca (ha).

⁷⁴ RAS, Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento Básico. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000. Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_d_.pdf

De acuerdo con el método racional, el caudal medio usado para el diseño, ocurre cuando toda el área de drenaje (A) está contribuyendo, y este valor representa una fracción de la precipitación media del área de estudio. El método se aplica bajo las siguientes suposiciones mencionadas en el RAS y que se deben tener en cuenta para el diseño conceptual propuesto:

- 2.1 El caudal medio en cualquier punto es una función directa de la intensidad (i) de la lluvia, durante el tiempo de concentración para ese punto.
- 2.2 La frecuencia del caudal medio es la misma que la frecuencia media de la precipitación.
- 2.3 El tiempo de concentración está implícito en la determinación de la intensidad media de la lluvia.
- 2.4 El método racional es adecuado para áreas de drenaje pequeñas hasta de 700 ha.

4.2.1 Curvas de intensidad-duración-frecuencia (curvas IDF). Las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) permiten constituir la base climatológica para la estimación de los caudales de diseño. Estas curvas sintetizan las características de los eventos extremos máximos de precipitación de la zona de estudio, y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con periodos de retorno específicos⁷⁵ (Tr). El desarrollo para las curvas, se plantea utilizar un análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función Gumbel⁷⁶.

La ejecución de las curvas IDF para una localidad específica, por lo general, son realizadas por entes encargados en la recolección y manejo de datos hidrológicos de aquellas zonas mediante estaciones pluviográficas; para el caso de Colombia, esta tarea se delega a instituciones públicas como el IDEAM y las Corporaciones Autónomas Regionales, CAR. En el caso de la no existencia de la curva IDF para el área de estudio específico, es necesario obtenerlas a partir de información existente de precipitaciones de estaciones localizadas en la zona lo más cercanas a la población.

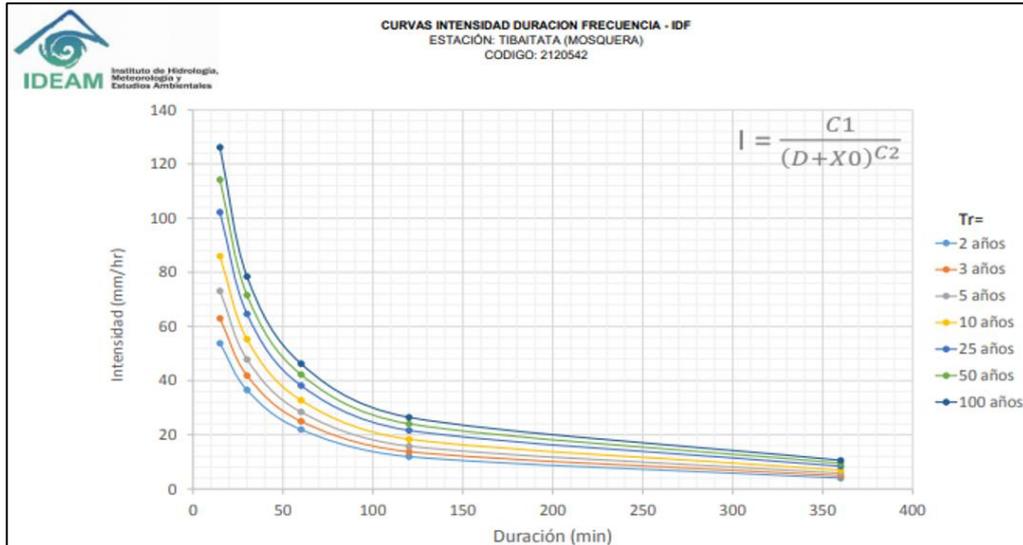
Dado que no es posible recolectar información completa y concisa sobre la zona de estudio (Tenjo), y siguiendo las sugerencias propuestas por el RAS; se tomó como referencia al municipio de Mosquera, por la existencia de una curva IDF y su límite territorial cercano. La curva se realizó en un periodo de recolección de

⁷⁵ RAS, Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento Básico. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000. p 44-45

⁷⁶ CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. Manual de Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 1994. p 584

datos de 31 años, en la estación pluviométrica “Tibaitata”, con fecha de ejecución el 15 de marzo del 2017, la cual, se muestra en la siguiente Figura.

Gráfico 4. Curvas IDF estación Tibaitata (Mosquera).



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. *Curvas IDF estación Tibaitata (Mosquera)* [consultado el 26 de junio de 2020] Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/10182/24541172/IDF_21205420_TIBAITATA.pdf/8d202c9b-26c5-4dd8-9ef6-a992c63b04f1?version=1.0

Como lo menciona el RAS, para seleccionar una intensidad media que sea justificada para el cálculo del caudal de diseño, es preciso, determinar un periodo de retorno representativo, en base al área de la cuenca en hectáreas. Para áreas tributarias entre 10 – 1000 ha, es recomendado, identificar la intensidad de la lluvia mediante la curva IDF, para un periodo de retorno (Tr) igual a 10 años. Para este caso de estudio, con un Tr igual a 10 años y con un tiempo de duración, D de 100 minutos (tiempo de media precipitación), la intensidad para el cálculo del caudal de diseño es $i = 20,0 \text{ mm/h}$

4.2.2 Coeficiente de escorrentía superficial. El coeficiente de escorrentía, C , es función del tipo de suelo, del grado de permeabilidad de las superficies en la zona de estudio, de la pendiente del terreno y otros factores que determinan la fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía. En su determinación deben considerarse las pérdidas por infiltración en el suelo y otros efectos retardadores de la escorrentía que afecten al caudal de ingreso⁷⁷. Para áreas de drenaje que incluyan subáreas con coeficientes de escorrentía diferentes, el valor del coeficiente global representativo del área debe calcularse como el

⁷⁷ RAS, Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento Básico. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000. p 46-47

promedio ponderado con las respectivas áreas. Se utiliza la siguiente fórmula para calcularlo.

Ecuación 12. Cálculo del coeficiente de escorrentía ponderado.

$$C = \frac{(\sum C \cdot A)}{\sum A}$$

Fuente: REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000. [consultado el 24 de junio de 2020] Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_d_.pdf

Los valores de los coeficientes de escorrentía para los diferentes tipos de suelos requeridos para el cálculo del coeficiente ponderado, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 20. Coeficientes de escorrentía (C)

Tipo de superficie	C
Cubiertas	0,75-0,95
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0,70-0,95
Vías adoquinadas	0,70-0,85
Zonas comerciales o industriales	0,60-0,95
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0,75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre éstos	0,60-0,75
Residencial unifamiliar, con casas contiguas y predominio de jardines	0,40-0,60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0,45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques-cementerios	0,30
Laderas sin vegetación	0,60
Laderas con vegetación	0,30
Parques recreacionales	0,20-0,35

Fuente: REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000. [consultado el 24 de junio de 2020] Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_d_.pdf

Para determinar el área total de captación (**A**), y las subáreas dentro de la zona de estudio, fue necesario revisar los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio en cuestión. Por medio del Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial (SIG-OT) se definió el límite del casco urbano central del municipio de Tenjo⁷⁸, al igual, que el porcentaje en área de esta zona, para poder identificar y seleccionar el coeficiente de escorrentía respectivo para esa área en concreto, y así, calcular el coeficiente ponderado.

⁷⁸ SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA PLANEACIÓN Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL (SIGOT). POT municipales (Tenjo). Disponible en Internet: <https://sigot.igac.gov.co>

Los resultados de los planos cartográficos consultados, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 21. Áreas y subáreas del suelo urbano central en Tenjo.

SUELO URBANO CENTRAL (A)		54,8 ha
Área residencial (A1)	77%	42,2 ha
Área comercial y de servicios (A2)	10%	5,48 ha
Área recreacional (A3)	13%	7,12 ha

Fuente: elaboración propia

En base al valor (tamaño) de las subáreas obtenidas, derivadas del centro urbano del municipio de Tenjo y su descripción, es posible asignar un valor de C para obtener un coeficiente global ponderado por el caudal. Asumiendo que el 77% de la zona de estudio está comprendido por un suelo residencial, según el POT, donde en su gran mayoría se refiere a residencias familiares contiguas, rodeadas de calles en pavimento cercanas a los sumideros del alcantarillado, se da un valor de **C1** de **0,4**. Para el área comercial (10%) y de servicios, según su tipo de suelo, se le da un valor de **C2** igual a **0,6**. Por último, el área de recreación (13%), que corresponde a parques, zonas de actividades deportivas, entre otros, tiene un valor de **C3** igual a **0,2**. El cálculo del coeficiente ponderado queda de la siguiente forma:

$$C = \frac{\sum C * A_i}{\sum A_i} = \frac{(C1 * A1 + C2 * A2 + C3 * A3)}{A} = 0,43$$

Con el valor del coeficiente global ponderado, **C**, el valor de la intensidad de la lluvia de diseño, **i**, y un área del casco urbano total, **A**, de 54,8 ha; se determinó el caudal pico para el diseño, **Q**. El cálculo siguiendo la ecuación 11 queda así:

$$Q = 1310,2 L/s$$

4.3 SELECCIÓN DE ETAPAS Y PROCESOS DE TRATAMIENTO

El análisis para realizar una elección de etapas y los procesos de tratamiento en dichas etapas que permitan cumplir con los estándares establecidos en la normatividad expuesta para el sector agropecuario, inicia con la evaluación comparativa de parámetros físico y químicos (**apartado 4.1**), identificando que parámetros requieren una modificación. Como lo expresa Metcalf & Eddy, la metodología de selección depende de evaluar factores importantes de valoración en los procesos y las operaciones unitarios implicadas, además, de tener en

cuenta, la fiabilidad del proceso en el cumplimiento de las normativas vigentes⁷⁹. Dentro de los factores que exponen, resaltan los siguientes:

- **Factor aplicabilidad**, dependen directamente de la experiencia, dado que su evaluación parte de esta, como, por ejemplo, datos de plantas a escala o datos obtenidos en estudio de plantas pilotos.
- **Variabilidad de las condiciones del afluente**, puesto que las unidades de tratamiento deben tener suficiente capacidad para absorber y amortiguar estas variaciones de manera satisfactoria “equilibrio”.
- **El rendimiento de una planta**, es la medida de éxito del diseño, tanto si se analiza por la calidad del efluente, como si se analiza en base a los porcentajes de eliminación alcanzados por los contaminantes más importantes.
- **Las combinaciones de procesos y operaciones unitarias**, dado que la evaluación no se limita al estudio de las unidades de tratamiento, sino también, debe incluir la interacción entre las diferentes alternativas.
- **Las necesidades energéticas**, puesto que para proyectar sistemas de tratamiento con una relación coste-efectividad satisfactorio es necesario conocer las necesidades energéticas, así como el coste futuro de la energía empleada.

Basándose en los factores mencionado (fiabilidad, variabilidad, rendimiento, combinación y requerimiento energético), al igual, teniendo en cuenta criterios analizados en la elaboración del método de selección de alternativas, donde el principal y de más peso, es el criterio Económico. Básicamente, el tratamiento constaría en la remoción de materia y carga orgánica, dado que los parámetros identificados para ajustar (SST, DQO y Turbidez), depende directamente de este proceso físico.

Las unidades de proceso unitarios seleccionadas bajo criterios y factores, se facilita con la información proporcionada por Metcalf & Eddy, donde por medio de la Tabla 22, donde evalúa diversos tratamientos frente a la remoción de ciertos parámetros mencionados, empleados en el pretratamiento y tratamiento primario.

⁷⁹ METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Terceros edición, Vol 1. McGraw Hill. 1995 p. 191-196

Tabla 22. Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario.

Unidades de tratamiento	Rendimiento de eliminación del constituyente, porcentaje					
	DBO	DQO	SS	P ^b	N-Org ^c	NH ₃ - N
Rejas de barras	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo
Desarenadores	0-5 ^d	0-5 ^d	0-10 ^d	nulo	nulo	nulo
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0
Fangos activados (proceso convencional)	80-95	80-85	80-90	10-25	15-50	8-15
Filtros percoladores						
Alta carga, medio pétreo	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15
Carga muy alta, medio sintético	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15
Biodiscos (RBCs)	80-85	80-85	80-85	10-25	15-50	8-15
Cloración	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo

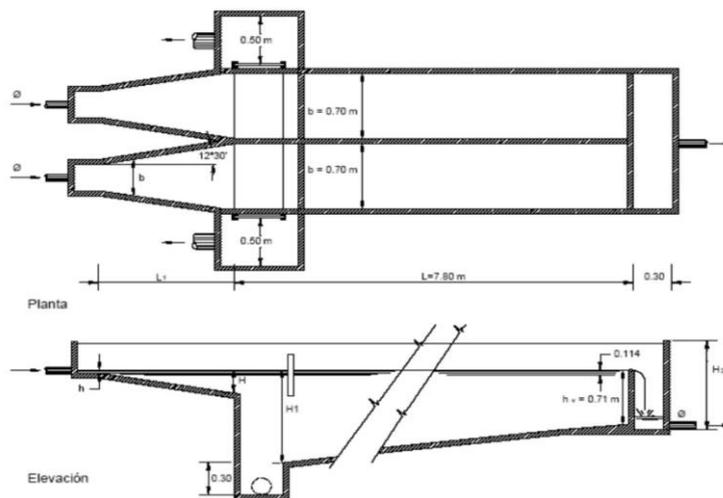
Fuente: METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Terceros edición, Vol 1. McGraw Hill. 1995. p. 519

Evaluando las cinco opciones de unidades de tratamiento presentadas, se puede evidenciar los procesos unitarios de Fangos activados, Filtros percoladores y Biodiscos, son unidades que su funcionamiento se basan en un proceso biológico, es decir, está directamente relacionado a la interacción de agente microbianos, lo que las hace ideales para implementar sobre aguas residuales que presente una alta carga orgánica. Sumado a estos, generalmente, estas unidades requieren de procesos previos que favorezcan al rendimiento global de la planta, lo que produce que se requiera un mayor número de operaciones de tratamiento, elevando drásticamente la evaluación sobre criterios especialmente críticos como el económico y el criterio técnico anteriormente evaluados. Por otro lado, los procesos unitarios de tratamiento, como el desarenador y el sedimentador primario, son unidades estándares que pueden ser aplicadas a diversos tipos de aguas contaminadas con cargas orgánicas medias o leves, de acuerdo a sus características y rendimiento teóricos, además, que se pueden adecuar como unidades consecutivas para garantizar la efectividad del tratamiento

El tratamiento global, requiere de proceso y/u operaciones adicionales que ayuden a alcanzar la normatividad vigente, por ende, se deben complementar las etapas de pretratamiento y tratamiento primario. Dada las características del agua lluvia de escorrentía, que es captada y transportada por el sistema de alcantarillado pluvial del casco urbano, el contenido de contaminantes de un tamaño considerable es retenido por medio de **sumideros de reja o calzada** (ilustración 8) ubicados en los sumideros viales, estos se consideran como el primer pretratamiento del agua lluvia de escorrentía.

4.3.1 Desarenador. El agua lluvia de escorrentía luego de circular por toda la red del sistema de alcantarillado en el casco urbano, y de homogenizarse, forma el afluente que será tratado con las propiedades fisicoquímicas expuestas en el diagnóstico. El caudal de diseño de referencia corresponde al cálculo en el apartado 4.2, tendrá como etapa de pretratamiento, el proceso de desarenado, con la finalidad de remover arenas, grava, partículas u otro material sólido que tenga velocidad de asentamiento, o peso específico bastante mayor⁸⁰. El desarenador rectangular de flujo horizontal consta de dos canales donde se proyecta que la velocidad más cercana sea de 0,3 m/s, y que proporcione suficiente tiempo como para que sedimente en el fondo del canal las partículas de arena⁸¹.

Ilustración 19. Desarenador rectangular de flujo horizontal



Fuente: METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Terceros edición, Vol 1. McGraw Hill. 1995. p. 524

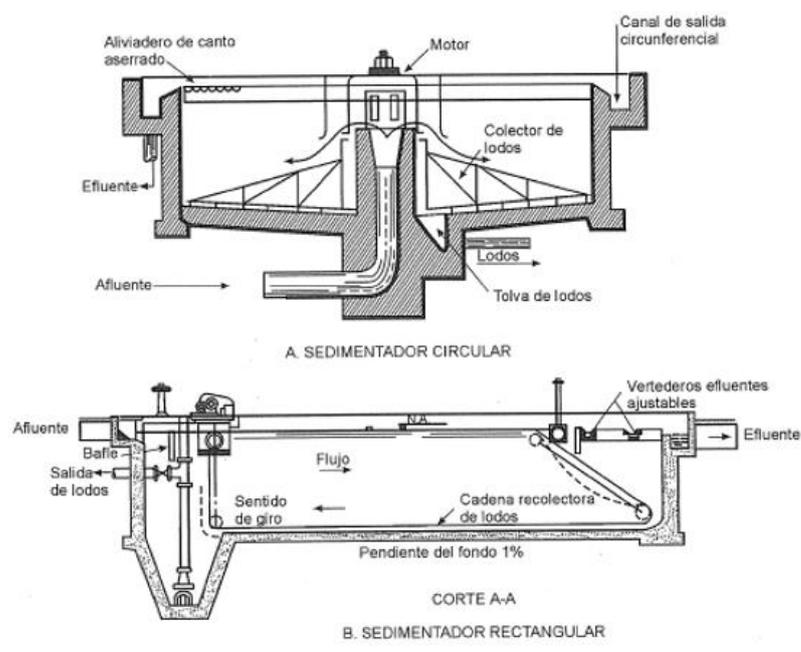
4.3.2 Sedimentación primaria. El efluente obtenido del desarenador que aún se compone por un alto contenido de sólidos sedimentables (SS), requiere de un proceso unitario para remover una gran porción de esos sólidos. Unos de los procesos de tratamiento de mayor aplicabilidad para eliminar este residuo es la sedimentación, aunque existe varias etapas (primario, intermedio, secundario y terciario), para el tipo de objetivo normativo, no es necesario implementar las cuatro etapas, por ende, se requiere de solo una *sedimentación primaria*. La sedimentación se realiza en tanques que pueden ser rectangulares o circulares.

⁸⁰ ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición. 2004. p 293-294

⁸¹ METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Terceros edición, Vol 1. McGraw Hill. 1995. p. 522

En los tanques rectangulares, el agua entra cerca de la superficie y se mueve a lo largo del tanque con una velocidad muy baja mediante deflectores, hasta descargar por el extremo opuesto del vertedero. El material sólido sedimentable se deposita en el fondo del tanque y es arrastrado hacia una tolva de lodos por un sistema mecánico de barrido, extraído periódicamente para su tratamiento y disposición. Por otro lado, los sedimentadores circulares, al agua cruda ingresa por aberturas en la parte superior del tanque, y fluye radialmente hacia el vertedero perimetral de salida. Está dotado por una barredora de lodos que dirige los sólidos sedimentables hacia la tolva en el centro del tanque.⁸²

Ilustración 20. Sedimentador primario. (Circular y rectangular)

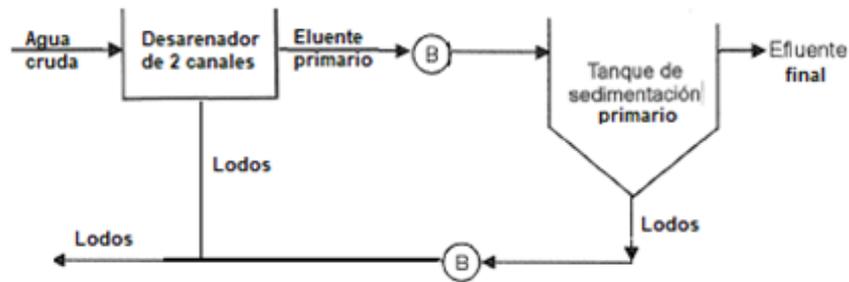


Fuente: ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición. 2004. p 636

4.3.3 Esquema general del proceso de tratamiento. Consecuente a la selección de etapas de pretratamiento y tratamiento primario, complementado por procesos adicionales, como la implementación de biofiltros para optimizar los rendimientos del proceso, además, de satisfacer los requerimientos vigentes de ley. El esquema global del tratamiento del agua lluvia de escorrentía para el casco urbano del municipio de Tenjo se muestra en la siguiente ilustración

⁸² ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición. 2004. p 633-639

Ilustración 21. Esquemas general del tratamiento.



Fuente: elaboración propia

La selección de los procesos para el tratamiento, como se comentó en los factores a tomar en cuenta en el *apartado 4.3*, donde uno de ellos era, el rendimiento de la planta en conjunto, y de los diferentes procesos por separado, con la finalidad de asegurar que el propósito final se cumpliera a total cabalidad. Por ende, es necesario referenciar los rendimientos teóricos basándose en bibliografía para cada proceso en específico, dado el tipo de investigación que se está llevando en este proyecto.

Para el proceso de desarenado y sedimentación primaria, como se evidencia en la Tabla 22, los porcentajes de remoción para parámetros como DBO, DQO y SS necesario de un tratamiento según la comparación previa frente a la normatividad, son:

- **Desarenador:** DBO (0-5%), DQO (0-5%) y SS (0-10%).
- **Sedimentación primaria:** DBO (30-40%), DQO (30-40%) y SS (50-65%).

Es importante mencionar que el evento de precipitaciones, posterior a cuando se presenta el pico de intensidad de lluvia, y simultaneo al fenómeno de “**primer lavado**”, el flujo de escorrentía presenta parámetros fisicoquímicos menores a los reportados en el diagnóstico, por lo que inicia un proceso de dilución en el caudal sobre el final de las precipitaciones; por lo cual, no se requiere de procesos de tratamientos complementarios para adecuar el efluente final obtenido.

4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE PROCESO

Como primer parámetro de diseño de los equipos utilizados en los diferentes procesos de tratamiento, es importante definir el tipo de equipo en específico a implementar. Esta selección no influye en los rendimientos mencionados en el apartado anterior, sino depende mayormente a su capacidad de trabajo.

4.4.1 Dimensionamiento del desarenador de dos canales. Como primer proceso de tratamiento del agua lluvia de escorrentía, parte del caudal medio de diseño calculado anteriormente, y en base a este, se determina su dimensionamiento para una situación hipotética máxima. Como requisito para el diseño de un desarenador, es definir el caudal de diseño, el número de canales, la velocidad de sedimentación de acuerdo al diámetro promedio de partícula de los sólidos sedimentables, y en concreto para un desarenador de flujo horizontal, definir la profundidad efectiva y su velocidad horizontal de flujo⁸³.

Para determinar las velocidades de sedimentación de las partículas que quieren removerse, se sustentan bajo las fórmulas de Stokes (flujo laminar), Newton (flujo turbulento) y Allen (régimen transitorio), y su resumen se evidencia en la siguiente tabla. El diámetro de partícula de arena de gran tamaño transportada por la escorrentía posee un diámetro medio de 0,20 mm.

Tabla 23. Velocidades de sedimentación para diferentes tamaños de arenas a una temperatura de 16 °C

Diámetro de partícula	Velocidades de sedimentación
0,15 mm	40 a 50 m/h
0,20 mm	65 a 75 m/h
0,25 mm	85 a 95 m/h
0,30 mm	105 a 120 m/h

Fuente: MORENO López. Contaminación y tratamientos de aguas. Módulo 1. Universidad de Huelva: IV master oficial en tecnología ambiental. 2009-2010.

Para los demás criterios de diseño mencionados, se parte de los rangos expuestos por Lozano como los valores mínimos y máximos preestablecidos para el diseño de un desarenador. Está claro mencionar que estos valores se toman como una guía de diseño, no son estrictamente impuestos a lo hora de realizar un diseño de desarenadores. Los criterios se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 24. Criterio de diseño de los desarenadores

Parámetro	Valor o Rango
Velocidad de sedimentación (Cs)	40 a 70 m ³ /m ² h (a caudal punta)
Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	100 a 300 s (a caudal punta)
Velocidad horizontal (Vh)	0,20 a 0,40 m/s (a caudal punta)
Profundidad efectiva (P)	1,0 a 2,5 m

Fuente: LOZANO-RIVAS. Diseño de Plantas de Potabilización de Agua. Material de clase. Bogotá D.C., Colombia: [consultado el 28 de junio de 2020] Disponible en: <http://wlozano.blogspot.com>.

⁸³ LOZANO, William. Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. Bogotá, Colombia. p 59-62

Las ecuaciones de diseño para un desarenador, para dimensionar aspectos como área superficial (A_s), volumen efectivo (V), tiempo de retención hidráulica (TRH) y área transversal (A_t), ancho (B) y largo del canal (L), se muestran a continuación.

Ecuación 13. Ecuaciones de diseño de desarenadores

Área superficial	Área transversal canal
$Q = A \cdot V \therefore A_s = \frac{Q}{C_s}$	$Q = A \cdot V \therefore A_T = \frac{Q}{V_H}$
Volumen Efectivo	Ancho canal
$V = A_s \cdot P$	$B = \frac{A_T}{P}$
Tiempo de Retención Hidráulica	Largo desarenador
$Q = \frac{V}{TRH} \therefore TRH = \frac{V}{Q}$	$L = \frac{A_s}{B}$

Fuente: LOZANO-RIVAS. Diseño de Plantas de Potabilización de Agua. Material de clase. Bogotá D.C., Colombia: [consultado el 28 de junio de 2020] Disponible en: <http://wlozano.blogspot.com>.

Los resultados de los cálculos pertenecientes al dimensionamiento de un desarenador de dos (2) canales para el caudal punta de diseño **1310,2 L/s**, calculado para el agua lluvia de escorrentía, se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Criterios del dimensionamiento de un desarenador de dos canales

Criterios de diseño	Valor	Unidades
Caudal de diseño (Q)	1310,2	L/s
Caudal para cada canal	0,655	m ³ /s
Velocidad de sedimentación (Cs)	70	m/h
Profundidad efectiva (P)	1,5	m
Velocidad horizontal (Vh)	0,2	m/s
Área superficial (As)	33,69	m ²
Volumen efectivo (V)	50,53	m ³
Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	77,14	s
Área transversal canal (At)	3,28	m ²
Ancho canal (B)	2,18	m
Largo desarenador (L)	15,43	m

Fuente: elaboración propia

4.4.2 Dimensionamiento de un sedimentador primario circular. Los decantadores circulares son de mayor uso, debido a que facilitan las labores de mantenimiento y purga de fangos. El ingreso del agua se hace mediante una campana deflectora ubicada en el centro de la unidad que obliga a que el agua ingrese por la parte baja y, además, funciona como atenuadora de la energía de flujo, eliminando turbulencias que pueden afectar la decantación de las partículas. El agua es recogida por un canal perimetral dentado, para asegurar una salida homogénea del efluente clarificado en cada metro lineal de la periferia del tanque. El sistema de barrido de fangos se realiza a través de un puente móvil que se desplaza lentamente por todo el decantador y que posee en su fondo unas rasquetas que empujan los lodos hacia la poceta de fangos, la cual se encuentra ubicada en el centro del tanque.

Para el dimensionamiento de tanque circular para la sedimentación primaria, se requieren criterios de diseño iniciales como el caudal medio de diseño (Q_p), su velocidad de sedimentación (C_s) en base a las partículas, el número de unidades, y por último el tiempo de Retención Hidráulica (TRH). Similar a la secuencia de pasos realizadas en el diseño del desarenador, Lozano, expone rangos de valores sugeribles acerca de los criterios claves en el dimensionamiento de los tanques, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 26. Criterios de diseño para sedimentadores primarios circulares

Parámetro	Valor o Rango
Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	2 a 3 horas (sin tratamiento secundario posterior y a caudal punta) 1 a 2 horas (con tratamiento biológico posterior y a caudal punta)
Carga superficial (C_s)	2 a 3 m^3/m^2h (a caudal punta)
Capacidad de tratamiento de cada unidad	<0,25 m^3/h (a caudal medio)
Carga sobre el vertedero	<40 $m^3/h*m$ lineal del vertimiento perimetral (a caudal punta)
Profundidad del decantador	2,5 a 4,0 m
Pendiente de fondo hacia la poceta de fangos	2 a 8%
Relación diámetro/altura	5 a 16
Diámetro de la campana deflectora	15 a 20% del diámetro decantador
Altura de la campana deflectora	33 a 20% de la profundidad del decantador
Velocidad máxima perimetral del puente del decantador	<120 m/h
Características de la poceta de fangos	Capacidad de almacenamiento de lodos generados entre 1 y 5 horas

Fuente: LOZANO-RIVAS. Diseño de Plantas de Potabilización de Agua. Material de clase. Bogotá D.C., Colombia: [consultado el 28 de junio de 2020] Disponible en: <http://wlozano.blogspot.com>

Las ecuaciones utilizadas para el diseño de los tanques sedimentadores, permiten obtener las dimensiones de aspectos como el volumen del tanque (V), el área superficial del tanque (A_s), la altura del tanque (P), el diámetro del tanque (D), el perímetro del tanque (P), y la carga sobre vertedero (C_v). Esta serie de ecuaciones son las siguientes.

Ecuación 14. Ecuaciones para el diseño de un sedimentador primario circular

Volumen tanque	Diámetro tanque
$\nabla = Q_p \cdot TRH$	$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \therefore D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$
Área superficial tanque	Perímetro tanque
$A_s = \frac{Q_p}{C_s}$	$Perimetro = \pi \cdot D$
Altura tanque	Carga sobre vertedero
$P = \frac{\nabla}{A_s}$	$C_v = \frac{Q_p}{Perimetro}$

Fuente: LOZANO-RIVAS. Diseño de Plantas de Potabilización de Agua. Material de clase. Bogotá D.C., Colombia: [consultado el 28 de junio de 2020] Disponible en: <http://wlozano.blogspot.com>

Los resultados de los cálculos pertenecientes al dimensionamiento de dos tanques circulares para el proceso de sedimentación primaria, con un caudal punta de diseño **1310,2 L/s**, calculado para el agua lluvia de escorrentía, se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Resultados dimensionamiento de dos tanques circulares de sedimentación primaria.

Criterios de diseño	Valor	Unidades
Caudal medio de diseño (Qm)	1310,2	L/s
Velocidad de sedimentación (Cs)	3	m/h
Numero de unidades	1	-
Tiempo de Retención Hidraulica (TRH)	1	h
Volumen del tanque (∇)	4716,57	m ³
Area superficial del tanque (As)	1179,14	m ²
Altura del tanque (P)	4,00	m
Diametro del tanque (D)	38,75	m
Perimetro del tanque (P)	121,73	m
Carga sobre vertedero (Cv)	38,75	m ³ /h.m

Fuente: elaboración propia

Aplicando los rendimientos teóricos referenciados de Metcalf & Eddy (1995), para las unidades de tratamiento (desarenador y sedimentador primario), se puede obtener los valores teóricos del efluente, específicamente de los parámetros que estaban fuera de especificación, y no cumplían con la normatividad establecida para el sector agropecuario. Los parámetros como DBO, DQO y SS se pueden estimar directamente con los rendimientos referenciados, entre un límite mínimo y un límite máximo que se pueden esperar

después del tratamiento, y que a su vez, cumpla con la normatividad vigente. Los resultados se pueden evidenciar en la Tabla 28.

Tabla 28. Resumen de valores de parámetros en efluente

Parametro	Unidades	Afluente	Efluente final		Normativa	
			Limite min.	Limite max.		
Solidos Suspendidos (SS)	mg/L	51,98	16	-	26	5,0-35
Demanda Química de Oxígeno, DQO	mg O ₂ /L	58,06	33	-	41	20-50
Demanda Biológica de Oxígeno, DBO ₅	mg O ₂ /L	32,44	18	-	23	-

Fuente: elaboración propia

Para los demás parámetros como la Turbidez, algunos metales como Cd y Hg, al igual que los Coliformes fecales, sus porcentajes de remoción son difíciles de obtener teóricamente, por ende, no se puede establecer con precisión su valor en el efluente final. Estos valores dependerán de una prueba en planta piloto, o en un laboratorio para estos parámetros en específico. Sin embargo, se podría estimar que sus valores finales, comparados con los iniciales presentados en la caracterización del agua lluvia, y que, formarán parte del afluente que ingresa a la planta de tratamiento, sean menores, directamente por la unidades de tratamiento, además, del proceso de dilución que afecta positivamente al caudal de tratamiento, este se exhibe cuando las precipitaciones presentan una larga duración y la carga de contaminantes arrastrados es mucho menor⁸⁴.

⁸⁴ FAO. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar de América Latina. Santiago, Chile. 2013. p 16

5. ANÁLISIS FINANCIERO DE LA PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

Elaborar un análisis de financiero sobre el proyecto, requiere determinar costos de inversión, gastos operativos y gastos de mantenimiento de equipos/obras civiles implementados en la propuesta, con la finalidad de estimar los costos fijos y variables para analizar mediante indicadores financieros (Valor Presente Neto, VPN, relación Beneficio/Costo, y Periodo de recuperación) la viabilidad del proyecto.

Este análisis financiero también requiere, valorar económicamente los beneficios económicos que trae la implementación en el sector agropecuario, en términos de *superávits* de los consumidores y productores, es decir, la tarifa del recurso que se implementara para hacer viable la propuesta, y la relación precio producto obtenido y el costos de la producción beneficiada con el proyecto⁸⁵.

5.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN, GASTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M) DEL PROYECTO

Para el cálculo de ciertos criterios de análisis de costos de inversión y gastos operativos y de mantenimiento anuales abarcados en el análisis financiero, se partió del dimensionamiento de las unidades de proceso de tratamiento (desarenador de dos canales y sedimentador primario circular) para evaluar las cantidades requeridas en materiales de construcción y equipos electromecánicos, todo estos basados en el “*Informe de costos de inversión y de operación y mantenimiento de alternativas*”, el cual detalla los costos de diseño a nivel de ingeniería de la planta de tratamientos de aguas residuales **CANOAS**,⁸⁶ y complementando costos unitarios, por medio de cotizaciones sobre materiales y equipos específicos.

5.1.1 Determinación costos de inversión. Por medio del informe referenciado anteriormente, primero se logró identificar los ítems a grosso modo para los costos de inversión relacionados a obras civiles, equipos para cada unidad de proceso y sus respectivos costos adicionales de instalación, puesta en marcha e imprevistos [ANEXO D]. Los valores unitarios (COP) de referencia para materiales de las obras civiles, son complementados por cotizaciones

⁸⁵ FAO. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2013

⁸⁶ CDM SMITH. Informe de costos de inversión y de operación y mantenimiento de alternativas. Versión 03. 2014.

independientes [Anexo E]. Los costos detallados de cada unidad y un total de costos de inversión se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Costos de inversión del tratamiento

Costos de inversión tratamiento preliminar y tratamiento primario						
Ítem	Unidades	Valor unitario COP	Desarenador dos canales		Sedimentador primario circular	
			Cantidad	Valor total	Cantidad	Valor total
Obra civil						
Excavación y retiro de sobrantes	m ³	24.200	122,9	2.974.885	5.071	122.729.914
Rellenos	m ³	59.000	10,5	618.910	298	17.589.670
Preparación del suelo	m ²	62.500	67,9	4.243.125	130	8.125.000
Concreto de 5000 psi	m ³	445.341	15,7	7.009.667	119	53.106.914
Concreto de 3000 psi	m ³	390.523	-	-	9	3.327.256
Acero de refuerzo	Kg	4.800	3.138	15.061.341	24.370	116.973.825
Formaleta placa	m ²	49.052	60,0	2.943.120	195	9.565.140
Subtotal			32.851.049		331.417.719	
			364.268.767			
Equipos			31.705.098		422.752.272	
Instalación de equipos			7.926.275		105.688.068	
Automatización y control			1.585.255		21.137.614	
Imprevistos y contingencias			1.481.354		17.619.913	
TOTAL			75.549.030		898.615.586	
			974.164.616			

Fuente: elaboración propia

Los costos de las obras civiles para las unidades de tratamiento, abarcan costos trazables desde la extracción y acondicionamiento del terreno, hasta la construcción de refuerzos y estructuras de las unidades en concreto (3000 psi/210 Kg/cm² y 5000 psi/350 Kg/cm²) y varillas de acero. Las cantidades requeridas de materiales para las obras civiles, se determinaron en relación al dimensionamiento de los equipos, y en relación directa con la proporcionalidad descrita de las mismas unidades en el informe referenciado.

Cabe apreciar que los costos de instalación de equipos representan el **25%** del costo de los equipos, automatización y control el **5%** y los imprevistos y contingencias el **2%** del total de los costos de la inversión [ANEXO D]. El costo de equipos respectiva a la unidad del desarenador de dos canales incluye:

- Compuertas deslizantes de entrada a canales.
- Tornillos sin fin en canales.
- Bombas de arena (bomba Torque Flow), y
- Tolva para arenas.

Para la unidad del sedimentador primario circular, el costo total de equipos electromecánicos incluye:

- Rastrillos circulares.
- Bomba de lodos (bomba centrifuga).
- Bomba de drenaje (bomba centrifuga sumergible).

5.1.2 Determinación costos de operación y mantenimiento (O&M). El cálculo de los gastos de operación y mantenimiento del tratamiento, se dividen en dos secciones: la primera se refiere a los gastos de operación, costos de prestaciones de servicios y gastos energéticos de las unidades de tratamiento, y la segunda abarca el costo anual dirigido hacia el mantenimiento de equipos y obras civiles de cada unidad de proceso en el tratamiento de aguas lluvias.

Para determinar los costos de prestación de servicios, se tomó como referencia el Código Sustantivo de Trabajo⁸⁷, autorizado por el Ministerio de Protección Social, y que rige en todo el territorio Nacional, por el cual, se define la jornada ordinaria de 48 horas de trabajo a la semana. Partiendo del supuesto que la operación de la planta sería las 24 horas diarias y que requeriría de tres operarios técnicos con un salario base de 1'680.000 COP para cubrir tres turnos. El costo anual de las prestaciones de servicio de los operarios y todos sus porcentajes de aportación por parte del empleador, se ajustaron al año en curso (2020) y tomados del informe de referencia. Estos costos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 30. Costos anuales sobre prestación de servicios.

Costos de prestación de servicios			
Ítem	Porcentaje	Valor COP/Persona	Valor total COP
Sueldo	100%	1.680.000	5.040.000
Auxilio de transporte	-	102.854	308.562
Prestaciones sociales			
Cesantías	-	1.782.854	5.348.562
Intereses sobre las cesantías	12% (Cesantías)	213.942	641.827
Prima de servicios	-	1.680.000	5.040.000
Vacaciones	-	658.000	1.974.000
Aportes a la Seguridad Social			
Pensiones (AFP)	12%	201.600	604.800
Salud (EPS)	9%	142.800	428.400
Riesgos Laborales (ARL): Riesgo V	6,960%	116.928	350.784
Parafiscales			
Caja de compensación familiar (CCF)	4%	67.200	201.600
ICBF	3%	50.400	151.200
SENA	2%	33.600	100.800
Otros			
Dotación (Calzado y vestido de labor)	10%	168.000	504.000
Capacitaciones	5%	87.360	262.080
Otros (incapacidades no cubiertas, auxilios varios, prestaciones extralegales)	1%	16.800	50.400
Subtotal		21.007.015	

Fuente: elaboración propia

⁸⁷ MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL. Código Sustantivo de Trabajo (CST). 31 de diciembre de 2019. Disponible en: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_sustantivo_trabajo.html

El cálculo de los gastos energéticos anuales (COP) de las dos unidades de tratamiento, se determinaron tomando como base los equipos detallados en el informe de referencia [ANEXO D], su potencia del motor de cada equipo, al igual, que el número de equipos para cada unidad. Estos valores de potencia (kW/h), se ajustaron en base al caudal a tratar y el dimensionamiento de diseño para las unidades de desarenado de dos canales y el sedimentador primario circular. El costo del kW/h (**343,0608 COP**) obtuvo de la tabla de tarifas de la empresa que presta el servicio energético en el municipio de Tenjo (Enel-Codensa), para junio del 2020 [ANEXO E].

Tabla 31. Gastos energéticos anuales para el desarenador de dos canales.

Gasto energético de procesos unitarios			
Desarenador de dos canales			
Equipo mecánico	Potencia motor [kW/h]	Cantidad	Valor total COP
Compuerta deslizante de entrada a canales	3,7	2	22.238.573
Tornillo sin fin en canales	4	2	24.041.701
Bombeo de arena (bomba Torque Flow)	5,2	1	15.627.106
Tolvas para arenas	1,5	1	4.507.819
Subtotal			66.415.199

Fuente: elaboración propia

Tabla 32. Gastos energéticos anuales para el sedimentador primario circular.

Gasto energético de procesos unitarios			
Sedimentador primario circular			
Equipo mecánico	Potencia motor [kW/h]	Cantidad	Valor total COP
Rastrillos circulares	3,7	1	11.119.287
Bombeo de lodos (bomba centrífuga)	10	1	30.052.126
Bomba de drenaje (bomba centrífuga sumergible)	1,5	1	4.507.819
Subtotal			45.679.232

Fuente: elaboración propia

Por último, tomando el informe de referencia, se determinó que costo anual de mantenimiento para las obras civiles, corresponden al 0,5% del costo total de las obras civiles implementados en el tratamiento, y que, para el mantenimiento de equipos electromecánicos de ambas unidades de tratamiento, representa el 5% del costo total de los equipos. Los resultados se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Costos anuales de mantenimiento de procesos unitarios.

Mantenimiento de procesos unitarios		
Ítem	Porcentaje	Valor total COP
Mantenimiento de obra civil	0,5% (OC)	1.821.344
Mantenimiento de equipos electromecánicos	5% (EE)	22.722.869
Subtotal		24.544.212

Fuente: elaboración propia

Como resultados de todos los costos analizados, tanto de inversión como de operación y mantenimiento anuales, se obtiene un estimado de **1.131.810.274 COP** para la implementación del proyecto.

5.3 DETERMINACIÓN BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO

El beneficio económico que se genera por la implementación de la propuesta de aprovechamiento de agua lluvia para el sector agropecuario, en el municipio de Tenjo, se puede determinar de una manera aproximada y general, valorando las contribuciones porcentuales para cada aspecto de los aportes de capital implicados en la propuesta, como los costos de inversión, gastos anuales de O&M, la distribución y almacenamiento del recurso. Estos determinaran el costo unitario de venta del metro cúbico de agua lluvia tratada.

5.3.1 Determinación de los costos del agua con la propuesta. Estimar un costo para el metro cúbico de agua aprovechada por medio de la implementación de la propuesta, requiere evaluar los costos de inversión, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento, además, de la cantidad de agua tratada, su distribución y almacenamiento, puesto que, los ingresos generados por la venta del m³ de este recurso, será la principal aportación para hacer sustentable y viable este proyecto. También se debe tener en cuenta, la productividad para el sector agropecuario, el costo unitario de la producción (rentabilidad) y la tarifa actual del m³, dado que debe asegurarse la disponibilidad del recurso y los beneficios del cambio.

Para poder determinar una cantidad promedio de agua lluvia tratada, se requiere consultar bases de datos sobre estudios pluviométricos realizados en la zona de estudio. Por eso, se recurrió a datos proporcionados por el IDEAM, donde se pudo establecer precipitaciones promedio anuales con un rango de cinco (5) periodos evaluados, que abarcan desde 2015 hasta 2019 [ANEXO F], de ahí, se obtuvo que el volumen promedio de precipitaciones anuales sobre el área de estudio es de 799.138 m³.

Como se mencionó en el capítulo 4, se debe tener en cuenta un coeficiente global de escorrentía, **C**, ya que toda la precipitación no se logra captar por la red de alcantarillado municipal, el cual se determinó en dicho capítulo, con un valor de **0,43**. Esto establece un caudal aproximado apto para tratar de **343.629 m³/año**. Bajo los costos de inversión, operación y mantenimiento calculados, se puede obtener una relación entre esos costos y gastos, con el caudal de agua lluvia tratado al año; estimando la recuperación de inversión del tratamiento en 2 año, se puede establecer un precio mínimo unitario para el m³ de agua tratada, y así, cubrir los costos anuales de operación, mantenimiento, distribución y almacenamiento, además, de recuperar el capital de inversión. La contribución correspondiente para la distribución y almacenamiento del recurso hídrico, se

estima en el 25% de las contribuciones acumuladas de inversión y O&M. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 34. Desglose valor unitario de contribución.

Volumen anual de agua lluvia tratada (m ³)	346.629
Descripción	Valor unitario (COP)
Contribución para costos O&M	455
Contribución para costos de inversión	1.405
Contribucion distribucion y almacenamiento (25%)	465
TOTAL	2.325

Fuente: elaboración propia

El valor unitario mínimo del metro cúbico de agua lluvia tratado, será de **2.325 COP**, para cubrir gastos anuales de operación, mantenimiento, distribución, almacenamiento, y saldar las cuentas del capital invertido.

5.4 VIABILIDAD DEL PROYECTO

Se puede analizar la factibilidad del proyecto presentado mediante índices financieros que ayuden a sustentar la evaluación económica de la propuesta. Para evaluar el proyecto sobre la inversión de aprovechamiento de agua lluvia planteada a largo plazo, se planteó el uso del Valor Presente Neto (**VPN**) y así estimar los beneficios económicos que traería la implementación para la empresa prestadora del servicio. El cálculo del VPN se ejecuta por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 15. Cálculo Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = -I_0 + \text{Beneficios} \left(\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right)$$

Fuente: ROJAS, Miguel. Evaluación de proyectos para ingenieros. Capítulo 4. Criterios de evaluación. [consultado el 04 de julio de 2020] Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/1740/10/9586484787.10.pdf>

, donde ***I*₀**, representa la inversión de capital, **Beneficios** se refiere a la diferencia anual entre egresos e ingresos, e ***i*** es la Tasa de Interés de Oportunidad (TIO) del proyecto.

Para calcular la TIO del proyecto, se basó en la ecuación 16, donde intervienen tasas establecidos por el mercado. Para ello, se tomaron valores del año en curso de entidades Gubernamentales como el Banco de la Republica, para la

tasa DTF la cual tiene un valor de **3,6%**, y el DANE para la inflación, representada por el Índice de Precio al Consumidor, IPC, para el mes de junio del 2020, esta tiene un valor de **2,19%**. Por último, la tasa de riesgo se estimó en un **10%**, dado que el proyecto presenta un riesgo medio, debido a la complejidad considerable de su implementación, además, de ser una propuesta relativamente nueva y que no se ha realizado el país.

Ecuación 16. Cálculo de la Tasa Interés de Oportunidad (TIO)

$$TIO = ((1 + DTF) * (1 + Tasa\ de\ inflación) * (1 + Tasa\ de\ riesgo)) - 1$$

Fuente: ROJAS, Miguel. Evaluación de proyectos para ingenieros. Capítulo 4. Criterios de evaluación. [Consultado el 04 de julio de 2020] Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/1740/10/9586484787.10.pdf>

Teniendo en cuenta estos valores mencionados, y reemplazando en la ecuación, se determina que la TIO para evaluar la viabilidad del proyecto es del **16,46%**. Ya habiendo calculado la tasa para el proyecto, por medio la *ecuación 15*, y analizando a un periodo de tiempo de 5 años a partir de la implementación. El resumen de los cálculos se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35. Resumen cálculos del VPN (Actual y con proyecto)

	Implementación proyecto
Periodo (años)	5
Inversión	974.164.616
Egresos anuales (O&M)	157.645.658
Ingresos anuales	805.909.958
Beneficio (+)	648.264.300
VPN	1.126.072.737

Fuente: elaboración propia

La propuesta no busca sustituir en su totalidad el suministro aportado por medio del contrato entre el municipio de Tenjo, y la Empresa Pública de Cundinamarca, EPC, mencionado en el **apartado 3.1.1**, donde evaluando que anualmente para un volumen igual al de agua lluvia tratada (346.629 m³/año), y con el precio de venta del agua en bloque (718,18 COP) por parte de la EPC, se estima que el gasto anual es de 249.149.993 COP por el recurso hídrico. Esta propuesta no cumpliría la disponibilidad del recurso hídrico deseada, por lo cual, se enfoca en contribuir hacia la oferta disponible por parte de la empresa, y en cierto modo, disminuir la dependencia parcial del suministro agua por parte de agentes externos

El VPN evaluado para la propuesta, permite identificar las ganancias adicionales con la implementación del aprovechamiento del agua lluvia, tanto para la empresa, como para los consumidores del sector agropecuario porque la oferta aumentaría, y, además, su precio disminuiría considerablemente para este servicio en específico, en relación al precio unitario del m³ actual que rodea por los 9.300 COP [ANEXO E].

Por último, se establece la relación beneficio-costos para la propuesta detallada en el proyecto. Esta relaciona el beneficio del proyecto, identificado como el VPN, y los costos requeridos de inversión en el tratamiento de la propuesta. La ecuación es la siguiente.

Ecuación 17. Cálculo relación beneficio/costo

$$\text{Relación (B/C)} = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Costos}}$$

Fuente: ROJAS, Miguel. Evaluación de proyectos para ingenieros. Capítulo 4. Criterios de evaluación. [Consultado el 04 de julio de 2020] Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/1740/10/9586484787.10.pdf>

La relación beneficio/costo de la propuesta sustituyendo valores es del **1,16**. Esta relación muestra que los beneficios después de un periodo de 5 años iniciales, serán tres veces el capital invertido para la ejecución de obras civiles y compra e instalación de equipos para ambas unidades de procesos unitarios.

6. CONCLUSIONES

- Se logró obtener el diagnóstico de los parámetros del agua lluvia de escorrentía, evaluando tanto la parte experimental en la zona de estudio (Tenjo), y complementando los datos, por medio de referencias bibliográficas de proyectos que presentaran zonas de estudio con condiciones hidrográficas, pluviométricas y geo demográficas similares.
- Aplicando métodos (Delphi) y modelos estadísticos (AHP), se pudo determinar la mejor opción de aprovechamiento del agua lluvia, donde se identificó el uso más adecuado, que presentara mejores condiciones económicas, técnicas, ambientales, sociales y demás aspectos frente a las otras dos opciones de alternativas planteadas.
- Contemplando los aspectos importantes que argumentaban para decidir que, opción de aprovechamiento era más relevante con respecto a las demás, se obtuvo la normatividad vigente Nacional e Internacional para la alternativa de aprovechamiento seleccionada, la cual planteaba los límites mínimos permisibles para la distribuir de este recurso.
- Partiendo de la caracterización ponderada de las diferentes fuentes, se establecieron las unidades de tratamiento necesarias para tratar el agua lluvia, y obtener un recurso apto para su aprovechamiento idóneo en el sector agropecuario del municipio de Tenjo.
- Por medio de referencias teóricas se logró determinar los rendimientos teóricos para las dos unidades de tratamiento requeridas para poder mejorar las condiciones del afluente, y así, garantizar la calidad del agua para su aprovechamiento en el sector agropecuario.
- Se pudo evaluar los costos de inversión, operación y mantenimiento de las unidades de tratamiento, además, de especificar el número de operarios requeridos, costos unitarios de obras civiles, equipos, gastos energéticos, e ítems como la puesta en marcha e instalación de equipos.
- Usando indicadores financieros como el VPN, la TIO y la relación Beneficio/Costo, y aplicándolo en el proyecto, se logró evaluar la viabilidad del mismo, comparando la situación actual, con la propuesta; identificando ganancias económicas con la implementación del proyecto.

7. RECOMENDACIONES

- La caracterización del agua lluvia se dividió en dos áreas de estudio, dado que no fue posible determinar experimentalmente todo el número de muestreos que se requerían para obtener una caracterización concluyente. Por ende, se recurrió a la búsqueda bibliográfica sobre caracterizaciones existentes de zonas espaciales que presentaran similitudes demográficas e hidrográficas con la zona de estudio, para crear un diagnóstico lo más conciso y robusto al verdadero.
- Es recomendable recolectar y seleccionar información pluviométrica, hidrológica y demás aspectos específicos sobre el área de estudio, con la finalidad de obtener resultados mucho más precisos y acertados que establezcan mejores predicciones. Con ello también, el dimensionamiento de equipos y costos de inversión, y O&M tendrán una mayor validación.
- Es importante recordar que los valores que se toman para el diseño de cualquier unidad de tratamiento, deben estar avaladas por determinaciones en plantas piloto o en pruebas de laboratorio. No es aconsejable asumir valores de rangos dados por normativa o manual de diseño de unidades de tratamiento de aguas.
- El tratamiento avanzado de aguas no se recomienda, para uso de riego de cultivos de bajo valor, a menos que existan otros beneficios para otros sectores productivos. El tratamiento avanzado requiere de una considerable inversión en nueva infraestructura (distribución, almacenamiento, tratamiento específico adicional), y en estas circunstancias no se justifica los sistemas de reutilización solamente por sus beneficios agrícolas.
- Al valor determinado del precio unitario del metro cúbico de agua lluvia tratada, no se tuvieron en cuenta temas de almacenamiento y distribución del recurso, ya que superaba la delimitación establecida para la ejecución del proyecto. Estos aspectos deben ser tomados en cuenta para asignar un valor más preciso sobre el precio final de recurso hídrico. Como sugerencia de distribución se puede usar alcantarillado existente para enviar el agua tratada hacia tanques de almacenamiento exclusivos para almacenar y abastecer cultivos, y demás actividades agropecuarias en épocas de sequía.
- La determinación de costos de operación y mantenimiento del tratamiento de aguas lluvias, se analizó para un año sin interrupciones, para facilitar los cálculos, dado que cuando se habla de aguas lluvias, es imprescindible estimar cuando se presentaran precipitaciones. Una opción para evaluar estos costos anualmente sin interrupciones, es adaptar en épocas de sequía, las

unidades de tratamiento a la planta de aguas residuales existente, ya que está actualmente saturada y genera una gran contaminación ambiental.

- La estimación de costos, precisamente en los equipos, para crear una mayor exactitud en esos costos de inversión, es recomendable cotizar específicamente cada equipo perteneciente a las unidades de tratamiento, cuyos costos dependerán de factores como el caudal a tratar, las dimensiones de la unidad, el proceso en sí, y los requerimientos energéticos de la planta de tratamiento.

BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE TENJO, Cundinamarca. Datos básicos acueducto. Página 3. Disponible en: http://www.tenjo-cundinamarca.gov.co/Proyectos/ConozcamasProyectos/2535_rehabilitacion-acueducto.pdf

BAEZA, Jaime. Reutilización de aguas residuales para riego. Máster Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. Universidad de Alicante. España. p. 19. Disponible en: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/jaume-baeza.pdf>

BELZONA. Tratamiento de aguas residuales, Mapa de la plata. 2010. p.19. Disponible en: https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf

BERNARDO SERVÍN MASSIEU, Tratamiento de aguas residuales.2008 [sitio web]. Ciudad de México. Disponible en: [http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000057-b3f9cb4e88/residual es.pdf](http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000057-b3f9cb4e88/residual%20es.pdf)

BUITRAGO, Nathalia. Cuantificación y caracterización de la calidad del agua de escorrentía de techo para el prediseño de una piscina de retención en el campus de la Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Colombia. 2011. P 90-110

CDM SMITH. Informe de costos de inversión y de operación y mantenimiento de alternativas. Versión 03. 2014.

CHÁVEZ-GUILLEN, R. Gestión para la Recarga de Acuíferos y Almacenamiento Subsuperficial. 2003. Capítulo 6. Disponible en: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GALE%202005.%20Estrategias%20para%20la%20Gesti%C3%B3n%20de%20Recarga%20de.pdf

CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. Manual de Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 1994. p 584

COSEMAROZONO. Tratamiento con Ozono. Recuperación de aguas residuales. Disponible en: https://www.cosemarozono.com/descargas/recuperacion_aguas_residuales.pdf

CYTED. Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. Disponible en:

http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf

DECRETO N°1594 (Artículo 40 y 41). MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Bogotá, Colombia. 1984. Disponible en Internet: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Tenjo, Cundinamarca (25799). Disponible en Internet: http://orarbo.gov.co/apc-aa-files/a65cd60a57804f3f1d35afb36cfcf958/tenjo_ficha_25799.pdf

DINAMA, LAB. Manual de procedimiento analítico para aguas y efluentes. Dirección Nacional de Medio Ambiente. Edición 1996. p 7. Disponible en: http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/docs/pdfs/manual_dinama.pdf

EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Water Reuse. Washington, DC. 2004. P 31-37

EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Water Reuse. Washington, DC. 2004. p 37. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/2004-guidelines-water-reuse.pdf?fbclid=IwAR0TH6hTgFXj6P-7DuxlYzpBLMqmormkWkGpMGgsATiY_ErpbftL8u0NnA

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO BOGOTÁ. Plan maestro de acueducto y alcantarillado. 2006. Disponible en: <https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/empresa/DocumentotecnicoDTS.pdf>

FAO. Manual de captación y aprovechamiento del agua lluvia, Experiencias América Latina. Santiago, Chile. 2000

FAO. Captación y almacenamiento de Agua Lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar de América Latina. Santiago, Chile. 2013. p 15,16, 88,

FAO. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2013. p 11-14

GALARZA, Sandra. Desarrollo de una herramienta de análisis multicriterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el

campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia. 2011

GERENA, Juan David. MORA Mónica Viviana. Evaluación de parámetros Físicoquímicos en agua lluvia de escorrentía en tres puntos con tipos de suelos industrial, residencial y vehicular en Bogotá con protección a sistemas urbanos de drenaje sostenible. Universidad Santo Tomás de Aquino. Facultad de Ingeniería Ambiental. Bogotá. 2017.

GIRALDO, Gomes. Manual de Análisis de Aguas. Departamento de ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. 1995. p30-31,10-12, 15, 20-25, 36-37, 44-50, 154-156.

GOONETILLEKE, A, THOMAS, E & GILBERT, D. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. Journal of Environmental Management, vol. 74. p. 31-42, 2005.

GUNT HAMBURG. Tratamiento de aguas, procesos mecánicos (2014). p.1. Disponible en: https://www.gunt.de/images/download/flotation_sedimentation_spanish.pdf

HATT, B. E., Deletic, A. & Fletcher, T. D. (2006). Integrated treatment and recycling of stormwater: a review of Australian practice. Journal of Environmental Management. p 7.

HERNANDEZ, J., Bayón, J., Fresno, D., Pérez, M., Jordana, J., Muñoz, F., et al. (2006). Construcción de pavimentos permeables para el control en origen de la escorrentía urbana: ejemplo práctico del aparcamiento del palacio de deportes de La Guía. Universidad de Cantabria, Universidad de Oviedo y Ayuntamiento de Gijón.

INVEMAR, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros físicoquímicos y contaminantes marinos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2003. p 99-102

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD. Manual de métodos físicoquímicos básicos para el análisis de aguas para el consumo humano. Subdirección Red Nacional de Laboratorios. Bogotá, Colombia. 2011. p 39

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD. Programa de vigilancia por Laboratorio de la calidad de Agua para consumo humano. Grupo Salud Ambiental "Jaime Eduardo Ortiz". Bogotá, Colombia. 2011. p 46

LAZAROVA, Valentina, BAHRI, Akica. Water Reuse for Irrigation Agriculture, Landscapes, and Turf Grass. CRC Press. 2004

LEE, J. H, BANG, L. H. KETCHUM, J. First flush analysis of urban storm runoff. Science of the Total Environment, vol. 293, pp. 163-175, 2002.

LOZANO-RIVAS. Diseño de Plantas de Potabilización de Agua. Material de clase. Bogotá D.C., Colombia: [consultado el 28 de junio de 2020] Disponible en: <http://wlozano.blogspot.com>

MAESTRE. A, PITT, R. The National Stormwater Quality Database, Version 1.1. Center for Watershed Protection. Report prepared for U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington. 2005.

METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Terceros edición, Vol 1. McGraw Hill. 1995 p. 124-130, 191-196, 522.

MINISTERIO DE PROTECCION SOCIAL. Código Sustantivo de Trabajo (CST). 31 de diciembre de 2019. Disponible en: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_sustantivo_trabajo.html

MINVIVIENDA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. TÍTULO D. Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias. (2016). p. 10-14. Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf

MOYA, María José. Tecnologías electroquímicas en tratamiento de aguas: Electrocoagulación. Módulo 3. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/86621/1/Tema-TECNOLOGIAS-ELECTROQUIMICAS.pdf>

NAVNEET, R. The Analytic Hierarchy Process. In Strategic Decision Making, London: Springer-Verlag London, 2004, pp. 1–11.

NIEVES, Edna Catalina. PRECIADO, Jair. La problemática ambiental y territorial del municipio de Tenjo (Cundinamarca): último municipio verde de la Sabana de Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2015. Disponible en <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/10562/11529>

NORMA OS.060. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Bogotá. Colombia. Disponible en: <http://ww3.vivienda.gov.pe/DGPRVU/docs/RNE/T%C3%ADtulo%20II%20Habilitaciones%20Urbanas/2%20OS.060%20DRENAJE%20PLUVIAL%20URBANO.pdf>

ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). Criterios de la evaluación de las alternativas. Capitulo XII.. Disponible en: <http://www.oas.org/usde/publications/unit/oea22s/ch19.htm#13.1.3%20impacto%20econ%C3%B3mico>

PAUER, Ricardo. Generalidades sobre el intercambio iónico. Conceptos introductorios. Seminario de Agua y Energía. Rosario 1990. Disponible en: http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/02_Generalidades_sobre_el.pdf

PEREZ, Ivan. Aprovechamiento de Aguas Pluviales. Departamento de Construcciones Arquitectónicas II. Universidad Politécnica de Catalunya. España. 2009. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7222/pfc%202009.058%20mem%C3%B2ria.pdf>

PERPIÑAN, Adrián. Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector institucional. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2013. p 72

PISQUERAS, V. Proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP). Universitat Politècnica de Valencia. 2018. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>

RAMALHO, Rubens, Tratamiento de aguas residuales. Facultad de Ciencia e Ingeniería. Universidad Laval. Canadá. 1996. p 92-93

RAS, Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento Básico. Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000. Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_d_.pdf. p 44-45, 46-47,

RESOLUCIÓN N° 2115. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Bogotá. Colombia. 22 de junio de 2007. Disponible en Internet: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf

ROJAS, Miguel. Evaluación de proyectos para ingenieros. Criterios de evaluación. Capítulo 4. [Consultado el 04 de julio de 2020] Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/1740/10/9586484787.10.pdf>

ROMERO, Jairo, Teoría y principios de diseño. Facultad de Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingenieros. Colombia. 2000. P 102-103, 293-294, 631, 633-639.
SAATY, T.L... The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill. 1980

SISTEMA DE CONTABILIDAD AMBIENTAL Y ECONÓMICA PARA EL AGUA (SCAE-AGUA). Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Naciones Unidas. 2011. p 99-100

SEREVICHE, Carlos Alberto. CASTILLO, Marlon Enrique. ACEVEDO, Rosa Leonor. Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos Básicos en Aguas. Cartagena de Indias. Colombia. 2017. Disponible en Internet: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf>

SILVA, Maria S. L.; MENDONÇA, Cláudio E. S.; ANJOS, José B. dos; HONÓRIO, Antônio P. M.; SILVA, Aderaldo de S.; BRITO, Luiza T. de L. Barragem subterrânea: água para a produção de alimentos. Petrolina, 2007a, Cap. 6, p. 121-137.

SISTEMA DE ESTADÍSTICAS TERRITORIALES (TerriData). Comparaciones Municipios. Página 54. Disponible en Internet: <https://terridata.dnp.gov.co>

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA PLANEACIÓN Y EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL (SIGOT). POT municipales (Tenjo). Disponible en Internet: <https://sigot.igac.gov.co>

THANGARATINAM, S and C. W. Redman, "The Delphi technique". Obstet. Gynaecol., vol. 7, no. 2, pp. 120– 125, 2005.

TORRES, A, et al. Aprovechamiento de agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá (PUJB). Bogotá. 2009. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jaime_LaraBorrero/publication/230887967_Aprovechamiento_de_aguas_lluvias_en_el_campus_de_la_Pontificia_Universidad_Javeriana_sede_Bogota_PUJB/links/5d4455f14585153e5935c909/Aprovechamiento-de-aguas-lluvias-en-el-campus-de-la-Pontificia-Universidad-Javeriana-sede-Bogota-PUJB.pdf

TOVAR, Daniel Eduardo, LAGUADO, María. La inspección de riesgos agropecuarios en el municipio de Tenjo, Cundinamarca como herramienta clave de la gestión administrativa. Universidad La Salle. Bogotá. 2018. Páginas 19-22.

TREDOUX, G., MURRAY, E., CAVE, L. Sistemas de infiltración y otros sistemas de recarga en el sur de África. Gestión de la recarga del acuífero y almacenamiento subsuperficial. 2003

UNIVERSIDAD DA CORUÑA. Fichas técnicas de etapas de procesos de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. 2014. p. 2,3. Disponible en: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Neutralizaci%C3%B3n.pdf/e7996c1d-1265-54c0-07d8-c0a79ce2cd91>

UNIVERSIDAD PRIVADO BOLIVIANA (UPB). Determinación del tamaño muestra mediante el uso de árboles de decisión. Investigación & Desarrollo. 2011

USAID. Guía de referencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en centro América. Estados Unidos. p 19. Disponible en: https://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx?Archivo=odoc_73992_1_23102012.pdf

VEENHUIZEN, Rene van. Manual captación y aprovechamiento de agua lluvias. Oficina Regional de la FAO para América Latina. Santiago, Chile. 2000

VIVES DE ANDREIS, José Benito. Manual de Técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Santa Marta. Colombia. 2003. Disponible en Internet: <http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/7010manualTecnicasanaliticas.pdf>

ANEXOS

ANEXO A.

GUÍAS DE LABORATORIO – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS FUNDAMENTALES DEL AGUA. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

- h) Aros con nuez
- i) Mechero Bunsen
- j) Beakers de 100, 500 y 1000 mL
- k) Bureta graduada de 25 mL
- l) Erlenmeyer de 100 y 250 mL
- m) Cono Imhoff graduado de 1000 mL
- n) Pinzas metálicas para cápsula
- o) Desecador con indicador coloreado de humedad
- p) Papel de filtro

3.2. Equipos

- a) Mufla para operar a 550 ± 50 °C.
- b) Estufa para operar a 103-105 °C.
- c) Baño termostático.
- d) Turbidímetro.
- e) pH-metro.
- f) Conductímetro.
- g) Balanza analítica (precisión de 0,1 mg)
- h) Plancha de calentamiento

3.3. Reactivos (en el preinforme deben aparecer 3 MSDS)

- a) Negro de Eriocromo T
- b) Na_2EDTA 0,05 M
- c) Buffer de pH 10 ($\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$)

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS: [1,3]

Tome el registro fotográfico de la práctica de laboratorio con una cámara fotográfica de resolución mínima de 8 Mpx.

- 4.1. **Tamaño de muestra:** cada grupo deberá traer aproximadamente 3 L de muestra de agua natural, según las directrices de recolección de muestras del procedimiento 4.1. de la guía de laboratorio de las prácticas 2 y 3.
- 4.2. **Determinación de sólidos (Método gravimétrico):** realizar los tres (3) procedimientos de sólidos paralelamente. Poner a calentar la estufa a 103-105 °C y la mufla a 550 ± 50 °C antes de iniciar.
 - 4.2.1. **Sólidos Totales (ST), Volátiles (STV) y Fijos (STF).**
 - a) **Muestreo:** recolectar la muestra en envases de vidrio o plástico de 1 L de capacidad. Refrigerar a 4 °C. Analizar antes de los 7 días.
 - b) **Preparación de la cápsula:** colocar la cápsula de porcelana en una mufla a 550 ± 50 °C durante 1 hora. *Esta operación la realizan los laboratoristas previamente al ingreso al laboratorio.*
 - c) **Determinación:**
 - i. Dejar enfriar en desecador por 15 minutos y pesar en balanza analítica (en los demás procedimientos de enfriado se conservará el mismo tiempo).
 - ii. Identificar la cápsula de porcelana sin marcarla con lápiz o Sharpie.
 - iii. Medir 100 mL de agua homogenizada con una probeta de 100 mL.
 - iv. Verter el volumen medido una de las cápsulas preparadas y evaporar en plancha de

- v. Secar el residuo en estufa a 103-105 °C durante 1 hora.
- vi. Enfriar en desecador y pesar.
- vii. Repetir el ciclo de secado, enfriado en desecador y pesado hasta que se obtenga peso constante o que la pérdida de peso sea menor al 4 % que el peso previo o menos de 0.5 mg (el que sea menor).
- viii. Calcinar la muestra en mufla a 550 ± 50 °C durante 1 hora.
- ix. Enfriar en desecador y pesar.
- x. Repetir el ciclo de secado, enfriado en desecador y pesado hasta que se obtenga peso constante o que la pérdida de peso sea menor al 4 % que el peso previo o menos de 0.5 mg (el que sea menor).

d) **Tabla de datos:** consignar los resultados en la tabla 5 según corresponda:

Tabla 1.5. Resultados de la determinación de ST, STV y STF.

Magnitud	Simbología	Valor
Masa cápsula preparada (mg)	m_1	
Masa cápsula más el residuo a 103-105°C (mg)	m_2	
Masa cápsula más el residuo a 550 °C (mg)	m_3	
Volumen de muestra (mL)	V	

e) **Cálculos y expresión de resultados:**

$$ST \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V}$$

$$STF \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(m_3 - m_1) \cdot 1000}{V}$$

$$STV \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = ST - STF$$

4.2.2. Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Disueltos Totales (SDT).

- a) **Muestreo:** la muestra se debe recolectar en botellas de vidrio o plástico de 1 L de capacidad. Refrigerar las muestras a 4°C. Analizar antes de 24 horas de preferencia, como máximo 7 días de realizado el muestreo.
- b) **Preparación del papel de filtro:** esta operación la realizan los laboratoristas previamente al ingreso al laboratorio.
 - i. Colocar el filtro en el embudo de filtración.
 - ii. Aplicar vacío y enjuagar con tres porciones de 20 mL de agua destilada.
 - iii. Continuar la succión hasta eliminar totalmente el agua.
 - iv. Secar en estufa a 103-105 °C por 1 hora en un soporte de porcelana o similar.
 - v. Enfriar en desecador y pesar.
 - vi. Repetir el ciclo de secado, enfriado y pesado hasta peso constante.
- c) **Determinación:**
 - i. Enfriar el papel de filtro en desecador.
 - ii. Identificar y pesar el filtro sin marcarlo con lápiz o Sharpie.
 - iii. Colocar el filtro en el embudo de filtración y humedecerlo con una pequeña cantidad de agua destilada.

- iv. Medir 100 mL de agua homogenizada con una probeta de 100 mL.
- v. Verter el volumen medido en el embudo de filtración y comenzar la filtración simple.
- vi. Lavar 3 veces sucesivas con 10 mL de agua destilada cada vez, permitiendo un completo drenaje en los lavados.
- vii. Continuar hasta que la filtración sea completa.
- viii. Remover el papel de filtro y colocarlo sobre un soporte de porcelana marcado con Sharpie.
- ix. Secar por 1 hora a 103-105 °C en estufa, enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y pesar.
- x. Repetir el ciclo de secado, enfriado, y pesado hasta peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor que el 4% del peso previo o 0.5 mg.

d) **Tabla de datos:** consignar los resultados en la tabla 6 según corresponda:

Tabla 1.6. Resultados de la determinación de SST y SDT.

Magnitud	Simbología	Valor
Masa del filtro preparado (mg)	m_1	
Masa del filtro más el residuo a 103-105°C (mg)	m_2	
Volumen de muestra (mL)	V	

e) **Cálculos y expresión de resultados:**

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V}$$

$$SDT \left(\frac{mg}{L} \right) = ST - SST$$

4.2.3. Sólidos Sedimentables (SS).

- a) **Muestreo:** recolectar la muestra en envases de vidrio o de plástico de 1 L de capacidad. Refrigerar a 4 °C. Analizar lo antes posible.
- b) **Determinación:**
 - i. Acoplar verticalmente el cono Imhoff (limpio y purgado con la muestra) a un aro con nuez y sujetar en soporte universal. Ver figura 1.2.
 - ii. Verter en el cono Imhoff, 1000 mL de muestra perfectamente homogenizada.
 - iii. A los 45 minutos, agite vigorosamente el contenido del cono con varilla de vidrio para desprender las partículas adheridas.
 - iv. Dejar sedimentar 15 minutos más y leer el volumen del sedimento en la escala, a los 60 minutos de iniciado el ensayo.

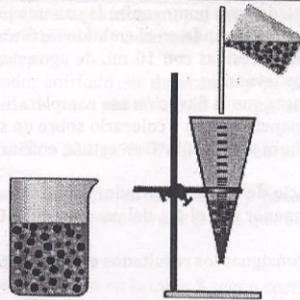


Figura 1.2. Montaje para sólidos sedimentables.

Tomada de: <http://cidta.usal.es/cursos/agua/modulos/Practicas/sedimentacion4/factores.html>

c) Cálculos y expresión de resultados:

$$SS \left(\frac{\text{mL}}{\text{L.h}} \right) = \underline{\hspace{2cm}}$$

4.3. **Color Aparente y olor (Método sensorial):** se necesita una botella incolora, preferiblemente de vidrio, perfectamente limpia, de al menos un litro de capacidad.

a) Muestreo: el recipiente recolector se lava con ácido clorhídrico 2 M o con una disolución de agente de limpieza de superficies especificado y se purga con agua destilada. Se toman las muestras y se determina lo antes posible, si hay un tiempo de espera se deja a 4 °C y en oscuridad.

b) Determinación de color: se toman aproximadamente 50 mL de muestra de agua no filtrada sobre un erlenmeyer de 100 mL y se examina su color según la tabla 1.1. La intensidad del color y el tono se hace bajo una luz difusa sobre fondo blanco. Si la muestra contiene materias en suspensión si es posible se dejan decantar antes del examen.

c) Cálculos y expresión de resultados:

$$\text{Color aparente} = \underline{\hspace{2cm}}$$

d) Determinación de olor: caliente la muestra del procedimiento anterior a 40 °C (usar termómetro) en una plancha de calentamiento y examine el olor abanicando los vapores generados. Ver tabla 1.2.

e) Cálculos y expresión de resultados:

$$\text{Olor} = \underline{\hspace{2cm}}$$

4.4. **Turbidez (Método nefelométrico):**

a) Muestreo: se debe realizar la determinación en el día en que se realiza el muestreo. De lo contrario, almacenar la muestra hasta 24 h en la oscuridad.

b) Determinación:

- i. Limpiar con papel secante las celdas del turbidímetro. La suciedad de huellas dactilares son interferencias positivas, principalmente para muestras con turbidez baja.
- ii. Realizar la calibración del equipo de acuerdo al manual de instrucciones (usualmente con tres

- disoluciones de turbidez conocida, 0,01; 10,00 y 1000,00 NTU).
- iii. Purgue la celda (3 veces) con la muestra de agua homogenizada.
- iv. Llene la celda con la muestra, evitando que queden burbujas de aire por debajo del menisco del agua. Se aconseja dejar en reposo por un minuto.
- v. Seque la celda con papel secante, colóquela en el equipo y lea la turbidez.
- vi. Si la turbidez de la muestra es mayor a 1000,00 NTU, diluir la muestra con agua destilada, hasta que su turbidez esté en el rango de 0,01-1000,00 NTU.
- vii. Lave la celda con el detergente apropiado, purgue con agua destilada y séquela por la parte exterior con papel secante.

c) Cálculos y expresión de resultados:

$$\text{Turbidez (NTU)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

4.5. Conductividad eléctrica (Método conductimétrico):

- a) Muestreo: el análisis puede ser realizado tanto en campo como en el laboratorio. Si el análisis no es realizado durante las 24 horas de recolectada la muestra, ésta debe ser filtrada con un filtro de 0,45 micras y preservada a 4 °C hasta 28 días luego de su recolección. El filtro y el equipo de filtración deben ser purgados con agua destilada y desionizada, y previo a su uso, purgarlos con la muestra a filtrar.

b) Determinación:

- i. Lavar la celda con agua desionizada y secar con papel secante. No seque las placas metálicas de la celda.
- ii. Realizar la calibración del equipo de acuerdo al manual de instrucciones (usualmente con una disolución estándar de KCl 0,0100 M, que a 25 °C tiene una conductividad eléctrica de 1413 $\mu\text{S/cm} \pm 12 \mu\text{S/cm}$).
- iii. Purgue la celda de conductividad con tres (3) porciones de la muestra a medir.
- iv. En un beaker de 250 mL (purgado con la muestra), tome aproximadamente 100 mL de la muestra de agua homogenizada.
- v. Ubicar la celda en la muestra de tal manera que no queden retenidas burbujas de aire.
- vi. La mayoría de los instrumentos poseen compensación de temperatura y leen la conductividad en unidades de $\mu\text{S/cm}$, en dicho caso la lectura es corregida automáticamente a 25°C, ajustando la temperatura de la muestra a $25,0 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ y se reporta directamente el valor medido.
- i. Si no es así, realizar las correcciones necesarias para que el valor quede determinado a 25 °C (revisar en la literatura técnica).
- vii. Leer la conductividad de la muestra.

c) Cálculos y expresión de resultados:

$$\text{Conductividad eléctrica } (\mu\text{S/cm}) = \underline{\hspace{2cm}}$$

4.6. pH (Método electrométrico):

- a) Muestreo: el análisis puede ser realizado tanto en campo como en el laboratorio. En caso de que el análisis se realice en el laboratorio, llenar el recipiente de muestreo completamente sin cámara de aire. Realizar la medida antes de 2 horas de recolectada la muestra.

b) Calibración del pH-metro:

- i. Retirar el tapón protector que contiene KCl 3,0 M.
- ii. Lavar el electrodo combinado de pH con agua desionizada. No seque por ningún motivo las paredes cristalinas del electrodo.

- iii. Conectar el electrodo al pH-metro.
- iv. Seguir las instrucciones del medidor de pH.
- v. En la calibración se usan como mínimo dos disoluciones buffer, cuyos valores de pH deben cubrir el rango de pH esperado por la muestra a medir (Buffer de pH 4,01, 7,00 y 10,00).
- vi. Introducir el electrodo a la buffer correspondiente (según el programa del equipo), teniendo la precaución de destapar el orificio de llenado y que el nivel de la disolución de relleno esté por encima del nivel de la buffer.
- vii. Ajustar la temperatura de la buffer a $25,0 \pm 0,1$ °C. (Si el equipo permite utilizar la herramienta de compensación de temperatura). Si no es posible, el valor correspondiente del pH de la buffer debe ser corregido a la temperatura de trabajo.
- viii. Leer la medida con una agitación moderada para minimizar la entrada de dióxido de carbono y suficiente para homogeneizar la buffer.
- ix. Repetir los literales ii, vi, vii y viii para las buffer restantes.

c) Medida del pH:

- i. En un beaker de 250 mL (purgado con la muestra), tome aproximadamente 100 mL de la muestra de agua homogenizada.
- ii. Repetir los literales ii, vi, vii y viii del procedimiento 4.6. a) para la muestra.
- iii. Una vez finalizada la medida enjuagar el electrodo y proteger con el tapón protector.

d) Cálculos y expresión de resultados:

pH = _____

4.7. Dureza total (Método Titulométrico):

a) Muestreo: recolectar la muestra en envases de plástico o vidrio. Acidificar con HNO_3 hasta $\text{pH} < 2$. La muestra puede ser almacenada hasta 6 meses.

b) Determinación:

- i. Tomar 100 mL de muestra homogenizada con probeta de 100 mL y transferir a un erlenmeyer de 250 mL.
- ii. Agregar 2 mL de disolución buffer de pH 10,0. El pH deberá ser $10,0 \pm 0,1$, en caso contrario ajustarlo.
- iii. Agregar una pequeña cantidad (punta de espátula) de reactivo indicador (Negro de Eriocromo T) y homogenizar.
- iv. Titular con disolución de Na_2EDTA lentamente y agitando continuamente hasta el cambio de rojo vino a azul.
- v. Repetir los literales i-iv con agua destilada, como blanco analítico.

c) Tabla de datos: consignar los resultados en la tabla 1.7 según corresponda:

Tabla 1.7. Resultados de la determinación de dureza total.

Magnitud	Simbología	Valor
Volumen de Na_2EDTA gastados en el blanco (mL)	V_1	
Volumen de Na_2EDTA gastados en la muestra (mL)	V_2	
Molaridad de Na_2EDTA	M	
Volumen de la muestra (mL)	V_3	

d) Cálculos y expresión de resultados:

$$\text{Dureza} \left(\frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right) = \frac{(V_2 - V_1) \cdot M \cdot (100000)}{V_3}$$

5 CÁLCULOS Y RESULTADOS:

6 ANEXOS:

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. APHA, AWWA and WEF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ed. Díaz de Santos. 1992.
2. LONDOÑO C. Adela, GIRALDO G. Gloria I. y GUTIERREZ G. Adamo A. Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Ed. Universidad Nacional de Colombia. 2010.
3. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA. Manual de Laboratorio de Química Industrial Inorgánica Experimental. Bogotá. Julio de 2010.

FECHA	ELABORÓ	REVISÓ	INSTITUCIÓN
2015	Prof. ALVER ALEX CASTILLO AGUIRRE	Jorge Castañeda l.	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

ANEXO B.

RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS AGUA LLUVIA TENJO: QUIMCONTROL LTDA.



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO



INFORME 1 OCA 1358-AG
19 de marzo de 2020

IDENTIFICACION DEL CLIENTE IDENTIFICACION DE LA MUESTRA

Señor GERMAN ROBAYO RAMOS Dirección: CR 1G #5-54 e-mail: robayo.german1209@outlook.com Bogotá D.C.	ORDEN DE SERVICIO: 4258 FECHA RECEPCION MUESTRA: 9 de marzo de 2020 MATRIZ: AR FECHA DE MUESTREO: 27 de febrero de 2020 TIPO DE MUESTREO: Dato no suministrado por el cliente PUNTO DE MUESTREO: Tenjo, Cundinamarca IDENTIFICACION MUESTRA: 20-AG5821 OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada a laboratorio.
--	---

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Grasas y Aceite	mg/L	SM, 5520 D, Extracción Soxhlet	2020-03-19	1,3	±12,4
Hidrocarburos Totales	mg/L	SM, 5520 D y F, Extracción Soxhlet	2020-03-19	2,13	±12,8
Plomo	mg Pb/L	SM 3030K, 3111 B, Espectrometría de Absorción Atómica	2020-03-19	0,081	±5,5
Cadmio	mg Cd/L	SM 3030K, 3111 B, Espectrometría de Absorción Atómica	2020-03-19	0,085	±5,5
Cobre	mg Cu/L	SM 3030K, 3111 B, Espectrometría de Absorción Atómica	2020-03-19	0,058	±5,5

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 22ND EDITION, 2012. AR: Agua Residual

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.

NOTA 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.

NOTA 3: Las muestras serán eliminadas cuarenta y cinco (45) días después de haber sido recibidas.

NOTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza de 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es valido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.


CONSTANTINO ZÚNIGA MOYA
 Químico, Matrícula Profesional PQ-412
 Especialista en Consultoría ambiental

Elabora Carolina Liceth Navarro Lopez
 Revisa Carlos Steven Moreno Giron

ANEXO C.

ENCUESTA DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVA (MÉTODO DELPHI)

ENCUESTA SOBRE RELEVANCIA DE ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA LLUVIA

El proyecto plantea seleccionar una alternativa de aprovechamiento del agua lluvia de escorrentía en el casco urbano del municipio de Tenjo. Como objetivo es identificar y describir los criterios para las tres alternativas, y en base a esto, seleccionar la mejor alternativa. Las 3 alternativas planteadas son: I) Potabilización, II) destinarla al sector agropecuario, y III) recarga hacia fuentes subterráneas.

La selección de los criterios se ejecutó en base a la bibliografía consultada de Perpiñan y Galarza, teniendo en cuenta el impacto que tiene sobre las diferentes alternativas y evaluando la incidencia a lo hora de realizar una elección de implementación de un proyecto. Los criterios seleccionados son: a) económico, b) técnico, c) ambiental, d) social, e) normativo y d) mantenimiento. La descripción de cada criterio se muestra en la **Tabla 1**, explicando los factores más relevantes de cada criterio, y los cuales son tenidos en cuenta a lo hora de asignar un valor cuantitativo en el cuestionario.

Criterio	Indicadores
Económico	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Costo de inversión en infraestructura, equipos, mano de obra, puesta en marcha, interventoría e instalación. ❖ Análisis financiero del proyecto. ❖ Costos operativos.
Técnico	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Periodo de entrada en operación del proyecto. ❖ Etapas de tratamiento requeridas. ❖ Nivel de compatibilidad con el plan maestro (políticas de desarrollo).
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Maximizar el impacto sobre ecosistemas, cuencas. ❖ Maximizar el aprovechamiento de fuentes alternas de suministro actual.
Social	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Beneficio directo hacia la comunidad. ❖ Potencializar actividades relacionadas a las alternativas.
Normativo	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Requerimiento de parámetros para el cumplimiento de normas, decreto o leyes.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Frecuencia de ejecución plan de mantenimiento. ❖ Técnica de mantenimiento predictivo. ❖ Costos de mantenimiento.

Tabla 1

Para comparar los criterios cuantitativamente se utiliza la escala de preferencia de pares (**Tabla 2**) descrita por Saaty, la cual otorga un valor numérico a una apreciación cualitativa.

Opción	Valor numérico
Ambos criterios tienen la misma importancia	1
Un criterio es moderadamente más importante que los otros (preferencia débil)	3
Un criterio es más importante que los otros	5
Un criterio es mucho más importante que los otros	7
Un criterio es extremadamente más importante que los otros	9
Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	2-4-6-8

Tabla 2

Solución: Entre los criterios mencionados anteriormente, en cada espacio a la izquierda, escriba de mayor a menor en orden descendente el criterio de más relevancia a su juicio (siendo 1 el de mayor relevancia para la selección). Dentro de las casillas ubicadas a la derecha, en base a la escala de preferencia (**Tabla 2**), coloque el valor numérico que crea correspondiente a su apreciación cualitativa. Cuando se relacionen el mismo criterio o criterios anteriormente valorados marque una guion en el cuadro del cruce.

Criterio	Económico	Técnico	Social	Ambiental	Normativo	Mantenimiento
1. Económico	4	3	1	5	6	
2. Social		4	1	3	6	
3. Ambiental			4	1	4	2
4. Técnico		2		1	3	
5. Normativo					2	
6. Mantenimiento						

La segunda fase de la encuesta consiste en comparar las tres alternativas mencionadas frente a un criterio en específico. Para ello, se vuelve a recurrir a las **Tabla 2**, para nuevamente dar un valor numérico a su apreciación cualitativa.

Solución: Enumerando las alternativas, potabilización [1], sector agropecuario [2], y recarga a fuentes subterráneas [3]. Frente a la casilla donde se menciona el criterio a comparar entre las tres alternativas, de izquierda a derecha, identifique cual alternativa en este criterio tiene un mayor impacto según los subcriterio descritos. En las siguientes filas, de un valor a la relevancia a su juicio según el enunciado, y en base a la **Tabla 2**.

	Valor
Preferencia - Criterio Económico	
1 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción dos	3
2 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción tres	6
3 Que tanta relevancia tiene la opción dos frente a las opción tres	4
Preferencia - Criterio Técnico	
1 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción dos	4
2 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción tres	4
3 Que tanta relevancia tiene la opción dos frente a las opción tres	2
Preferencia - Criterio Social	
1 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción dos	2
2 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción tres	4
3 Que tanta relevancia tiene la opción dos frente a las opción tres	4
Preferencia - Criterio Ambiental	
1 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción dos	2
2 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción tres	5
3 Que tanta relevancia tiene la opción dos frente a las opción tres	3
Preferencia - Criterio Normativo	
1 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción dos	6
2 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción tres	7
3 Que tanta relevancia tiene la opción dos frente a las opción tres	3
Preferencia - Criterio Mantenimiento	
1 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción dos	2
2 Que tanta relevancia tiene la opción uno frente a las opción tres	4
3 Que tanta relevancia tiene la opción dos frente a las opción tres	3

ANEXO D.

TABLAS DEL INFORME DE COSTOS DE INVERSIÓN Y DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE ALTERNATIVAS (PTARM CANOAS)

D.1 División de obras civiles para desarenador y sedimentador primario.

(2) Estructura o sub- instalación	(3) División CSI	(4) Ítem	(5) Unidad	(6) Cantidad	(7) Valor unitario COP
Desarenadores	02-trabajo sitio	Excavación y retiro de sobrantes	m ³	47.800	24.200
	02-trabajo sitio	Rellenos	m ³	6.100	59.000
	03-concreto	Concreto de 5000 psi	m ³	9.400	623.000
	05-metal	Acero de refuerzo	kg	1.220.100	4.800
	05-metal	Domo de aluminio	m ²	3.500	550.000
	03-concreto	Preparación del suelo	m ²	5.400	62.500
Sedimentadores primarios	02-trabajo sitio	Excavación y retiro de sobrantes	m ³	168.900	24.200
	02-trabajo sitio	Rellenos	m ³	76.300	59.000
	03-concreto	Concreto de 5000 psi	m ³	30.500	623.000
	03-concreto	Concreto de 4000 psi	m ³	0	0
	03-concreto	Concreto de 3500 psi	m ³	0	0
	03-concreto	Concreto de 3000 psi	m ³	1.100	534.000
	05-metal	Acero de refuerzo	kg	3.811.600	4.800
	05-metal	Domo de aluminio	m ²	33.300	550.000
	05-metal	Tensionado de cable	t-m	2.002.500	1.500
	03-concreto	Preparación del suelo	m ²	35.100	62.500

D.2 Costos de equipos para desarenador y sedimentador primario.

Equipo	Número de unidades	Costo unitario millones COP
Sedimentador primario	16	880
Lavador/compactador de arenas	16	140

D.3 Equipos electromecánicos para un sedimentador primario rectangular y circular.

Elementos	Sedimentadores rectangulares	Sedimentadores circulares
Distribución de caudal	Canales y compuertas distribuidores de caudal	Caja de distribución, vertederos y tubería
Colectores de lodo	Cadenas y rodamientos (acero inoxidable o plástico)	Mecanismo de recolección de lodos (raspador)
Colectores de natas	Caja recolectora de natas	Mecanismo superficial de recolección de natas
Tubería para lodos	Mínimas	Considerables
Bombeo del lodo y de las natas	Las bombas de lodos y de natas están localizadas en espacios diferentes.	Las bombas de lodos y de natas están localizadas en el mismo espacio.
Bombeo del efluente	Canal combinado que se dirige al pozo de almacenamiento	Diferentes tuberías que se dirigen al pozo de almacenamiento

D.4 Número de unidades de equipos electromecánicos y costos unitarios para un desarenador aireado

Equipo	Número de unidades	Costo unitario millones COP	Costo total millones COP
Desarenador aireado	14	470	6.580
Lavador/compactador de arenas	16	140	2.240
Sopladores	6	270	1.620

D.5 Tipos de bombas y costo unitario

Bomba	Operación o proceso unitario	Tipo de bomba	Producto bombeado	Cantidad		Q [m3/s]	HDT [m]	Precio unitario (millones COP)	Precio total (millones COP)
				En servicio	En reserva				
Bombeo de lodos desde sedimentadores secundarios a cámara de recepción de lodos biológicos (RAS)	Sedimentación secundaria	Centrifugas	Lodos secundarios, 1%	32	8	0,5	7,09	497	19.900
Bombas de drenaje en estaciones de bombeo de lodos biológicos	Sedimentación secundaria	Centrifugas sumergibles	Agua	4	4	0,0066	15	31	250
Bombeo de lodos de desecho (WAS) desde cámara de recepción de lodos biológicos a tanque de almacenamiento de WAS	Sedimentación secundaria	Centrifugas	Lodos secundarios, 1%	2	2	0,186	4,12	285	1.140
Bombas de trasiego en tanque de almacenamiento de hipoclorito	Desinfección	Diafragma	Hipoclorito de sodio 15%	2	0	0,0066	8	42	90
Sistema de dosificación de hipoclorito a cámara de contacto de cloro	Desinfección			4	2	6,50E-04	0,0000	30	1.810
Bombeo de lodos de desecho desde tanque de almacenamiento de WAS a espesadores secundarios	Espesamiento secundario	Centrifugas	Lodos secundarios, 1%	8	8	0,02325	15,37	68	1.090
Bombeo de retorno de agua residual a tratamiento primario - sidestream	Espesamiento secundario	Centrifugas	Agua (Sidestream)	2	0	0,15	17,80	79	160

D.6 Parámetros para determinar los costos de inversión para unidades de tratamiento

Ítem
Obra civil
Equipos
Instalación de equipos (25% del costo de equipos)
Automatización y control (5% del costo de equipos)
Imprevistos y contingencias (25% del total de inversión)

D.7 Desglose de factores para la determinación de costos de prestación de servicios

Concepto	Porcentaje
Salarios, prestaciones sociales, parafiscales	
Sueldo	100%
Parafiscales	36,5%
Prima legal	8,3%
Cesantías	8,3%
Intereses sobre cesantías	1,0%
Transporte	8,6%
Vacaciones	4,2%
Calzado y vestido de labor (de acuerdo al capítulo IV del CST)	10,0%
Entrenamiento	5,2%
Otros (Auxilios varios, prestaciones extralegales, Incapacidades no cubiertas)	1,0%

D.8 Estimación de salarios bases según el cargo y actividad a ejercer.

Cargo	Actividad (según resolución 0342 del 17 de abril de 2009. Actualización de precios 2013)	Personas	Salario mensual COP	Costo mensual (FP=2,43), COP	Costo anual millones (COP)
Director PTAR	Categoría 1	1	\$ 9.030.000	\$ 21.900.000	\$ 270
Jefe de división administrativa y financiera	Categoría 4	1	\$ 4.840.000	\$ 11.800.000	\$ 150
Jefe de calidad	Categoría 5	1	\$ 3.800.000	\$ 9.200.000	\$ 120
Almacenista	Tecnólogo	1	\$ 1.680.000	\$ 4.100.000	\$ 50
Jefe de división ambiental y control de calidad	Categoría 4	1	\$ 4.840.000	\$ 11.800.000	\$ 150
Profesional ambiental	Categoría 6	1	\$ 3.240.000	\$ 7.900.000	\$ 100
Profesional gestión social	Categoría 6	1	\$ 3.240.000	\$ 7.900.000	\$ 100
SISO	Categoría 8	1	\$ 2.300.000	\$ 5.600.000	\$ 70
Secretaría administrativa	Auxiliar administrativo	1	\$ 1.140.000	\$ 2.800.000	\$ 40
Auxiliar técnico-administrativo	Auxiliar de ingeniería	1	\$ 1.510.000	\$ 3.700.000	\$ 50
Jefe de división operativa y técnica	Categoría 4	1	\$ 4.840.000	\$ 11.800.000	\$ 150
Jefe de turno	Categoría 8	4	\$ 2.300.000	\$ 5.600.000	\$ 270
Operador técnico	Tecnólogo	28	\$ 1.680.000	\$ 4.100.000	\$ 1.380

D.9 Descripción de consumo energética por equipos electromecánico en desarenador y sedimentador primario.

Equipo mecánico	Descripción	Fase	No. motores en servicio	No. motores en reserva	Potencia por motor [kW]	Capacidad instalada [kVA]	Factor de demanda	Potencia demandada [kVA]
Desarenación [14 desarenadores]								
Compuertas deslizantes de entrada a canales desarenadores	El agua de los canales de cribado llega a dos canales de afluente comunes y se reparte en 14 canales desarenadores aireados (siete desarenadores por canal común). En la entrada de cada uno de los canales superiores se instalarán compuertas deslizantes superficiales	I	14	0	3,7	64,75	0,01	0,65
Sopladores de aire	Se instalarán 6 sopladores de 60 m ³ /min	I	5	1	75	563	1	468,75
Tornillo sin fin en canales desarenadores para remoción de arenas	2 tornillos por canal, uno en el canal superior y otro en el canal inferior. Los tornillos llevan las arenas hasta un pozo instalado al final del canal.	I	28	0	12	420	0,2	84,00
Bombeo de arena desde foso de bombeo a estación de clasificado y lavado de arenas	Habrán dos fosos de bombeo de arena, uno por cada grupo de desarenadores - Bombas Torque Flow de 26,5 L/s.	I	28	0	15	525	0,2	86,59
Estación de clasificado y lavado de arena	16 clasificadores de arena; 14 en servicio y 2 en standby	I	14	2	2	40	1	35,00
Tolvas para arenas (con compuertas motorizadas)	Descargan la arena a los camiones	I	6	0	1,5	11,25	0,05	0,56

Equipo mecánico	Descripción	Fase	No. motores en servicio	No. motores en reserva	Potencia por motor [kW]	Capacidad instalada [kVA]	Factor de demanda	Potencia demandada [kVA]
Sedimentación primaria [16 sedimentadores]								
Sedimentador primario (rastrillos circulares de un brazo)		I	16	0	3,7	74,6	1	74,6
Bombeo de natas desde sedimentadores primarios a tanque de almacenamiento de lodos espesados	- Bombas desmenuzadoras de 7,9 L/s. - 4 en servicio; 4 en reserva	I	4	4	5	50	0,05	0,70
Bombeo de lodos desde sedimentadores a desarenador de lodos	Bombas centrífugas de 16 L/s. - 16 en servicio; 8 en reserva	I	16	8	10	300	0,78	85,69
Bombas de drenaje en estación de bombeo de lodo primario	- Bombas centrífugas sumergibles de 6,6 L/s. - Una principal y una en stand-by en cada estación de bombeo	I	8	8	1,5	30	0,1	1,42
Equipo de izaje para mantenimiento en estaciones de bombeo de lodo primario	Una en cada estación de bombeo	I	8	0	9	90	0,01	0,9

D.10 Porcentajes para la determinación de costos de mantenimiento

Operación y mantenimiento	millones COP/Año	millones COP/Año	millones COP/Año
	Fase I	Fase I + Fase II	Fase I + Fase II + Fase III
Mantenimiento obra civil, 0,5% OC	1.750	3.400	4.580
Mantenimiento equipo electromecánico, 5% EE	20.215	33.150	36.780

OC: obra civil, EE: equipo electromecánico,

ANEXO E.

COTIZACIONES MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

E.1 Tarifas Enel-Codensa [kW/h] para sector no residencial y oficial e industrial año 2020.

SECTOR NO RESIDENCIAL								
			NIVEL 1 PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh)	NIVEL 1 PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh)	NIVEL 1 PROPIEDAD COMPARTIDA (*) (\$/kWh)	NIVEL 2 (11.4 y 13.2 kV) (\$/kWh)	NIVEL 3 (34.5 kV) (\$/kWh)	NIVEL 4 (115 kV) (\$/kWh)
OFICIAL E INDUSTRIAL SIN CONTRIBUCIÓN	SENCILLA	Monomía	538,4175	499,7685	519,0930	430,2028	397,8218	343,0608
		Punta	541,0526	502,4036	521,7281	432,4040	399,0388	344,2626
		Fuera de Punta	539,5071	500,8581	520,1826	431,2597	399,8102	345,6230
	OPCIONES HORARIAS (**)							

E.2 Tarifas EmserTenjo [m3] para el sector agropecuario en Tenjo año 2020.

Resultados Estudio Tarifario efectuado con base en Resolución CRA 853 de 2018 modificada a través de las Resolución CRA 883 de 2019, las aclaraciones y corrección de errores realizadas con la Resolución CRA 892 de 2019, y las adiciones realizadas con la Resolución CRA 901 de 2019.

	CCS	CBLUS	CFT	CRT	CDFT	CT	CVNA	CVA
Min	1,775.80	12,255.39	14,031.20	69,334.17		-	97,324.81	95,973.41
Máx	1,644.04	13,306.98	14,810.64	153,175.89	30,638.14		181,166.53	176,461.47
Valor Seleccionado (\$ Jul 2018)	1,644.04	12,255.39	13,899.44	87,000.00	30,638.14	-	114,990.64	112,932.61
Valor Seleccionado (\$ May 2020)	1,746.48	13,019.04	14,765.52	92,421.05	32,547.23	-	122,155.82	119,969.55

USUARIOS OCUPADOS	CFT	CVNA	TRN	CVA	TRA	Tarifa Final	Fi	Valor a Pagar
Residencial Estrato 1	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	0.80	3,128.92
Residencial Estrato 2	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	0.50	7,822.30
Residencial Estrato 3	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	0.40	9,386.76
Residencial Estrato 4	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	-	15,644.61
Residencial Estrato 5	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	0.50	23,466.91
Residencial Estrato 6	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	0.60	25,031.37
Comercial	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	0.50	23,466.91
Industrial	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	0.30	20,337.99
Oficial	14,765.52	122,155.82	0.00	119,969.55	0.00	15,644.61	-	15,644.61

E.3 Cotización CEMEX concreto 3000 y 5000 psi para el año 2020.



Jueves 2 de julio de 2020

Validez de la oferta 15 días hasta **viernes 17 de julio de 2020**
Número de oferta: **2321693**

Nombre de cliente: **German Eduardo Robayo**
Teléfono: **3165337281**
e-mail: robayo_german1209@outlook.com
Ciudad: **Tenjo Cundinamarca**
Nombre de obra: **German Eduardo Robayo**
Dirección obra: **Tenjo Cundinamarca**
Dirección facturación: **Tenjo Cundinamarca**

Cordial Saludo

Sr(a) German Eduardo Robayo

En atención a su solicitud, le presentamos la oferta económica para el suministro de los productos y servicios CEMEX en Tenjo Cundinamarca

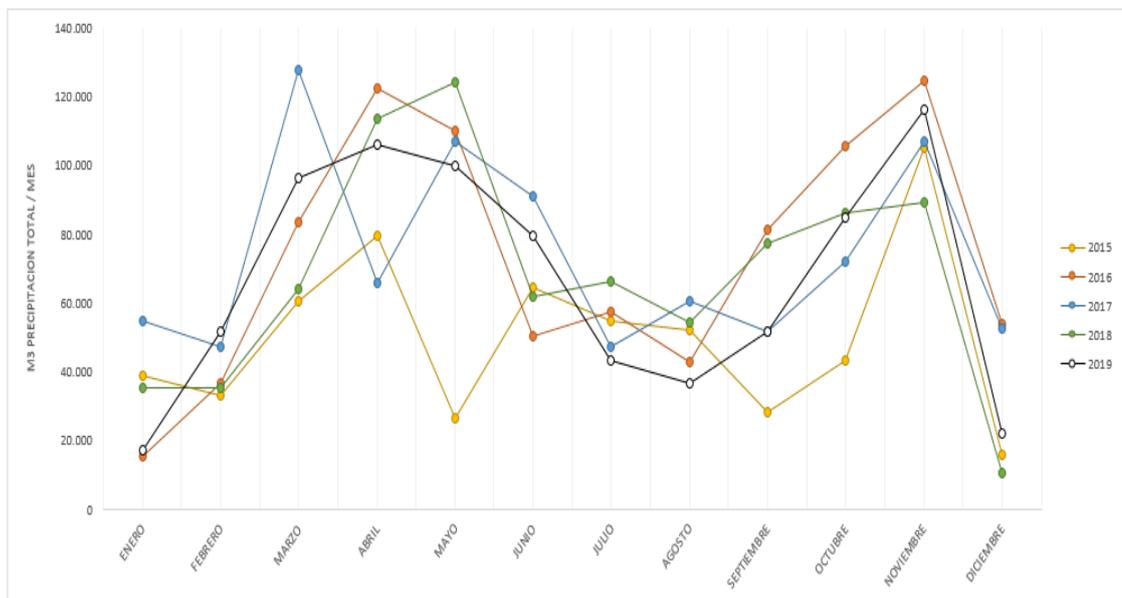
Concretos: Productos	Cantidad (m3)	U Antes de IVA	Total Antes de IVA	Total Incluido IVA
Bombeable 210 kg/cm2 Grava1* 28días AS13cm	1	\$ 324.171	\$ 324.171	\$ 385.763
Sostenibilidad	1	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.760
Subtotal Bombeable 210 kg/cm2 Grava1* 28días AS13cm	1	\$ 328.171	\$ 328.171	\$ 390.523
Bombeable 350 kg/cm2 Grava1* 28días AS13cm	1	\$ 370.236	\$ 370.236	\$ 440.581
Sostenibilidad	1	\$ 4.000	\$ 4.000	\$ 4.760
Subtotal Bombeable 350 kg/cm2 Grava1* 28días AS13cm	1	\$ 374.236	\$ 374.236	\$ 445.341
		\$ -	\$ -	\$ -
		\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal	0	\$ -	\$ -	\$ -
		\$ -	\$ -	\$ -
		\$ -	\$ -	\$ -

ANEXO F.

DATOS PLUVIOMÉTRICOS CASCO URBANO MUNICIPIO DE TENJO. PRECIPITACIONES MENSUALES Y ANULES (IDEAM)

DATOS HIDROLOGICOS TENJO, CUNDINAMARCA										
PRECIPITACIONES [mm]										
	PROM	SUMA								
AÑO	2015		2016		2017		2018		2019	
ENERO	2,28	70,80	0,91	28,10	3,22	99,80	2,09	64,70	1,02	31,50
FEBRERO	2,15	60,30	2,30	66,60	3,08	86,20	2,31	64,80	3,38	94,70
MARZO	3,56	110,30	4,92	152,40	7,52	233,00	3,77	117,00	5,67	175,90
ABRIL	4,84	145,20	7,44	223,20	4,01	120,40	6,89	206,80	6,44	193,20
MAYO	1,57	48,60	6,48	200,90	6,30	195,40	7,32	226,80	5,88	182,40
JUNIO	3,91	117,40	3,06	91,80	5,54	166,10	3,76	112,90	4,83	145,00
JULIO	3,23	100,20	3,38	104,90	2,79	86,40	3,89	120,50	2,55	79,00
AGOSTO	3,06	94,90	2,53	78,30	3,55	110,20	3,21	99,50	2,17	67,20
SEPTIEMBRE	1,73	51,80	4,94	148,20	3,15	94,60	4,55	141,20	3,13	94,00
OCTUBRE	2,55	79,10	6,22	192,70	4,23	131,10	5,07	157,20	4,99	154,6
NOVIEMBRE	6,40	192,00	7,58	227,50	6,51	195,20	5,41	162,40	7,08	212,3
DICIEMBRE	0,94	29,10	3,18	98,60	3,11	96,30	0,64	19,70	1,31	40,5

DATOS HIDROLOGICOS TENJO, CUNDINAMARCA										
CANTIDAD EN M3 DE AGUA CENTRO TENJO										
	PROM	SUMA								
AÑO	2015		2016		2017		2018		2019	
ENERO	1.251,56	38.798,40	496,74	15.398,80	1.764,21	54.690,40	1.143,73	35.455,60	556,84	17.262,00
FEBRERO	1.180,16	33.044,40	1.258,51	36.496,80	1.687,06	47.237,60	1.268,23	35.510,40	1.853,41	51.895,60
MARZO	1.949,82	60.444,40	2.694,04	83.515,20	4.118,84	127.684,00	2.068,26	64.116,00	3.109,46	96.393,20
ABRIL	2.652,32	79.569,60	4.077,12	122.313,60	2.199,31	65.979,20	3.777,55	113.326,40	3.529,12	105.873,60
MAYO	859,12	26.632,80	3.551,39	110.093,20	3.454,17	107.079,20	4.009,24	124.286,40	3.224,36	99.955,20
JUNIO	2.144,51	64.335,20	1.676,88	50.306,40	3.034,09	91.022,80	2.062,31	61.869,20	2.648,67	79.460,00
JULIO	1.771,28	54.909,60	1.854,36	57.485,20	1.527,33	47.347,20	2.130,13	66.034,00	1.396,52	43.292,00
AGOSTO	1.677,59	52.005,20	1.384,14	42.908,40	1.948,05	60.389,60	1.758,90	54.526,00	1.187,92	36.825,60
SEPTIEMBRE	946,21	28.386,40	2.707,12	81.213,60	1.728,03	51.840,80	2.496,05	77.377,60	1.717,07	51.512,00
OCTUBRE	1.398,28	43.346,80	3.406,44	105.599,60	2.317,51	71.842,80	2.778,89	86.145,60	2.732,93	84.720,80
NOVIEMBRE	3.507,20	105.216,00	4.155,67	124.670,00	3.565,65	106.969,60	2.966,51	88.995,20	3.878,01	116.340,40
DICIEMBRE	514,41	15.946,80	1.742,99	54.032,80	1.702,34	52.772,40	348,25	10.795,60	715,94	22.194,00
TOTAL	19.852,46	602.635,60	29.005,40	884.033,60	29.046,58	884.855,60	26.808,03	818.438,00	26.550,24	805.724,40



ANEXO G.

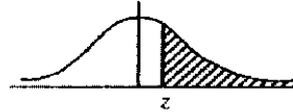
TABLA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL TIPIFICADA

TABLA DE LA DISTRIBUCION NORMAL TIPIFICADA $N[0, 1]$

$F(z) = P(Z \leq z)$



$1 - F(z) = P(Z > z)$



z	F(z)	1-F(z)	z	F(z)	1-F(z)	z	F(z)	1-F(z)
0.00	0.5000	0.5000	0.50	0.6915	0.3085	1.00	0.8413	0.1587
0.01	0.5040	0.4960	0.51	0.6950	0.3050	1.01	0.8437	0.1563
0.02	0.5080	0.4920	0.52	0.6985	0.3015	1.02	0.8461	0.1539
0.03	0.5120	0.4880	0.53	0.7019	0.2981	1.03	0.8485	0.1515
0.04	0.5160	0.4840	0.54	0.7054	0.2946	1.04	0.8508	0.1492
0.05	0.5199	0.4801	0.55	0.7088	0.2912	1.05	0.8531	0.1469
0.06	0.5239	0.4761	0.56	0.7123	0.2877	1.06	0.8554	0.1446
0.07	0.5279	0.4721	0.57	0.7157	0.2843	1.07	0.8577	0.1423
0.08	0.5319	0.4681	0.58	0.7190	0.2810	1.08	0.8599	0.1401
0.09	0.5359	0.4641	0.59	0.7224	0.2776	1.09	0.8621	0.1379
0.10	0.5398	0.4602	0.60	0.7257	0.2743	1.10	0.8643	0.1357
0.11	0.5438	0.4562	0.61	0.7291	0.2709	1.11	0.8665	0.1335
0.12	0.5478	0.4522	0.62	0.7324	0.2676	1.12	0.8686	0.1314
0.13	0.5517	0.4483	0.63	0.7357	0.2643	1.13	0.8708	0.1292
0.14	0.5557	0.4443	0.64	0.7389	0.2611	1.14	0.8729	0.1271
0.15	0.5596	0.4404	0.65	0.7422	0.2578	1.15	0.8749	0.1251
0.16	0.5636	0.4364	0.66	0.7454	0.2546	1.16	0.8770	0.1230
0.17	0.5675	0.4325	0.67	0.7486	0.2514	1.17	0.8790	0.1210
0.18	0.5714	0.4286	0.68	0.7517	0.2483	1.18	0.8810	0.1190
0.19	0.5753	0.4247	0.69	0.7549	0.2451	1.19	0.8830	0.1170
0.20	0.5793	0.4207	0.70	0.7580	0.2420	1.20	0.8849	0.1151
0.21	0.5832	0.4168	0.71	0.7611	0.2389	1.21	0.8869	0.1131
0.22	0.5871	0.4129	0.72	0.7642	0.2358	1.22	0.8888	0.1112
0.23	0.5910	0.4090	0.73	0.7673	0.2327	1.23	0.8907	0.1093
0.24	0.5948	0.4052	0.74	0.7704	0.2296	1.24	0.8925	0.1075
0.25	0.5987	0.4013	0.75	0.7734	0.2266	1.25	0.8944	0.1056
0.26	0.6026	0.3974	0.76	0.7764	0.2236	1.26	0.8962	0.1038
0.27	0.6064	0.3936	0.77	0.7794	0.2206	1.27	0.8980	0.1020
0.28	0.6103	0.3897	0.78	0.7823	0.2177	1.28	0.8997	0.1003
0.29	0.6141	0.3859	0.79	0.7852	0.2148	1.29	0.9015	0.0985
0.30	0.6179	0.3821	0.80	0.7881	0.2119	1.30	0.9032	0.0968
0.31	0.6217	0.3783	0.81	0.7910	0.2090	1.31	0.9049	0.0951
0.32	0.6255	0.3745	0.82	0.7939	0.2061	1.32	0.9066	0.0934
0.33	0.6293	0.3707	0.83	0.7967	0.2033	1.33	0.9082	0.0918
0.34	0.6331	0.3669	0.84	0.7995	0.2005	1.34	0.9099	0.0901
0.35	0.6368	0.3632	0.85	0.8023	0.1977	1.35	0.9115	0.0885
0.36	0.6406	0.3594	0.86	0.8051	0.1949	1.36	0.9131	0.0869
0.37	0.6443	0.3557	0.87	0.8079	0.1921	1.37	0.9147	0.0853
0.38	0.6480	0.3520	0.88	0.8106	0.1894	1.38	0.9162	0.0838
0.39	0.6517	0.3483	0.89	0.8133	0.1867	1.39	0.9177	0.0823
0.40	0.6554	0.3446	0.90	0.8159	0.1841	1.40	0.9192	0.0808
0.41	0.6591	0.3409	0.91	0.8186	0.1814	1.41	0.9207	0.0793
0.42	0.6628	0.3372	0.92	0.8212	0.1788	1.42	0.9222	0.0778
0.43	0.6664	0.3336	0.93	0.8238	0.1762	1.43	0.9236	0.0764
0.44	0.6700	0.3300	0.94	0.8264	0.1736	1.44	0.9251	0.0749
0.45	0.6736	0.3264	0.95	0.8289	0.1711	1.45	0.9265	0.0735
0.46	0.6772	0.3228	0.96	0.8315	0.1685	1.46	0.9279	0.0721
0.47	0.6808	0.3192	0.97	0.8340	0.1660	1.47	0.9292	0.0708
0.48	0.6844	0.3156	0.98	0.8365	0.1635	1.48	0.9306	0.0694
0.49	0.6879	0.3121	0.99	0.8389	0.1611	1.49	0.9319	0.0681