

**Diagnóstico del estado actual del acueducto de San Joaquín (Cundinamarca), para el
reconocimiento de sus necesidades y posibles mejoras.**

David Alexander Roperó Leal
Laura Vanessa Zurita Cervera

Universidad Santo Tomás
Facultad de ingeniería civil
Bogotá D. C.
2024

**Diagnóstico del estado actual del acueducto de San Joaquín (Cundinamarca), para el
reconocimiento de sus necesidades y posibles mejoras.**

David Alexander Roperó Leal

Laura Vanessa Zurita Cervera

Director: Antonio Preziosi Ribero, PhD



Universidad Santo Tomás
Facultad de ingeniería civil
Bogotá D. C.

2024

Dedicatoria

A nuestros padres, por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y por inculcarnos el valor del esfuerzo y la perseverancia. A nuestros hermanos, por su compañerismo, paciencia y por siempre estar ahí para celebrar nuestros logros y ofrecer sus hombros en los momentos difíciles. A nuestros profesores y mentores, por compartir sus conocimientos, guiarnos en nuestra formación académica y por creer en nuestro potencial. Agradecemos especialmente a Antonio Preziosi por su invaluable orientación y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Tabla de contenido

Introducción	6
Localización	8
Justificación	9
Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
Marco teórico	12
Metodología	14
Antecedentes	16
Diseño Esquemático Bocatoma río Apulo.....	19
1. Población de diseño	19
a. Método geométrico	19
b. Método aritmético	20
c. Método exponencial.....	20
2. Datos iniciales.....	21
3. Diseño de la presa	21
4. Diseño de la rejilla y el canal de aducción	22
5. Diseño de cámara de recolección.....	26
6. Cálculos de la altura de los muros de contención	26
7. Cálculos del caudal de exceso	27
8. Cálculos de la tubería de excesos.....	28
Red de distribución	29
Laboratorios	35
1. Datos iniciales.....	35
2. Ensayos de tratabilidad con coagulantes.....	35
1.1 Ensayo de tratabilidad con coagulantes hecho in situ.....	36
1.2 Ensayo de tratabilidad con coagulante hecho en laboratorio.	41
1.3 Ensayo de tratabilidad con coagulante hecho en laboratorio.	47
1.4 Ensayo de tratabilidad con coagulante hecho en laboratorio.	50

Conclusiones	57
Recomendaciones	59
Bibliografía	61

Introducción

Según la declaración de los derechos humanos, el acceso al agua potable es un derecho fundamental para la vida. En Colombia muchos lugares no cuentan con acceso a agua potable o sanidades mínimas para el consumo humano, como lo establece la NTC 3903 y Resolución No. 2115 del 22 de junio de 2007. Uno de estos lugares es la inspección municipal de **San Joaquín**, municipio la Mesa, en el departamento de Cundinamarca, y este trabajo de grado pretende dar un diagnóstico de la planta de agua potable (**PTAP**), y del sistema de distribución de agua potable de esta inspección.

San Joaquín cuenta con una población de 1500 habitantes, según cifras del DANE para el 2018, de los cuales 1400 son suscriptores del acueducto veredal y alcantarillado del municipio. En un principio, el acueducto estaba diseñado para 400 suscriptores, por ende, ha aumentado cerca de un 350%, por lo que **San Joaquín** tiene una red insuficiente de acueducto para suplir a su población, por esto los habitantes tienen racionamientos en el suministro de agua potable, mientras que en algunos casos se tiene que recurrir al almacenamiento de agua lluvia.

En este sentido, los caudales de demanda han aumentado sin un aumento significativo en la infraestructura de tratamiento y transporte de agua. Esta red veredal, como se menciona anteriormente no es suficiente para las necesidades de la población dado el incremento de esta. En consecuencia, es necesario realizar modificaciones tanto en la infraestructura de la planta como en los procesos de esta. Por lo tanto, este proyecto busca enfocarse en los procesos que actualmente se realizan en la **PTAP**.

Durante una inspección preliminar se reconoció que la planta se compone por dos tipos de unidades de tratamiento distintas, una planta compacta y otra convencional. Se identificaron diversas problemáticas dentro del complejo de tratamiento de aguas. Entre estas,

la turbidez representa un desafío importante, dado que no es posible cumplir de manera permanente con las regulaciones de calidad de agua. Este problema se intensifica durante los periodos de altas precipitaciones, lo que complica aún más su tratamiento. Asimismo, se detectaron complicaciones con el proceso de floculación dado que el *floc* es muy ligero, lo que propicia su ascenso en lugar de una sedimentación adecuada.

De igual manera, se identificó que la captación se realiza a través de dos fuentes hídricas distintas, una en el río Apulo y otra en el río Bahamón. En relación con esto, se observó que la bocatoma del río Apulo presenta daños estructurales y requiere de un rediseño integral que garantice la captación de agua cruda. Es importante destacar que el río Apulo nace en el alto de petaqueros, en la Reserva Natura de Peñas Blancas, mientras que el río Bahamón nace en la vereda Goteras de Anolaima y desemboca sobre el río Apulo en la zona alta de Cachipay. El agua cruda de ambas fuentes hídricas es captada hasta dos plantas, con un nivel de contaminación evidente y una turbiedad alta.

Según **Liévano**, en el año 2019 en su estudio de calidad biológica de las aguas superficiales de la cuenca del río Apulo se usó el sistema para medir la calidad del agua *British Monitoring Working Party (BMWP)*. El estudio determinó un índice de 52 BMWP para el río Apulo y 82 BMWP para el río Bahamón, lo que indica un valor de contaminación evidente en el agua.

Por tanto ¿Como mejorar el desempeño al acceso de agua potable para los suscriptores actuales y que sea correctamente tratada en la inspección de **San Joaquín**, teniendo en cuenta la situación actual del acueducto?

Localización

San Joaquín es una inspección del municipio de La Mesa, en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Sus vías principales de acceso son: la Vía La Mesa - San Joaquín y la Vía El Colegio - San Joaquín, además de otras vías terciarias que acceden a San Joaquín desde diferentes veredas del municipio de La Mesa. La economía del pueblo se basa principalmente en la agricultura, la ganadería y el turismo debido a su clima cálido.

Figura 1

Localización de San Joaquín, La Mesa.



Nota. Fuente: Google Maps. **San Joaquín** limita con varias veredas como: la vereda El Triunfo, La Palma, La Cabaña, El Carmen, El espino, entre otras.

Justificación

Con el tiempo la ingeniería civil ha cambiado, su desarrollo desde la infraestructura básica como vías, puentes, edificaciones y sistemas de agua y saneamiento, pasando por el auge de la sostenibilidad, la protección del medio ambiente y la implementación de nuevas tecnologías. No obstante, siempre bajo el ideal de mejorar la calidad de vida de las personas, satisfaciendo necesidades sociales, económicas y ambientales.

A nivel mundial, el acceso a agua potable y de calidad es un gran desafío. Según la Organización Mundial de la Salud, para el año 2022, más de 2.000 millones de personas en el mundo no tenía acceso a agua potable, por lo que diagnósticos como el que se presenta en este proyecto de grado son de gran importancia, ya que permiten evaluar las condiciones en las que se encuentran las plantas de tratamiento de agua potable y permiten establecer las mejoras necesarias con el fin de implementarlas y hacer el proceso más eficiente.

Al observar las falencias del sistema de acueducto de **San Joaquín**, junto al conocimiento adquirido a lo largo de la carrera, nació la posibilidad contribuir a dicha comunidad. Sumado a esto y teniendo en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible (**ODS**) propuestos para el 2030, más específicamente el **ODS 6** «Agua limpia y saneamiento», **San Joaquín** no está cumpliendo con garantizar el acceso universal al agua potable ni de calidad. Por lo tanto, es importante ayudar a generar propuestas que puedan ayudar a mejorar la calidad de agua y por tanto aportar al **ODS 6**. Asimismo, en el **ODS 11** «Ciudades y comunidades sostenibles», al tener en cuenta que el agua es un recurso indispensable y limitado, debe haber una regulación de está mejorando su calidad y evitando su posible contaminación. El presente proceso genera un aporte mejorando la calidad del agua para **San Joaquín**.

Teniendo en cuenta que el acueducto de San Joaquín es administrado por la comunidad, nace la necesidad de realizar este proyecto donde se busca mejorar la calidad del agua, resolviendo problemas técnicos que actualmente se tienen en la administración del acueducto. Dado que **San Joaquín** se encuentra alejado de la cabecera municipal, no se le presta la suficiente atención a este tipo de problemáticas sociales directamente relacionadas con un derecho fundamental como lo es el acceso al agua potable. Por lo tanto, la comunidad ha tenido que optar por soluciones a corto plazo y sin garantías como lo son la recolección de agua lluvias y el uso de autobombas para suplir su necesidad.

Acorde a lo anterior, se busca contribuir a la comunidad y al acueducto de **San Joaquín** dando una propuesta técnica de mejoramiento de procesos de la **PTAP** y una modelación del acueducto actual.

Objetivos

Objetivo general

Realizar un estudio de prefactibilidad operativa para el acueducto veredal **San Joaquín**, teniendo en cuenta análisis de calidad de agua y resultados de modelación hidráulica, contribuyendo al manejo racional e integrado del recurso hídrico.

Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico del estado actual de la planta tratamiento de agua potable de **San Joaquín**, identificando las deficiencias más relevantes de dicha planta.
- Realizar un diseño esquemático de la bocatoma para el río Apulo, teniendo en cuenta las características de la fuente hídrica y las necesidades de la planta de tratamiento.
- Evaluar las posibles soluciones según las deficiencias anteriormente identificadas, por medio de inspecciones visuales, uso de literatura y laboratorios (ensayo de jarras, mediciones de pH, mediciones de turbiedad, entre otros).
- Modelar la red de distribución actual del acueducto de San Joaquín, por medio de software (EPANET), en estado estacionario.
- Hacer una propuesta con mejoras a la planta de tratamiento de agua potable considerando la evaluación realizada anteriormente.

Marco teórico

El agua potable es un recurso vital para la supervivencia, pero su disponibilidad se encuentra amenazada por diversos factores como la contaminación, el cambio climático y el crecimiento poblacional.

En Colombia, el acceso a agua potable segura es un desafío importante, según cifras del DANE solo el 85% de la población urbana y el 57% de la población rural tiene acceso a agua potable por red pública. Además, la calidad del agua potable en algunos municipios no cumple con los estándares establecidos por la normativa, entre las cuales se encuentra:

- **Ley 99 de 1993** por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y se reordena el Sector Ambiental Colombiano.
- **Decreto 1594 de 1984** por el cual se reglamenta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente.
- **Decreto 1575 de 2007** por el cual se establece el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- **Resolución 2115 de 2007** por la cual se establecen los parámetros y valores máximos permisibles en el vertimiento de aguas residuales a los cuerpos de agua superficiales y al sistema de alcantarillado público.
- **Decreto 1076 de 2015** por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico.

Las plantas de tratamiento de agua potable utilizan diversos procesos para eliminar contaminantes y asegurar la calidad del agua, los cuales pueden modificarse según las necesidades de la población a suministrar, los principales procesos son:

- **Pretratamiento:** en este proceso se eliminan partículas gruesas como ramas, hojas o piedras.
- **Coagulación y floculación:** estos son dos procesos complementarios en donde se agrupan las partículas pequeñas para que puedan ser eliminadas por sedimentación.
- **Sedimentación:** en este punto las partículas floculadas se depositan en el fondo de un tanque dejando clarificada el agua en la superficie.
- **Filtración:** donde se eliminan las partículas finas e impurezas.
- **Desinfección:** se elimina la mayoría de los microorganismos previniendo la transmisión de enfermedades.

Ahora bien, la calidad del agua se ha convertido en un problema global, por lo que los gobiernos apuestan por la investigación y creación de nuevas tecnologías que se pueden implementar en el tratamiento del agua, entre las cuales se encuentra:

- **Filtración por membranas:** permite el paso del agua pura mientras retiene partículas y contaminantes de menor tamaño que los filtros tradicionales.
- **Desinfección con luz ultravioleta:** por medio de la luz UV se eliminan los microorganismos presentes en el agua.
- **Oxidación avanzada:** elimina contaminantes orgánicos y microorganismos mediante la generación de radicales hidroxilos.
- **Desalinización:** permite obtener agua potable a partir de agua de mar.

Metodología

En este proyecto de grado se busca dar posibles soluciones al estado actual de la planta de tratamiento de agua potable de **San Joaquín** por medio de un enfoque integral, es decir teniendo en cuenta una metodología cualitativa y cuantitativa, en donde se llevarán a cabo una secuencia de pasos que se muestran a continuación:

Objetivo	Actividad	Descripción	Resultado
Realizar un diagnóstico del estado actual de la planta tratamiento de agua potable del municipio de San Joaquín, identificando las deficiencias más relevantes de dicha planta.	Diagnóstico de la situación actual	Visitas a la PTAP y la asistencia a las asambleas del pueblo, para observar las falencias y dificultades de la administración del acueducto, sin dejar de lado la percepción y necesidades de la población.	Realizar un análisis preliminar del estado actual de la planta de potabilización del municipio de San Joaquín.
Evaluar las posibles soluciones según las deficiencias anteriormente identificadas, por medio de inspecciones visuales, uso literatura y laboratorios (ensayo de jarras, mediciones de pH, mediciones de turbiedad, entre otros).	Evaluación de posibles soluciones 1. Revisión de literatura:	Con herramientas tecnológicas como la base de datos, se hará una revisión bibliográfica de la literatura pertinente.	Realizar un estado del arte que permita tomar ideas y plantear posibles alternativas a las problemáticas presentadas.
	2. Laboratorio y/o mediciones:	Por medio de ensayo de jarras se evaluarán los coagulantes y las opciones más viables a usar en la PTAP.	Determinar el coagulante más indicado para ser usado en el proceso de floculación de la PTAP teniendo en cuenta su costo-beneficio.

	3. Modelación de red del acueducto:	Por medio de un software (EPANET), se planteará la red actual en el acueducto de San Joaquín.	Realizar una modelación del estado actual de la red actual del acueducto del municipio de San Joaquín.
Proponer mejoras a la planta de tratamiento de agua potable, considerando la evaluación realizada anteriormente.	Elaboración de propuestas de solución	Teniendo las posibles soluciones a las problemáticas de la planta, se busca plantear una posible propuesta de mejora, en donde se tendrán en cuenta factores sociales y económicos.	Redactar un documento técnico que especifique las alternativas para los problemas, para entregarse al gerente del acueducto de San Joaquín.

Antecedentes

“La carga orgánica biodegradable (DBO5) vertida a los sistemas hídricos después de tratamiento en Colombia durante el año 2012 alcanzó 756.945T/año, que equivalen a 2.102 T/día. De este total, la industria aporta el 28%, el sector doméstico el 69% y el sector cafetero el 3%. El 80% de la carga de DBO5 fue aportada por 55 municipios principalmente por las áreas metropolitanas y ciudades grandes del país: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Cúcuta, Villavicencio y Manizales.

En 179 municipios ubicados en 15 departamentos se estimó una carga vertida en 2012 de 205 toneladas de mercurio al suelo y agua, de las cuales 27.5% corresponden al uso para beneficio de la plata y 72.5% al beneficio de oro.” (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, s.f)

En donde DBO5 es una carga importante a la posible contaminación de fuentes hídricas siendo principalmente a causa del sector cafetero en la zona junto con la ganadería, asimismo como las cantidades de mercurio vertidas sobre estas, donde principalmente estos metales pesados como el mercurio son vertidos por explotaciones mineras ilegales de oro y plata principalmente, siendo este metal pesado asociado con enfermedades en el sistema nervioso, daños al sistema digestivo, pulmones, entre otros.

“Por su parte, el Instituto Nacional de Salud (INS) – en su boletín de vigilancia de la calidad del agua para consumo humano de abril de este año– informó que se reportaron 89 muestras de agua potable que fueron establecidas como inviables sanitariamente, las cuales se encuentran mayoritariamente en municipios de Antioquia, Caldas, Huila, Nariño, Tolima y Valle.

Lo anterior sin dejar de lado que la mala calidad del agua está asociada a enfermedades gastrointestinales, hepatitis A, intoxicación por metales pesados, tóxicos

ambientales disueltos en agua que pueden afectar el sistema neurológico, respiratorio y cardiovascular, entre otros.” (Pérez Campos, 2022)

Según el boletín de vigilancia de la calidad de agua para consumo humano dado por el INS para marzo del 2019, la calidad del agua en el municipio de La Mesa Cundinamarca se encuentra en un nivel de riesgo medio, lo que permite inferir que el agua no es apta para el consumo humano, pero el riesgo de contraer enfermedades relacionadas con la contaminación del agua puede disminuirse con una gestión directa.

Figura 2

IRCA departamental por ubicación de muestras urbano-rural

Municipio	Prestador del servicio de acueducto en el área rural que califican el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para consumo humano IRCA	Nombre del laboratorio	Valor promedio del IRCA en el año 2018, calculado por el laboratorio privado
	ASOAGUAS E.S.P	AGUA PAZ	1,79
	AGUASISO E.S.P	EPM SIBATÉ	3,41
	ACURESAN	AGUA PAZ	92
Pasca	COLORADOS	SECRETARÍA DE SALUD	Sin reporte
Silvania	AUASC Asociación de Usuarios de Acueducto y Alcantarillado Subía Central	AGUA PAZ	Sin reporte
	Pedro Vargas (Subía Las Delicias)	ACOPI	98
	AUAR (Subía Oriental)	AGUA PAZ	12,5
Tibacuy	Secretaría de Planeación, Obras Públicas y Servicios Públicos de Tibacuy	EMSERFUSA E.S.P	3,6
Tequendama			
Anapoima	Asociación de Usuarios del Acueducto Regional El Consuelo	H2O ES VIDA S.A.S	0
Apulo	Empresa de Servicio de Acueducto, Alcantarillado y Aseo del Municipio de Apulo - EMPOAPULO S.A E.S.P	LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS DE AGUA Y ALIMENTOS ASESORÍAS	28,8
La Mesa	ERAT	ASEBIOL SAS	3,9
	Asociación de Usuarios de Acueducto urbano y rural inspección La Esperanza La Mesa - ACUAESPERANZA	UNISALUD	21,448
	Junta Acción Comunal San Joaquín	LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD	8,09
		LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD	8,09
	Acueducto Rural Doima -La Esperanza	UNISALUD	25
	Acueducto - ACUAPEÑANEGRA	ACUEDUCTO DE FACATATIVÁ	12,5
	ASUARTELAM	H2O ES VIDA S.A.S	20,98

Nota. Instituto Nacional de Salud, 2018. La tabla muestra la puntuación IRCA para algunos de los municipios de Colombia.

A pesar de lo anteriormente mencionado, el análisis del Índice de Riesgo Municipal (IRCA) de 2018 revela que, según su clasificación, el riesgo vinculado a la inspección municipal de **San Joaquín**, ubicado en el municipio de La Mesa, es considerado bajo. A comparación con otras zonas del mismo municipio, se puede afirmar que esta inspección se encuentra en un estado aceptable.

El Acueducto de **San Joaquín** se caracteriza por su gestión comunitaria, donde la propia comunidad toma las riendas para garantizar el acceso al agua potable. La planta de tratamiento, pieza fundamental de este sistema, cuenta con dos unidades: una convencional y otra compacta, ambas encargadas de procesar el agua.

Sin embargo, a pesar del esfuerzo comunitario y la infraestructura existente, el acueducto enfrenta algunos desafíos que es importante atender como la bocatoma, el proceso de floculación y cloración.

Diseño Esquemático Bocatoma río Apulo

De acuerdo con el libro “**Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados**” escrito por López Cualla se realizó el siguiente diseño de bocatoma de piso para el río Apulo teniendo en cuenta antecedentes y datos iniciales.

1. Población de diseño

Teniendo en cuenta la información suministrada por el acueducto de San Joaquín se utilizó la población del año 1985 y 2024 dado que son los datos más recientes referentes a la cantidad de personas en esta inspección municipal, al no ser un municipio no se encuentran datos oficiales de su población actual.

Teniendo en cuenta estos antecedentes se realizó ajuste al cálculo hecho anteriormente en el documento suministrado por el acueducto como “**Anexo 1: Memorias de Cálculo**” y “**Certificación habitantes**” en donde se utilizó crecimiento poblacional aritmético, geométrico y exponencial con la población del año 1985 y 2024 siendo 984 habitantes y 3.056 habitantes con una corrección del 30% más dado que solo se tuvo en cuenta el casco rural de la zona se tienen los siguientes datos:

P_0 : Población en 1985

P_1 : Población en 2024

P_2 : Población proyectada en 2049

n : Número de años a proyectar

a. Método geométrico

Teniendo en cuenta la fórmula de crecimiento geométrico:

$$P_2 = P_1(1 + r)^n$$
$$\log P_2 = \log P_1 + n \left(\frac{\log P_1 - \log P_0}{m} \right)$$

Se hace el cálculo de crecimiento anual

$$\log(1 + r) = \frac{\log(3973) - \log(984)}{39} = 0.01554$$

$$(1 + r) = 1.0364 \quad r = 3.64\% \text{ crecimiento anual}$$

$$\log P_2 = \log(3973) + 21(0.01554)$$

$$P_2 = 9720 \text{ habitantes para el año 2049}$$

b. Método aritmético

Teniendo en cuenta la fórmula de crecimiento aritmético:

$$P_2 = P_1 + n \left(\frac{P_1 - P_0}{m} \right)$$

Se hace el cálculo de crecimiento aritmético de la población:

$$P_2 = 3973 + 25 * \left(\frac{3973 - 984}{39} \right) = 5889 \text{ habitantes para el año 2049}$$

c. Método exponencial

Teniendo en cuenta la fórmula de crecimiento exponencial:

$$P_2 = P_1 + e^{k(n)}$$

Donde k es la tasa de crecimiento de la población la cual se calcula con la siguiente formula:

$$K = \frac{\ln(P_1) - \ln(P_0)}{m}$$

Se hacen los cálculos con base a las fórmulas anteriores determinado la población de 2024:

$$K = \frac{\ln(3973) - \ln(984)}{39} = 0.036$$

$$P_2 = 3973 + e^{0.036(21)} = 9720 \text{ habitantes para el año 2049}$$

2. Datos iniciales

Teniendo en cuenta el **Título B** del “**Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2017**” artículo 43 “**Dotación neta por máxima**” en la tabla 1 “**Dotación por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida**” se toma una altura sobre el nivel del mar de 600 siendo una dotación neta de 140 L/hab*día o 0.000002 m³/hab*s.

Figura 4

Tabla 1 “Dotación neta por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida”

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
> 2000 m.s.n.m	120
1000 – 2000 m.s.n.m	130
< 1000 m.s.n.m	140

Nota. RAS, 2017.

Se toma un coeficiente de simultaneidad de 0.7 a un periodo de diseño de 25 años y una longitud de presa de 2.8 m para determinar un caudal de demanda y diseño de la siguiente manera:

$$Q_{demanda} = 9720hab * 0.000002 \frac{m^3}{hab * s} * 0.7 = 0.011 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{diseño} = 0.011 \frac{m^3}{s} * 2.8 m = 0.031 \frac{m^3}{s}$$

3. Diseño de la presa

Se adopta una longitud de presa de 2.8m para determinar la altura de la lámina de agua, está dada la fórmula tomada del libro de López Cualla:

$$H = \left(\frac{Q_{diseño}}{1.84 * L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = \left(\frac{0.031 \frac{m^3}{s}}{1.84 * 2.8m} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.03m$$

Se realizan correcciones en la longitud dadas las contracciones laterales (n) siendo 2, por tanto, la longitud final es:

$$L' = L - 0.1 * n * H$$

$$L' = 2.8m - 0.1 * 2 * 0.03m = 2.79m$$

Se hace una verificación de la velocidad del agua al pasar por la rejilla la cual debe estar entre 0.3 m/s y 3.0 m/s:

$$V_r = \frac{Q_{diseño}}{L' * H}$$

$$V_r = \frac{0.031 \frac{m^3}{s}}{2.79m * 0.03m} = 0.35 \frac{m}{s}$$

4. Diseño de la rejilla y el canal de aducción

Para el diseño del canal de aducción se tienen en cuenta los siguientes parámetros establecidos por el autor:

Figura 5

Parámetros del canal de aducción

Ancho del canal de aducción:

$$X_s = 0.36 V_r^{\frac{2}{3}} + 0.60 H^{\frac{4}{7}} \quad (6.5)$$

$$X_i = 0.18 V_r^{\frac{4}{7}} + 0.74 H^{\frac{3}{4}} \quad (6.6)$$

$$B = X_s + 0.10 \quad (6.7)$$

en donde: X_s = alcance filo superior (m)
 X_i = alcance filo inferior (m)
 V_r = velocidad del río (m/s)
 H = profundidad de la lámina de agua sobre la presa (m)
 B = ancho del canal de aducción (m)

Nota. López Cualla, 1995.

A lo cual se procede a calcular el alcance fijo superior e inferior teniendo en cuenta la velocidad del río y la altura de la lámina de agua anteriormente calculadas:

$$X_s = 0.36 * \left(0.35 \frac{m^{\frac{2}{3}}}{s} \right) + 0.60 \left(0.03 m^{\frac{4}{7}} \right) = 0.26 m$$

$$X_i = 0.18 * \left(0.35 \frac{m^{\frac{4}{7}}}{s} \right) + 0.74 \left(0.03 m^{\frac{3}{4}} \right) = 0.15 m$$

Por tanto, el ancho del canal (B) de aducción será de 0.4m dado de es el mínimo permitido:

$$B = 0.26m + 0.10 = 0.36 m = 0.4m$$

Se procede a realizar los cálculos de la rejilla en donde se debe hallar el área neta de la rejilla con la separación de los barrotes, un valor de 0.10m/s de velocidad entre barrotes inicial y un k de 0.9 para flujo paralelo a la sección, asimismo se calcula una longitud de rejilla inicial con el diámetro de las rejillas (b) y su espaciamento (a):

$$A_{Neta} = \frac{Q}{k * V_b \frac{m}{s}} = \frac{0.031 \frac{m^3}{s}}{0.9 * 0.10 \frac{m}{s}} = 0.32 m^2$$

$$L_{rejilla} = \frac{A_{Neta} * (a + b)}{a * B} = \frac{0.32 m^2 * (0.1m + 0.0127m)}{0.1m * 0.4m} = 0.91m$$

Se reemplaza el área total teniendo en cuenta una longitud de rejilla de 1.24m y un diámetro de barrotes de 0.0127m o 1.2", para posteriormente proceder al cálculo de orificios:

$$A_{Neta} = \frac{a}{a+b} + B + L_{rejilla} = \frac{0.1m}{0.1m + 0.0127m} + 0.4m + 1.24m = 0.44m^2$$

$$N = \frac{A_{Neta}}{a * B} = \frac{0.44m^2}{0.1m * 0.4m} = 11,00 \text{ orificios}$$

Se procede a verificar la velocidad entre barrotes la cual no puede superar 0.2 m/s:

$$V_b = \frac{Q_{Diseño}}{K * A_{Neta}} = \frac{0.031 \frac{m^3}{s}}{0.9 * 0.44m^2} = 0.074 \frac{m}{s}$$

Por último, se deben calcular los niveles en el canal de aducción:

Figura 6

Fórmulas para calcular los niveles del canal de aducción

Asumiendo que todo el volumen de agua es captado al inicio del canal indicado en la figura 6.15, el nivel de la lámina aguas arriba es obtenido por medio del análisis de cantidad de movimiento en el canal:

$$h_o = \left[2h_e^2 + \left(h_e - \frac{iL_r}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{2}{3}iL_r \quad (6.13)$$

Para que la entrega a la cámara de recolección se haga en descarga libre, se debe cumplir que:

$$h_e = h_c$$
$$h_c = \left(\frac{Q^2}{g B^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.14)$$

en donde:

- h_o = profundidad aguas arriba (m)
- h_e = profundidad aguas abajo (m)
- h_c = profundidad crítica (m)
- i = pendiente del fondo del canal
- g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

Nota. López Cualla, 1995.

Figura 7

Fórmulas para calcular los niveles del canal de aducción

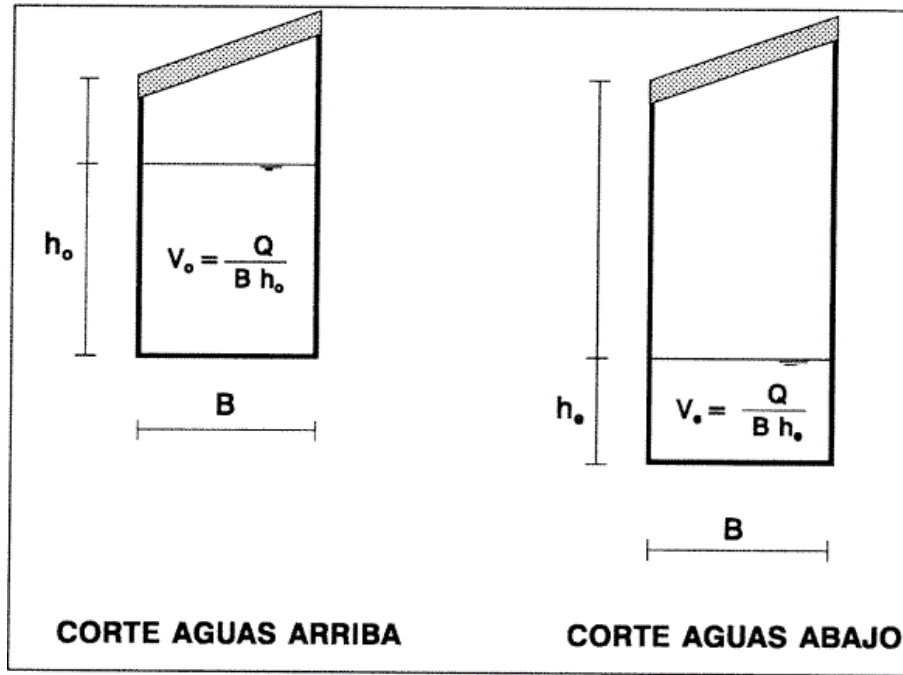


Figura 6.16 Cortes transversales en el canal de aducción.

Nota. López Cualla, 1995.

De esta manera se calculan los valores de profundidades de aguas abajo, arriba y crítica donde:

$$h_e = h_c = \left(\frac{Q^2}{g * B^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\left(0.031 \frac{m^3}{s} \right)^2}{9.81 \frac{m}{s^2} * 0.4m^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.16m$$

$$h_o = \left(2 * h_e^2 + \left(h_e - \frac{i * L_c}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \right) - \frac{2}{3} * i * L_c$$

$$h_o = \left(2 * (0.16m)^2 + \left(0.16m - \frac{3\% * 1.54m}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \right) - \frac{2}{3} * 3\% * 1.54m = 0.42 m$$

$$H_o = h_o + Bl = 0.42m + 0.15m = 0.57m$$

$$H_e = h_e + (h_o - h_e) + iL_c + Bl$$

$$H_e = 0.16m + (0.42 - 0.16) + 3\% * 1.54 + 0.15m = 0.62m$$

Por último, en este apartado se verifica la velocidad del agua al final del canal, debe ser mayor a 0.3m/s y menor a 3.0m/s

$$V_e = \frac{Q_{diseño}}{B * h_e} = \frac{\left(0.031 \frac{m^3}{s}\right)}{0.4m * 0.16m} = 0.47m$$

5. Diseño de cámara de recolección

De nuevo se utilizan las fórmulas de alcance de un chorro de agua utilizadas en el apartado N° 4 en el diseño de la rejilla:

$$X_s = 0.36 * \left(V_e^{\frac{2}{3}}\right) + 0.60 \left(h_e^{\frac{4}{7}}\right)$$

$$X_s = 0.36 * \left(\left(0.49 \frac{m}{s}\right)^{\frac{2}{3}}\right) + 0.60 \left(0.16m^{\frac{4}{7}}\right) = 0.43 m$$

$$X_i = 0.18 * \left(V_e^{\frac{4}{7}}\right) + 0.74 \left(h_e^{\frac{3}{4}}\right)$$

$$X_i = 0.18 * \left(\left(0.49 \frac{m}{s}\right)^{\frac{4}{7}}\right) + 0.74 \left(0.16m^{\frac{3}{4}}\right) = 0.30 m$$

$$B_{cámara} = X_s + 0.59m = 0.43m + 0.59m = 1.02m$$

6. Cálculos de la altura de los muros de contención

Se toma en cuenta el caudal máximo del río de 5 m³/S el documento de a CAR en el cual se encuentran los históricos de series hidrometeorológicas del río Apulo (<https://www.car.gov.co/vercontenido/2524>, 2023), además de esto se tiene en cuenta un borde libre de 0.3m:

$$H = \left(\frac{Q_{máx}}{1.84 * L'}\right)^{\frac{2}{3}} + Bl$$

$$H = \left(\frac{5 \frac{m^3}{s}}{1.84 * 2.79m} \right)^{\frac{2}{3}} + 0.30m = 1.28m$$

7. Cálculos del caudal de exceso

Se toma en cuenta el caudal máximo del río de 0.30 m³/S el documento de a CAR en el cual se encuentran los históricos de series hidrometeorológicas del río Apulo (<https://www.car.gov.co/vercontenido/2524>, 2023), además de esto se debe tener en cuenta que el vertedero de excesos estará colocado a 0.80 m de la pared de la cámara de recolección:

$$H = \left(\frac{Q_{prom}}{1.84 * L'} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0.30 \frac{m^3}{s}}{1.84 * 2.79m} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.15m$$

$$Q_{captado} = C_d * A_{neta} * \sqrt{2 * g * H} =$$

$$Q_{captado} = 0.3 * 0.44m^2 * \sqrt{2 * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.15m} = 0.227 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{excesos} = Q_{captado} - Q_{diseño} = 0.227 \frac{m^3}{s} - 0.029 \frac{m^3}{s} = 0.198 \frac{m^3}{s}$$

$$H_{exc} = \left(\frac{Q_{excesos}}{1.84 * L'} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0.198 \frac{m^3}{s}}{1.84 * 2.79m} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.114m$$

$$V_{exc} = \frac{Q_{exc}}{H_{exc} * B_{cámara}} = \frac{0.198 \frac{m^3}{s}}{0.114m * 0.72m} = 2.40 \frac{m}{s}$$

$$X_s = 0.36 * \left(\left(2.40 \frac{m}{s} \right)^{\frac{2}{3}} \right) + 0.60 * \left(0.114m^{\frac{4}{7}} \right) = 0.82m$$

8. Cálculos de la tubería de excesos

Por último, se tiene en cuenta una tubería de excesos la cual se estima con una pendiente $i = 1.45\%$:

$$J = 0.01445 \frac{m}{m}$$

$$Q = 0.2785 * C * D^{2.63} * J^{0.54}$$

$$D = \left(\frac{Q}{0.2785 * C * J^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}}$$

$$D = \left(\frac{0.198 \frac{m^3}{s}}{0.2785 * 150 * (0.01445)^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}} = 0.31m = 12.28''$$

Por tanto, se toma un diámetro de tubería de 14 in para los excesos.

Lo descrito anteriormente se encuentra en el **Anexo 1**.

Diseño_Bocatoma_Ropero_Zurita y en el **Anexo 2. Plano_Bocatoma_Ropero_Zurita**

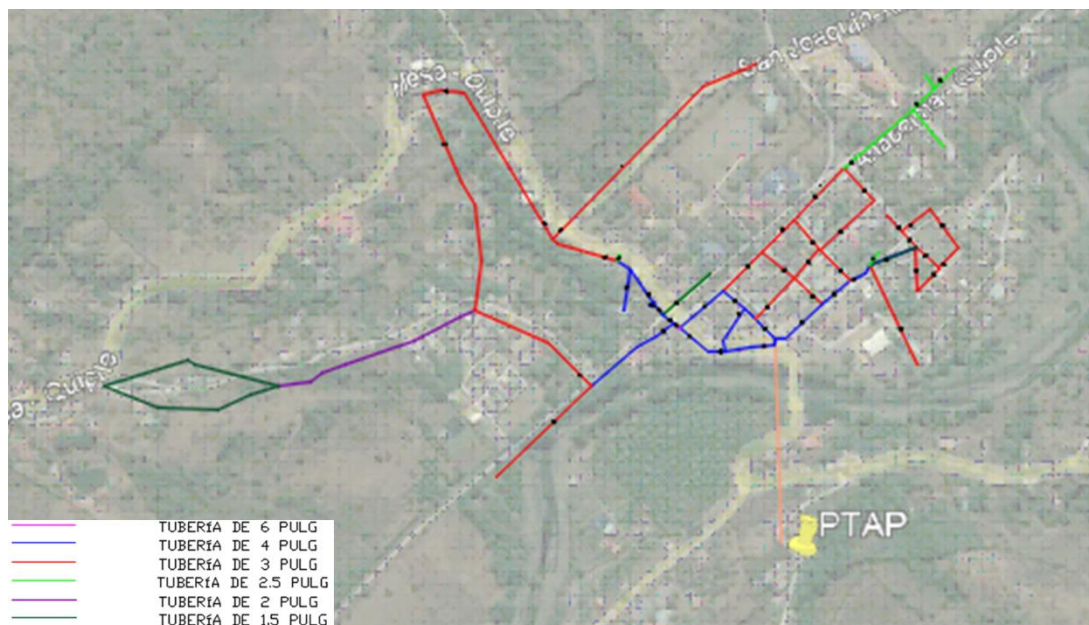
Red de distribución

Se hizo un modelo mixto (redes cerradas y abiertas) en el software EPANET, basado en la red de distribución actual de la cabecera municipal de **San Joaquín**, para evaluar el comportamiento hidráulico de la red y determinar si satisface la demanda de agua potable según la población proyectada para el 2049.

Para el modelo se recogió información sobre la red de distribución de agua potable, incluyendo la topología de la red y sus características hidráulicas, que permitió conocer los puntos críticos en la red de distribución, como se muestra en la **Figura 8**.

Figura 8

Red de distribución de la cabecera municipal de San Joaquín.



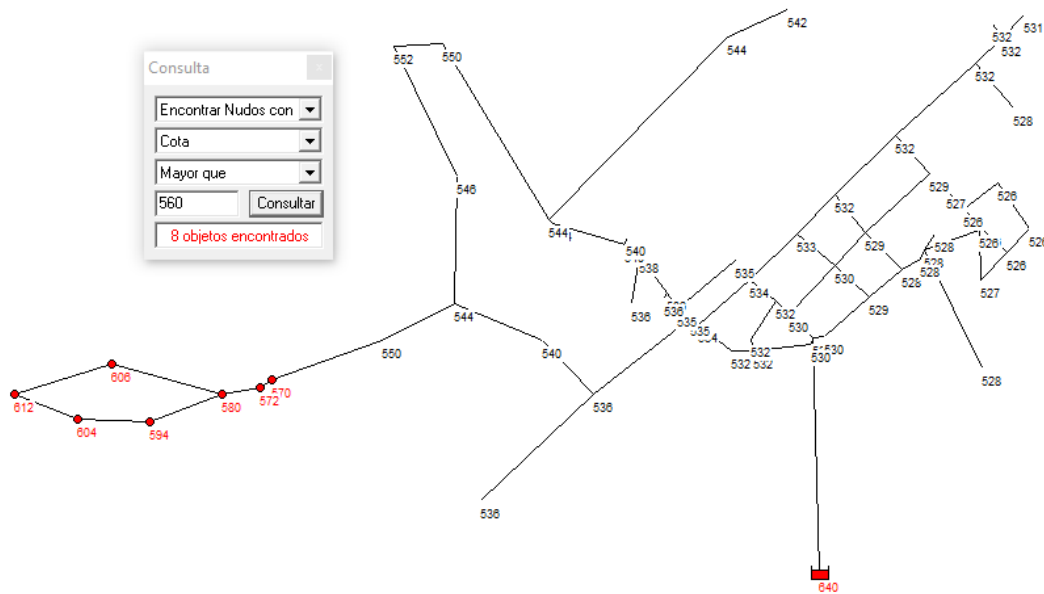
Nota. Fuente: Acueducto de San Joaquín.

Dicho modelo se encuentra en el **Anexo 3. Red_Epanet_Ropero_Zurita**

En la **Figura 9** es posible observar los nodos con cotas mayores a 560 msnm, los nodos resaltados son los que más elevación tienen en toda la red.

Figura 9

Red de distribución municipal de San Joaquín en Epanet: cotas de los nodos.



Nota. Fuente: propia.

En la **Figura 10** es posible identificar los nodos con demandas mayores a 1 LPS (Litros por segundo). Asimismo, se observa que de los valores introducidos en el programa el único negativo es el que se encuentra en el tanque de almacenamiento, debido que el programa entiende que al introducir valores negativos en estos se está “inyectando” agua, mientras que los que son positivos con puntos de consumo.

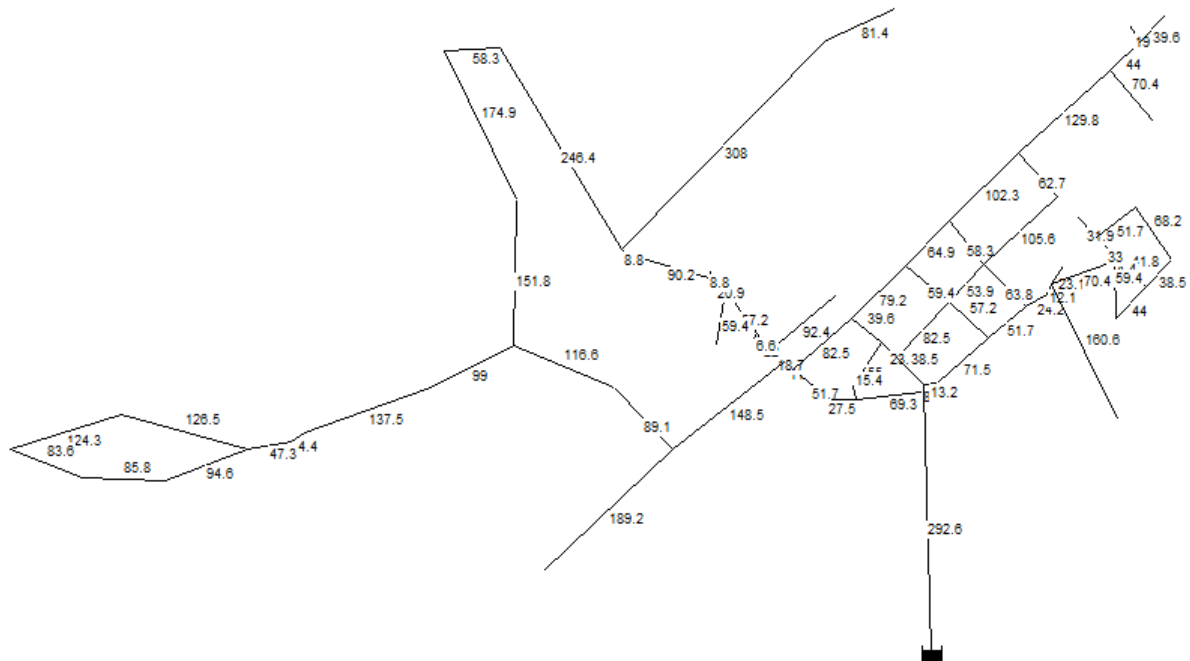
Figura 10

Red de distribución municipal de San Joaquín en Epanet: demanda en los nodos.

Nota. Fuente: propia.

Figura 12

Red de distribución municipal de San Joaquín en Epanet: longitud de las tuberías.



Nota. Fuente: propia.

Para la longitud de la tubería se calculó la longitud equivalente teniendo en cuenta la existencia de algunos accesorios, pese a que no se cuenta con la cantidad y tipo de ellos se tomó como el 10% de la longitud de la tubería como se establece en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento escrito por la Comisión Nacional del Agua.

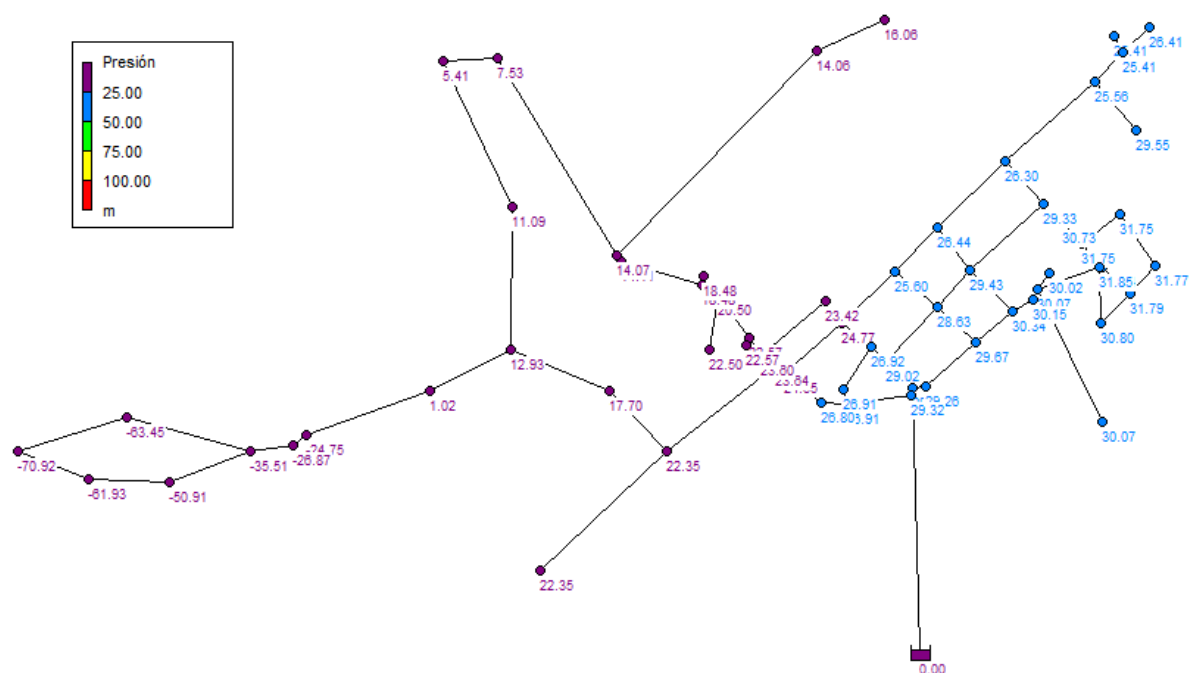
Al analizar la red actual se pudo plantear hipótesis antes de obtener los resultados del software, como puntos de control que por su mala ubicación tuvieran demanda cero, puntos que por su altura se obtendrían presiones negativas y que la constitución de la red no fuera suficiente y fuera necesaria su ampliación.

Teniendo el modelo en EPANET se calcularon las pérdidas con la ecuación de Darcy-Weisbach, por lo que se usó una rugosidad para tuberías de PVC de 0.0015 mm, obteniendo los resultados de la **Figura 13**.

Como se observa en la **Figura 13** los nudos en azul tienen presiones mayores a 25 m, mientras que los morados tienen presiones menores a 25 m, porque los nudos situados al lado derecho de la figura tienen cotas bajas comparadas con las del lado izquierdo. El modelo demuestra que la red de distribución como está planteada actualmente no es capaz de satisfacer la demanda proyectada de agua potable de San Joaquín, ya que se identificaron puntos críticos alejados, donde no llegaría el agua.

Figura 13

Presiones red de distribución de San Joaquín en Epanet: presiones de los nodos.



Nota. Fuente: propia.

Como se muestra en la **Figura 14**, gran parte de la red de distribución tienen una pérdida unitaria entre 0.1m/km y 50m/km, lo que quiere decir que la red es eficiente y tiene

Laboratorios

1. Datos iniciales

A continuación, se presentan los valores iniciales obtenidos al analizar la calidad del agua cruda del Río Apulo.

Tabla 1

Comparativo datos iniciales agua Río Apulo vs parámetros estándares del agua potable.

Parámetro	Agua cruda Río Apulo	Agua potable
pH	8.3	6.5 - 8.5
Cond (µS/cm)	507	500
SDT (ppm)	263	> 500
Turbidez (NTU)	15.4	> 2

Nota. Fuente: propia.

De acuerdo con lo anterior, es posible evidenciar que inicialmente el agua del río Apulo tiene un alto nivel de pH, lo que podría ocasionar taponamientos en las tuberías y dificultades en el proceso de coagulación y la floculación.

Por otro lado, los valores de conductividad a comparación del agua potable se podrían considerar aceptables. Mientras que la turbidez es muy alta a comparación del valor máximo aceptable por NTC 3903 y Resolución No. 2115 del 22 de junio de 2007.

2. Ensayos de tratabilidad con coagulantes

Este ensayo de laboratorio el cuál se fundamenta bajo la **norma técnica colombiana (NTC) 3903**, en donde se establece el procedimiento, los implementos y los criterios para llevar a cabo un ensayo de tratabilidad con coagulantes o también llamado ensayo de jarras, con el propósito de determinar la cantidad de coagulante requerida para la remoción de material disperso y coloidal, en los procesos unitarios de coagulación y floculación. Además,

se toma en consideración **la resolución N° 2115 del 22 de junio de 2007**, donde se establece los parámetros mínimos que debe cumplir el agua potable.

De esta manera se llevaron a cabo 7 ensayos de jarras en donde se usaron 4 tipos diferentes de coagulantes variando sus concentraciones con el fin de determinar una dosificación adecuada. Entre los coagulantes usados se tienen:

- Sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$.
- Cloruro férrico $[FeCl_3]$.
- Polímero Poliacrilamida catiónica.
- Polímero Sulfato de aluminio polimérico.

Los cuales se encuentran en el **Anexo 4. Laboratorios_Ropero_Zurita**

1.1 Ensayo de tratabilidad con coagulantes hecho in situ.

Lugar del ensayo: San Joaquín, La mesa, Cundinamarca.

Fecha: 16 de septiembre del 2023.

Se realizó un ensayo en campo con la muestra del río Apulo como se ilustra en la **Figura 15**. En este procedimiento, se realizaron dos ensayos de jarras utilizando Cloruro Férrico $[FeCl_3]$ como coagulante, con una concentración del 1%. El primer ensayo, denominado como N° 1 con dosificaciones de 2.0, 4.0, 6.0 y 8.0 ml de $FeCl_3$. El segundo ensayo, denominado como N° 2 con dosificaciones de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 ml del mismo coagulante.

Figura 15

Ensayo de jarras N°1, mezcla lenta, usando Cloruro Férrico al 1%



Nota. Fuente: propia.

En dicho proceso, se observó que los *flocs* se generaban rápidamente. Así mismo, estos tenían el tamaño ideal para no romperse en el proceso de floculación del coagulante.

Figura 16

Ensayo de jarras N°1, sedimentación, usando Cloruro Férrico al 1%



Nota. Fuente: propia.

En el tiempo de sedimentación fue posible observar que los *flocs* quedaron en el fondo de los recipientes, incluso antes de cumplir el tiempo estimado de 30 minutos del proceso de sedimentación. Del mismo modo, se observó que la coloración del agua es más cristalina que antes del ensayo, por lo que no es necesaria una corrección por color.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos (**Tabla 2**), referente al parámetro de turbidez, en donde se observó que la dosificación se había excedido como se muestra en la **gráfica 1**.

Tabla 2

Resultados del ensayo de jarras N°1 usando Cloruro Férrico al 1%

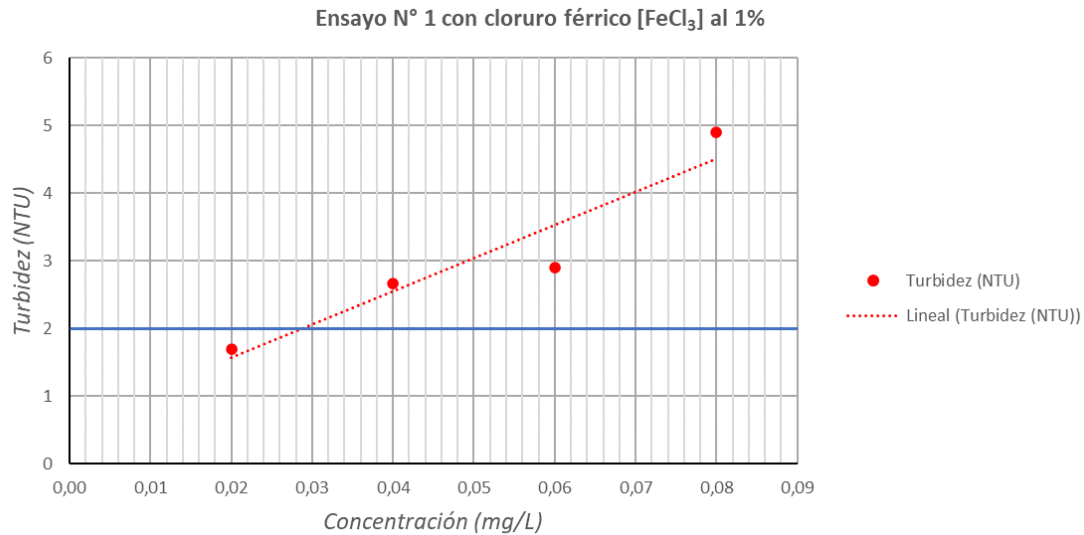
Ensayo N°1	Cloruro Férrico [FeCl₃] al 1%			
Número o nombre del recipiente	JARRA 1-1	JARRA 2-1	JARRA 3-1	JARRA 4-1
Concentración del Coagulante	1%	1%	1%	1%
Dosificación (ml)	2,0	4,0	6,0	8,0
Concentración (mg/L)	0,02	0,04	0,06	0,08
Turbidez (NTU)	1,7	2,7	2,9	4,9

Nota. Fuente: propia.

Estos valores denotaron un aumento en el parámetro de la turbidez siendo el máximo el valor de 2 NTU según la resolución N° 2115 del 22 de junio de 2007, para lo cual solo la dosificación de 2.0 ml cumplió con el valor de 1.7 NTU.

Gráfica 1

Resultados del ensayo de jarras N°1 usando Cloruro Férrico al 1%. Turbidez Vs Dosificación



Nota. Fuente: propia.

Como se mencionó anteriormente, solo una de las dosis cumple con lo descrito por la norma, la línea de tendencia demuestra el aumento de la turbidez llegando a 4.9 NTU, siendo una clara señal del exceso de coagulante usado en la muestra de agua cruda, con el fin de encontrar una dosis adecuada se procedió a realizar un segundo ensayo con menor concentración de coagulante (**Figura 17**).

Figura 17

Ensayo de jarras N°2, mezcla lenta, usando Cloruro Férrico al 1%



Nota. Fuente: propia.

Figura 18

Ensayo de jarras N°2, sedimentación, usando Cloruro Férrico al 1%



Nota. Fuente: propia.

Al igual que en el ensayo anterior, se observó la eficacia del coagulante en la formación de *flocs* y su rápida sedimentación.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos (**Tabla 3**), referente al parámetro de turbidez, en donde se observó que la dosificación se había excedido como se muestra en la **gráfica 2**.

Tabla 3

Resultados del ensayo de jarras N°2 usando Cloruro Férrico al 1%

Ensayo N°2	Cloruro Férrico [FeCl ₃] al 1%			
Número o nombre del recipiente	JARRA 1-2	JARRA 2-2	JARRA 3-2	JARRA 4-2
Concentración del Coagulante	1%	1%	1%	1%
Dosificación (ml)	0,5	1,0	1,5	2,0
Concentración (mg/L)	0,01	0,01	0,02	0,02
Turbidez (NTU)	2,8	3,4	2,4	2,9

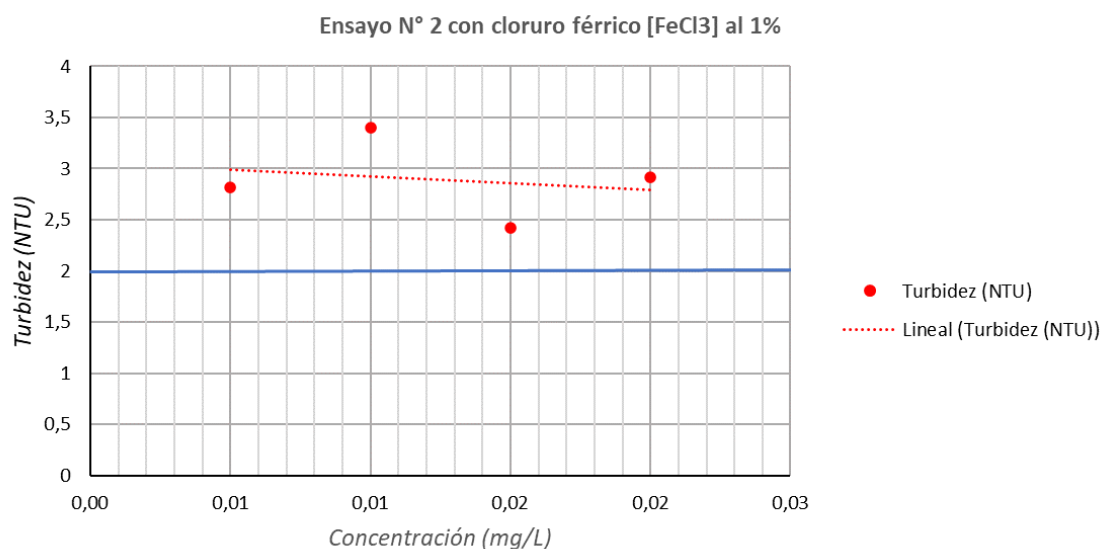
Nota. Fuente: propia.

A pesar de los datos tomados se generó un inconveniente con el aparato de medición (Turbidímetro), lo que significó que la desconfianza de estos valores, por esta razón se realizó el ensayo de jarras N°5.

De igual manera se generó un análisis con los datos, en donde es posible observar que ninguno de los valores obtenidos para la turbidez cumple con lo descrito en la norma.

Gráfica 2

Resultados del ensayo de jarras N°2 usando Cloruro Férrico al 1%. Turbidez Vs Dosificación



Nota. Fuente: propia.

La **Gráfica 2** permite observar que lo obtenido en este ensayo es incongruente a comparación del ensayo N°1, la línea de tendencia permite apreciar que los valores de turbidez se encuentran por encima de 2 NTU, siendo 2.42 NTU el más bajo.

1.2 Ensayo de tratabilidad con coagulante hecho en laboratorio.

Lugar del ensayo: Laboratorio de la Universidad Santo Tomás, sede principal Bogotá.

Fecha: 23 de septiembre del 2023.

Se tomo una muestra del agua cruda del río Apulo la cual fue llevada al laboratorio junto con una muestra del coagulante usado por los operarios de la **PTAP** siendo el sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$ tipo A como se muestra en la **Figura 19**. Se realizaron 2 ensayos de jarras con este coagulante a diferentes concentraciones **Figura 20** y **Figura 21**.

El primer ensayo, denominado como N°3 con dosificaciones de 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 y 9.0 ml de $[Al_2(SO_4)_3]$ al 5%. El segundo ensayo, denominado como N°4 con dosificaciones de 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 y 9.0 ml al 10% del mismo coagulante.

Figura 19

Saco de Sulfato de Aluminio tipo A



Nota. Fuente: propia.

Figura 20

Ensayo de jarras N°3, mezcla lenta, usando con Sulfato de Aluminio al 5%



Nota. Fuente: propia.

Figura 21

Ensayo de jarras N°3, Sedimentación, usando Sulfato de Aluminio al 5%



Nota. Fuente: propia.

Como es posible observar en la **Figura 21**, se denota una turbidez alta a la vista, por este motivo no es posible apreciar los *floc*. Así mismo, pese haber transcurrido un tiempo de sedimentación de 30 minutos, se observó que en su mayoría los *flocs* seguían suspendidos en la muestra de agua.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos (**Tabla 4**), referente al parámetro de turbidez, en donde se observó que la dosificación se había excedido como se muestra en la **gráfica 3**.

Tabla 4

Resultados del ensayo de jarras N°3 usando con Sulfato de Aluminio al 5%

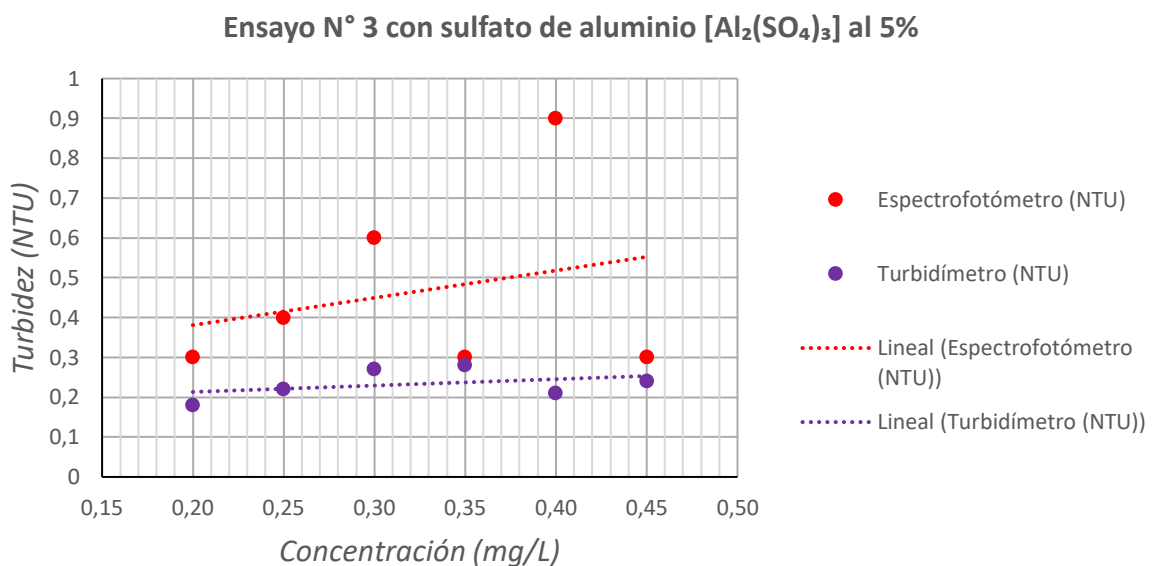
Ensayo N°3		Sulfato de Aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$ al 5%					
Número o nombre del recipiente		1	2	3	4	5	6
Concentración del Coagulante		5%	5%	5%	5%	5%	5%
Dosificación (ml)		4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
Concentración (mg/L)		0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
Turbidez (NTU)	Espectrofotómetro	0,3	0,4	0,6	0,3	0,9	0,3
	Turbidímetro	0,18	0,22	0,27	0,28	0,21	0,24

Nota. Fuente: propia.

A pesar de que los valores obtenidos cumplen con los límites establecidos por la resolución N° 2115 del 22 de junio de 2007, con valores de turbidez por debajo de los 2 NTU, se observa unos *flocs* con bajo diámetro. Este floculante genera una suspensión de partículas significativa, lo cual se evidencia en la **Figura 20**. Esta situación conlleva a la generación de cierta coloración en el agua y un proceso deficiente de sedimentación.

Gráfica 3

Resultados del ensayo de jarras N°3 usando Sulfato de Aluminio al 5%. Turbidez Vs Dosificación



Nota. Fuente: propia.

En la **Gráfica 3** es posible observar los valores obtenidos para este ensayo, en donde pese que solo una de las dosificaciones coincide con la misma turbidez al ser estimada con dos aparatos diferentes, el rango de diferencia de los datos es mínimo, y cumplen con lo estipulado en la norma. Aun así, es importante reconocer que para la toma de datos de turbidez se le dio un tiempo de sedimentación a la muestra de 3 horas, debido que fue el tiempo que transcurrió para que cayeran la mayoría de los *flocs*, demostrando esto que es ineficiente el uso de este coagulante.

Figura 22

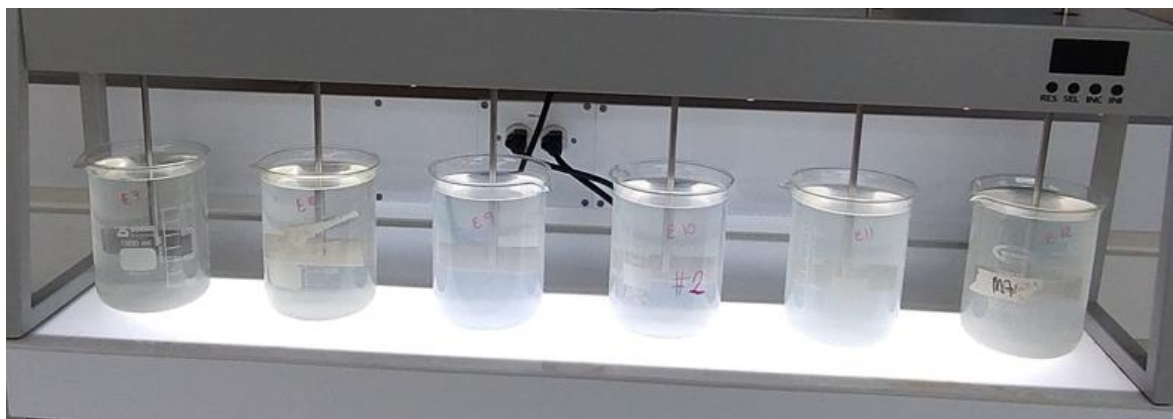
Ensayo de jarras N°4, mezcla lenta, usando Sulfato de Aluminio al 10%



Nota. Fuente: propia.

Figura 23

Ensayo de jarras N°4, mezcla lenta, usando Sulfato de Aluminio al 10%



Nota. Fuente: propia.

Al igual que el ensayo anterior no fue posible observar que se agruparan las partículas para formar buenos *flocs*. Así mismo, pese haber transcurrido el tiempo de sedimentación se siguió observando que los *flocs* seguían suspendidos en la muestra de agua.

Tabla 5

Resultados del ensayo de jarras N°4 usando con Sulfato de Aluminio al 10%

Ensayo N°4		Sulfato de Aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$ al 10%					
Número o nombre del recipiente		7	8	9	10	11	12
Concentración del Coagulante		10%	10%	10%	10%	10%	10%
Dosificación (ml)		4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
Concentración (mg/L)		0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
Turbidez (NTU)	Espectrofotómetro	0,6	0,5	0,6	0,8	1,1	1,3
	Turbidímetro	0,29	0,23	0,31	0,44	0,45	0,62

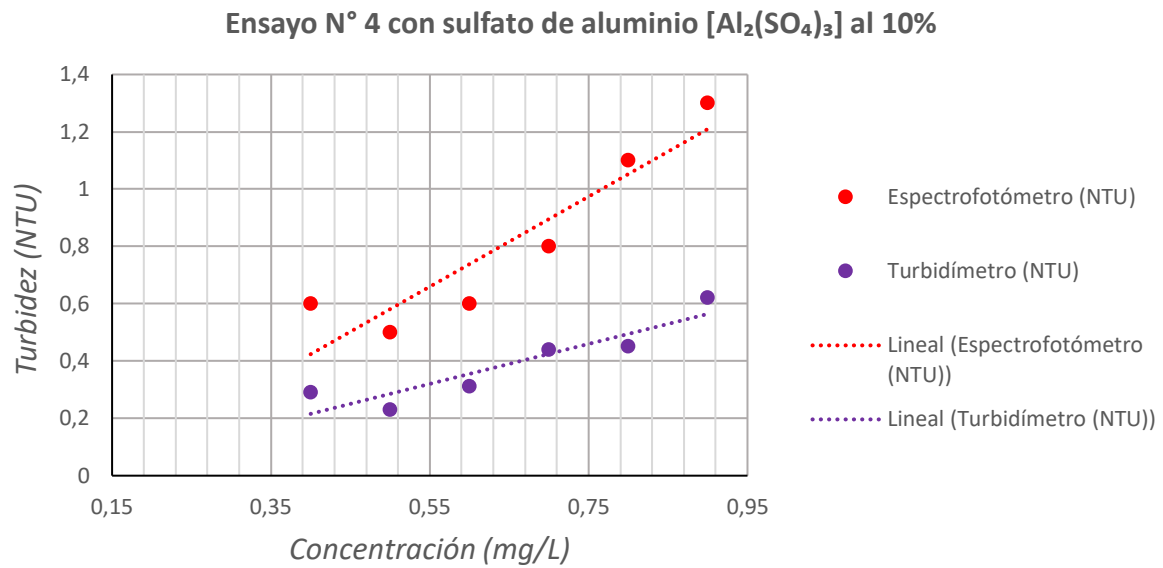
Nota. Fuente: propia.

A pesar de usar una mayor concentración del coagulante buscando que las partículas se sedimentaran en un tiempo menor no fue así y se generó el mismo inconveniente denotado en el ensayo N°3 teniendo de nuevo un proceso deficiente de sedimentación como se denota en la **Figura 23**. Aun así, los valores fueron aceptables en referencia a una turbidez menor a 2 NTU como lo establece la norma y como se denota en la **Gráfica 4**.

Gráfica 4

Resultados del ensayo de jarras N°4 usando Sulfato de Aluminio al 10%. Turbidez Vs

Dosificación



Nota. Fuente: propia.

1.3 Ensayo de tratabilidad con coagulante hecho en laboratorio.

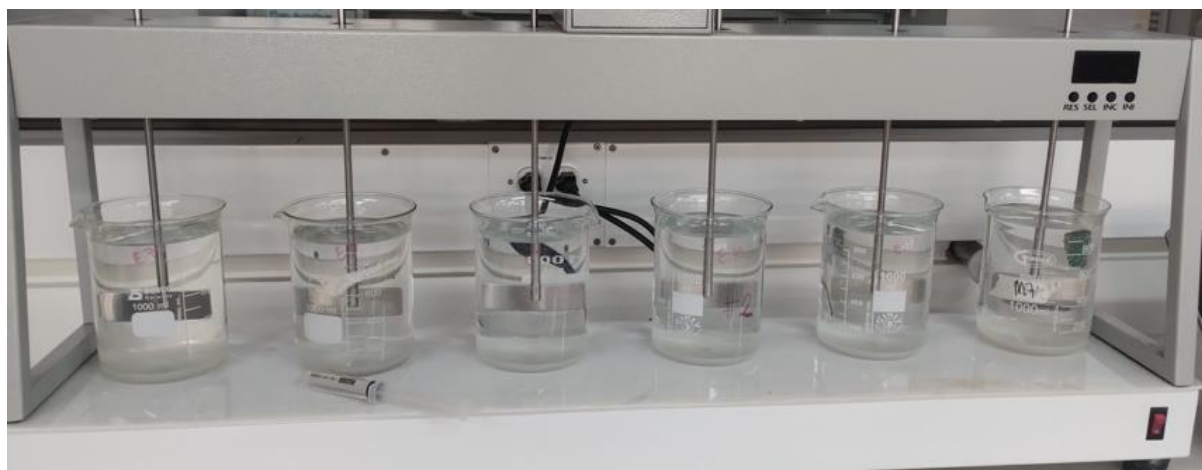
Lugar del ensayo: Laboratorio de la Universidad Santo Tomás, sede principal Bogotá.

Fecha: 30 de septiembre del 2023.

Basados en lo obtenido en el ensayo N°1 y N°2, se tomó la decisión de repetir el proceso con el Cloruro férrico $[\text{FeCl}_3]$, por lo que se llevó a cabo un ensayo denominado como N°5 con dosificaciones de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2 ml con una concentración del 2%.

Figura 24

Ensayo de jarras N°5, mezcla lenta, usando Cloruro Férrico 2%



Nota. Fuente: propia.

Figura 25

Ensayo de jarras N°5, sedimentación, usando Cloruro Férrico al 2%



Nota. Fuente: propia.

De esta manera buscando *flocs* más pesados para una sedimentación eficaz se optó por usar el coagulante usado en el ensayo in situ, el cual generó resultados satisfactorios.

Tabla 6

Resultados del ensayo de jarras N°5 usando con Cloruro férrico al 2%

Ensayo N°5	Cloruro Férrico [FeCl ₃] al 2%					
Número o nombre del recipiente	1	2	3	4	5	6
Concentración del Coagulante	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Dosificación (ml)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Concentración (mg/L)	0,004	0,008	0,012	0,016	0,020	0,024

pH	Multiparámetro	8,0	7,9	7,8	7,7	7,7	7,6
Turbidez (NTU)	Espectrofotómetro	7,8	3,1	1,3	0,9	0,9	0,6
	Turbidímetro	3,6	2,1	1,1	0,85	0,25	0,64

Nota. Fuente: propia.

De acuerdo con la **Tabla 6** se introdujo un nuevo parámetro en la evaluación de la calidad del agua, que es el pH. Este parámetro se midió utilizando un multiparámetro, tal como se ilustra en la **Figura 26**. Se observó una corrección de pH inducida por el uso del cloruro férrico, lo que resultó en una disminución del valor del pH.

Además, los valores de turbidez exhibieron una tendencia constante a la disminución. Se identificó que una dosificación óptima de 1.2 mL de FeCl₃ logró reducir la turbidez a 0.6 NTU, al mismo tiempo mantuvo el pH en 7.6, ambos valores cumplen con los estándares establecidos por la resolución N° 2115 del 22 de junio de 2007.

Asimismo, la calidad del *floc* fue más denso lo que propicio a su descenso como se ilustra en la **Figura 25**, generando un proceso de sedimentación de mejor calidad y con un tiempo justo para optimizar el proceso anteriormente mencionado.

Figura 26

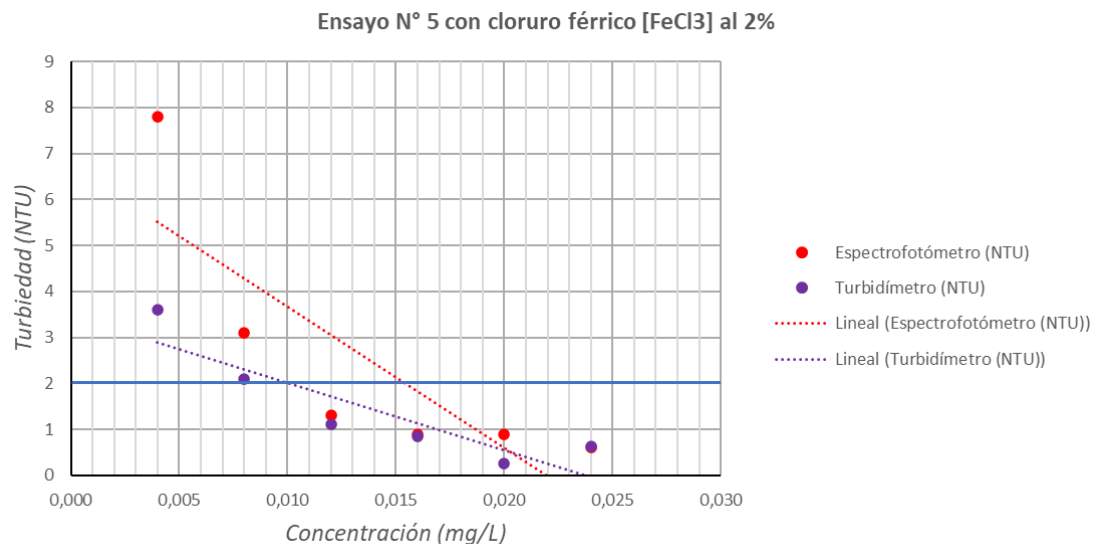
Multiparámetro marca HANNA usado para tomar parámetros



Nota. Fuente: propia.

Gráfica 5

Resultados del ensayo de jarras N°5 usando Cloruro Férrico al 2%. Turbidez Vs Dosificación



Nota. Fuente: propia.

En la **Gráfica 5** es posible observar que las primeras dosificaciones del floculante obtuvieron una turbidez alta, sin embargo, se encontró que con una dosificación de 0.6 mL en adelante se obtienen valores dentro de la norma, lo que permite analizar que se encontró la dosis ideal como se mencionó anteriormente. Tal como se observa en las líneas de tendencia, donde se identifica la disminución de la turbidez en relación con la dosificación.

1.4 Ensayo de tratabilidad con coagulante hecho en laboratorio.

Lugar del ensayo: Laboratorio de la Universidad Santo Tomás, sede principal Bogotá.

Fecha: 06 de octubre del 2023.

En este apartado se usaron dos coagulantes poliméricos (**Figura 27**), los cuales cuentan con una mayor eficacia en el proceso de floculación, posteriormente usados para hacer 2 ensayos de jarras (**Figura 28 y Figura 29**).

El primer ensayo, denominado como N°6 con dosificaciones de 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, y 3.0 con una concentración de Poliacrilamida catiónica del 0.1%. El segundo ensayo, denominado como N°7 con dosificaciones de 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, y 3.0 ml con una concentración del 0.05% del Sulfato de aluminio polimerico.

Figura 27

Coagulantes poliméricos



Nota. Fuente: propia.

Figura 28

Ensayo de jarras N°6, mezcla lenta, usando Poliacrilamida catiónica 0.1%



Nota. Fuente: propia.

Figura 29

Ensayo de jarras N°6, sedimentación, usando Poliacrilamida catiónica 0.1%.



Nota. Fuente: propia.

En la **Figura 29**, se puede apreciar el proceso de sedimentación del coagulante. Desde el inicio de la mezcla lenta, se observa la formación y unión rápida de las partículas (*flocs*), este proceso sucedía en la parte baja de beaker, eliminado la necesidad de que los *flocs* generen un descenso como en los otros ensayos.

Tabla 7

Resultados del ensayo de jarras N°6 usando con Poliacrilamida catiónica al 0.1%

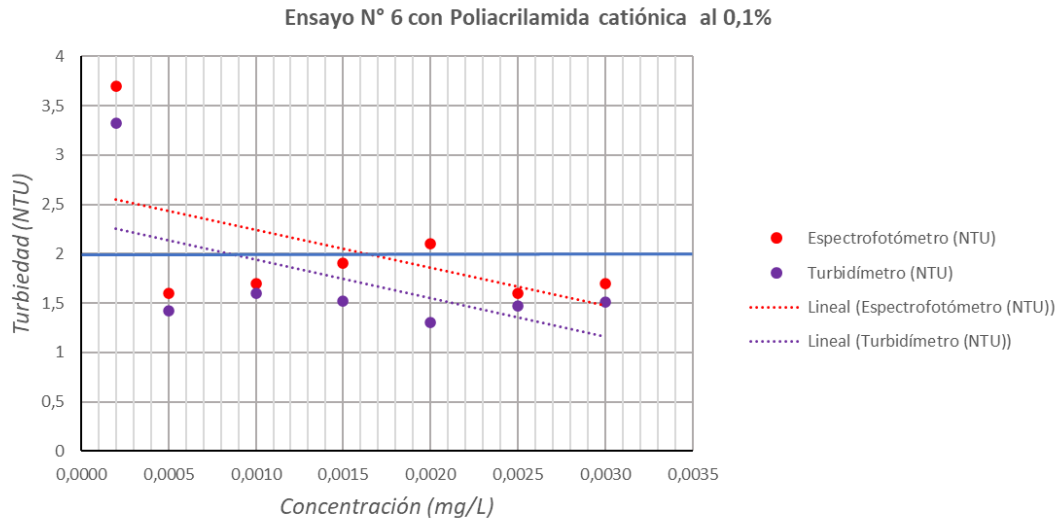
Ensayo N°6		Poliacrilamida catiónica al 0,1%						
Número o nombre del recipiente		0	1	2	3	4	5	6
Concentración del Coagulante		0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Dosificación (ml)		0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Concentración (mg/L)		0,0002	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0025	0,0030
Turbidez (NTU)	Espectrofotómetro	3,7	1,6	1,7	1,9	2,1	1,6	1,7
	Turbidímetro	3,32	1,42	1,6	1,52	1,3	1,47	1,51

Nota. Fuente: propia.

Los valores obtenidos reflejan un proceso de floculación eficiente sin sobrepasar los límites máximos estipulados por la resolución 2115 de 2007 de 2 NTU. Es importante destacar que esta eficiencia se logró mediante el uso de una concentración de coagulante de 0.1%, la cual fue considerablemente menor en comparación con las concentraciones utilizadas en los otros dos coagulantes. Además, se observa que este coagulante demostró ser más efectivo y rápido en el proceso de sedimentación.

Gráfica 6

Resultados del ensayo de jarras N°6 usando Poliacrilamida catiónica al 0.1%. Turbidez Vs Dosificación



Nota. Fuente: propia.

Es posible observar que solo el primer valor obtenido de este ensayo no cumple con la norma. Así mismo es posible analizar que la línea de tendencia tiende a disminuir, y los datos de los aparatos de medición no difieren tanto el uno del otro.

Figura 30

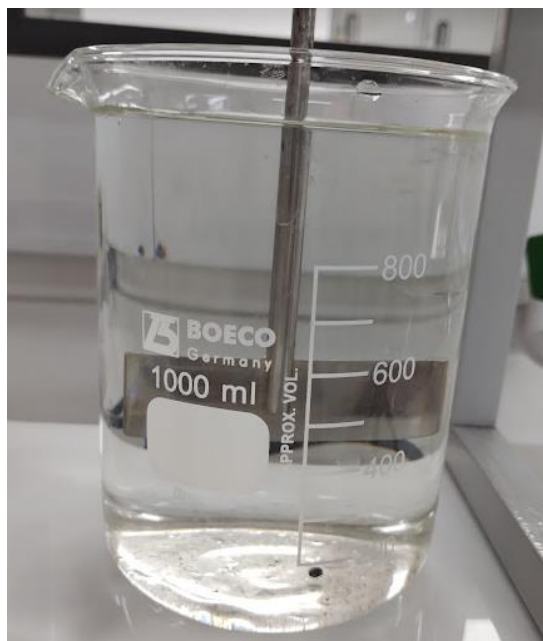
Ensayo de jarras N°7, mezcla lenta, usando aluminio polimérico 0.05%



Nota. Fuente: propia.

Figura 31

Ensayo de jarras N°7, sedimentación, usando Sulfato de aluminio polimérico 0.05%



Nota. Fuente: propia.

En la **Figura 31** se observan las mismas características identificadas en el ensayo N°6, debido que se habla de un polímero similar, con la única diferencia que este último es más eficaz por lo que es necesaria una menor cantidad de este.

Tabla 8

Resultados del ensayo de jarras N°7 usando con aluminio polimérico al 0.05%

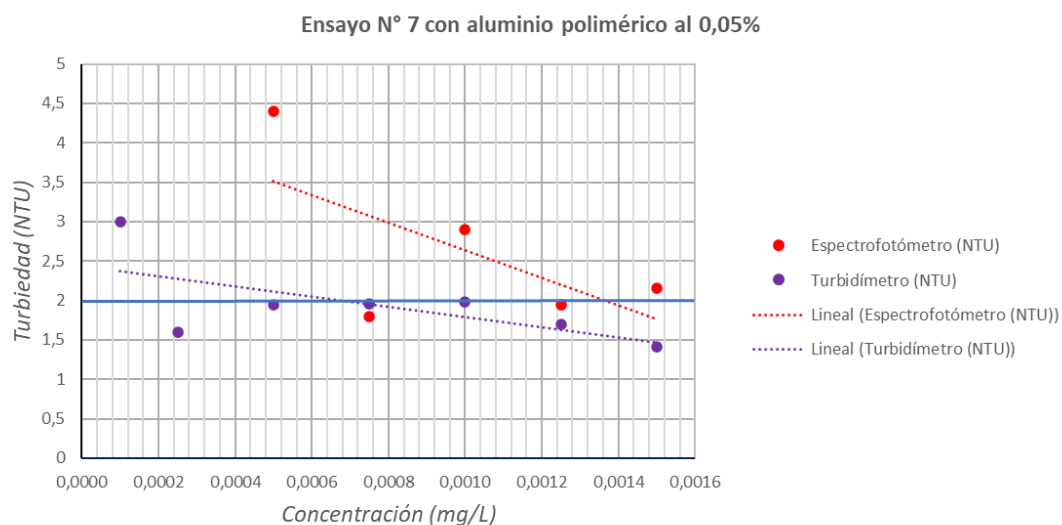
Ensayo N°7		Sulfato de Aluminio polimérico 3 al 0,05%						
Número o nombre del recipiente		0	1	2	3	4	5	6
Concentración del Coagulante		0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%
Dosificación (ml)		0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Concentración (mg/L)		0,0001	0,0003	0,0005	0,0008	0,0010	0,0013	0,0015
Turbidez (NTU)	Espectrofotómetro	4,4	1,8	2,9	1,95	2,15	1,65	2,13
	Turbidímetro	3	1,6	1,95	1,96	1,98	1,7	1,41

Nota. Fuente: propia.

De igual manera que el anterior ensayo, en la **Tabla 8** se denota un proceso de floculación eficiente sin sobrepasar los límites máximos estipulados por la resolución 2115 de 2007 de 2 NTU. Siendo este aún más eficiente dado que se encuentra a una menor concentración.

Gráfica 6

Resultados del ensayo de jarras N°7 usando aluminio polimérico al 0.05%. Turbidez Vs Dosificación



Nota. Fuente: propia.

Se observa que existen valores por encima de la norma, y así mismo, gracias la línea de tendencia es posible apreciar una disminución en la turbidez, en este ensayo es posible denotar una discrepancia más alta entre los valores de los instrumentos de medición.

A pesar de que los compuestos poliméricos son muy eficientes y rápidos en el proceso de generación de floc, junto con el proceso de sedimentación tienen una complicación al momento de hacer la solución del floculante ya que es necesario mezclar con objetos especializados con los cuales la planta de San Joaquín no cuenta, a razón de esto no es recomendable el uso de estos polímeros.

Conclusiones

Con el análisis de los ensayos de jarras fue posible denotar que el coagulante usado en la PTAP (Sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$, en relación precio-calidad no es el más indicado para tratar el agua de San Joaquín, dado que no genera *flocs* con suficiente densidad para una sedimentación adecuada.

Mientras que los polímeros se destacan por su eficacia en términos de floculación y sedimentación, pero presentan desafíos considerables en la preparación de soluciones de coagulante, lo que conllevaría que la PTAP cambie su infraestructura ya que estos necesitarían de la implementación de mezcladores mecánicos.

En contraste, el cloruro férrico $[FeCl_3]$ demuestra ser una opción más favorable, ya que facilita la formación de *flocs* con densidad adecuada para la sedimentación, así mismo, permite una preparación de soluciones de coagulante más sencilla.

Por otro lado, la alcalinidad es un factor importante de tratar, debido que afecta directamente la calidad del agua que produce la PTAP, así mismo afecta el pH, la eficiencia de los coagulantes que se usan en el proceso de coagulación, y tiene una alta influencia en la corrosión de las tuberías y los equipos, por tanto al ser un agua básica es prudente usar el cloruro férrico para disminuir su pH mejorando así su calidad y optimizando su proceso de floculación.

Gracias al análisis de la red de distribución en EPANET, es posible concluir que la red actual no supe las necesidades de la población considerando la proyección realizada, por lo que es necesario realizar una ampliación de la red, lo cual no solo ayudaría con el estado y el debido funcionamiento de la red, sino que también a los habitantes que no cuentan con el servicio de acueducto

De esta manera dado que la población se estima crecerá para 2049 a más del doble de la actual, la red ni su captación serán suficientes para dar abasto con la demanda esperada, asimismo se plantea realizar una nueva red de distribución que logre cumplir con los caudales de demanda estimados para años futuros.

Finalmente es posible concluir que se cumplieron con los objetivos planteados en este documento, se presenta como soporte este documento y sus anexos en los que se encuentran: diseño de la bocatoma, plano de la bocatoma, red de distribución modelada en EPANET y los resultados de laboratorios de tratabilidad con coagulantes.

Recomendaciones

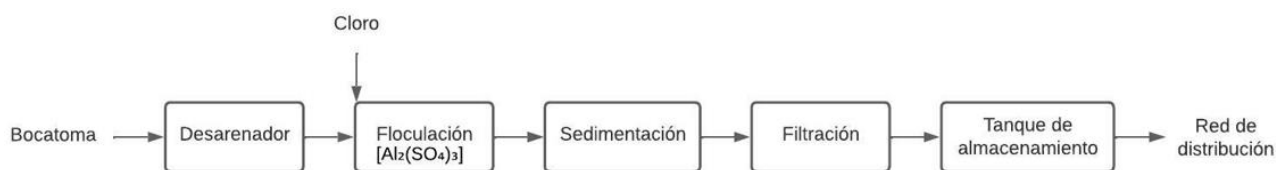
Se recomienda el uso de cloruro férrico como nuevo coagulante para el proceso de floculación con una dosificación óptima de 1.2 mL de FeCl_3 , pese a que la preparación de la concentración de dicho coagulante sea fácil, se recomienda la implementación de un mezclador mecánico en la PTAP.

Se le recomienda que el proceso de desinfección por medio de cloro sea el proceso final del tratamiento del agua, ya que si se realiza antes del proceso de floculación es probable que las tuberías y los equipos sean más susceptibles a la corrosión, así mismo, el proceso de cloración es más eficaz con una alcalinidad adecuada, por dicho motivo al mejorar la alcalinidad se mejora el proceso de desinfección. Sin embargo, se le recomienda verificar la dosis de cloro que se está aplicando al agua, ya que puede ser el motivo por el que no se cumple con lo establecido en la resolución 2115 de 2007.

El proceso que actualmente hace la planta tiene las siguientes características:

Figura 34

Diagrama de procesos actual de la PTAP San Joaquín



Nota. Fuente: propia.

Teniendo en cuenta las conclusiones y recomendaciones dichas con anterioridad, se plantea el siguiente diagrama de procesos con las mejoras es el siguiente:

Figura 35

Mejora del diagrama de procesos de la PTAP San Joaquín



Nota. Fuente: propia.

La ampliación de la red de distribución debe contemplar primero aumentar los diámetros de la tubería, ya que el caudal utilizado en el diseño de la bocatoma solo considero lo recolectado del río Apulo, pero más a la planta de tratamiento llega agua del río Bahamón.

Así mismo, es importante que se considere la ampliación de la red hacia veredas que hoy no cuentan con suministro de agua potable.

Bibliografía

- Arieta Lozano, J. J. (2019). Recomendaciones para diseño y optimización de plantas de tratamiento de agua potable, considerando aspectos de funcionalidad y durabilidad, *Prospectiva*, vol. 17, 47-52.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007, 9 de mayo). Decreto 1575 de 2007 por el cual se adopta el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Diario Oficial de la República de Colombia, 46.441, 1-24.
- Colombia. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 0330 del 8 de junio de 2017. Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) - Libro 4: Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. Ciudad de México, México: Gobierno de México.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2023). Histórico de series hidrometeorológicas. [Página web]. <https://www.car.gov.co/vercontenido/2524>
- Domínguez, M. F. (2013). Optimización de la coagulación - floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre - Cajasan. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/848>.
- Unites States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Manual del usuario de EPANET (versión 2.2.0-1).
- Gámiz Caro, J. F. (2021). Contribución al modelado e implementación de un control avanzado para un proceso de cloración de una estación de tratamiento de agua potable (Tesi doctoral). UPC, Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2117/347907>

- Joyel Paul, Sandeep S. Ahankari. (2023). Nanocellulose-based aerogels for water purification: A review, *Carbohydrate Polymers*, Vol. 309, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120677>.
- López Cualla, R. A. (2003). Elementos del diseño para acueductos y alcantarillado. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ligardo Moreno, A. (2019). Diagnóstico Planta de tratamiento de agua potable, desde su punto de captación, hasta la red de distribución en el Municipio del castillo, Departamento del Meta. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Civil, Villavicencio.
- Lopez, S. I. (2023). Remoción de la turbidez presente en el río Utcubamba de la localidad de Pedro Ruiz Gallo-Amazonas mediante el coagulante natural elaborado de la penca de *Hylocereus Megalanthus* (pitahaya amarilla) en el año 2023 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/35078>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - RAS. Resolución 1096 de 2000. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.
- Montoya, C., Loaiza, D., Torres, P., Cruz, C. H., y Escobar, J. C. (2013). Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA*, 8(16), 137–148. Recuperado a partir de <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/438>
- Najlae Zaki, Nouhaila Hadoudi, Asmae Charki, Nihade Bensitel, Hossain El Ouarghi, Hassan Amhamdi & M’hamed Ahari (2023) Advancements in the chemical treatment of potable water and industrial wastewater using the coagulation–flocculation process,

Separation Science and Technology, 58:15-16, 2619-2630, DOI:

10.1080/01496395.2023.2219381

- Ortega Ramírez, A., Cáceres Durán, L., & Castiblanco Molina, L. (2023). Introducción al uso de coagulantes naturales en los procesos de potabilización del agua. revista ambiental agua, aire y suelo, 11(2), 1–14. Recuperado de: <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i2.873>
- Romero Rojas, J. A. (2002). Purificación del agua. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Saravia Matus, S. et al. (2022), Brechas, desafíos y oportunidades en materia de agua y género en América Latina y el Caribe, serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 211 (LC/TS.2022/170), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
- Trus, T., Gomelya, M., Kryzhanovska Y. (2022). The use of coagulants from industrial waste in water treatment processes, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 178-186.
- Villamizar Niño, I. Y. (2020). Tecnologías para la potabilización y tratamiento de aguas superficiales en Colombia. (Trabajo de Grado). Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
- Zabulonov, Y., Charnyi, D., Snikhovska, I., Puhach, O., Matseliuk, E., Marynin, A. (2023). Destruction of Trihalomethanes and Disinfection of Drinking Water by Electric Discharge Plasma. In: Zaporozhets, A., Popov, O. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 456. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_19