



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

PROPUESTA DE UN NUEVO LECHO FILTRANTE PARA LA PLANTA “SAN ANTONIO”, A PARTIR DE PRUEBAS DE EFICIENCIA CON DIFERENTES MATERIALES

REPORTE FINAL DE RESIDENCIA PROFESIONAL QUE PRESENTA:

Alejandro De Los Santos Castillo

Como requisito para acreditar la Residencia Profesional de la Licenciatura en:

INGENIERÍA QUÍMICA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
15 de febrero de 2024



Carretera Panamericana Km. 1080, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas | tuxtla.tecnm.mx
Tel. (961) 615 0461, 615 0138, 615 4808



2023
Francisco
VILLA

EL REVOLUCIONARIO DEL PUEBLO

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por mantenerse siempre conmigo en los momentos buenos y malos durante esta etapa de mi vida que concluye, por brindarme salud y fortaleza para lograr mis objetivos, por la sabiduría brindada en los instantes en los que necesitaba oír su voz. Le doy gracias por que en él encontré la fuerza, amor y paz que necesité.

A mi padre José Abel De Los Santos Cabrera, por enseñarme a ser fuerte y levantarme de los fracasos, por cada uno de sus consejos que me han guiado en la vida; a mi madre Ángela Castillo Jerónimo, por creer siempre en mí y motivarme a ser mejor persona. No me alcanzarían las palabras para agradecer todo lo que han hecho por mí, espero estén tan orgullosos de lo que he logrado como yo de tenerlos como mis padres.

A mi hermana Anette, por darme su apoyo siempre y estar presente cuando más lo he necesitado.

Agradezco al Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SOAPA) por abrirme las puertas y permitir desarrollar mis conocimientos. Al I.Q. Jaime Martínez Méndez por el apoyo como asesor externo; a los químicos farmacobiólogos del área de análisis fisicoquímicos del laboratorio de control de calidad del agua por compartirme sus experiencias, conocimientos y hacer de mi residencia profesional una grata experiencia.

Quiero expresarle mi gratitud a mi asesor y profesor el I.Q. Leonardo Gómez Gutiérrez, por compartir su conocimiento conmigo, por su confianza, tiempo, paciencia y consejos a lo largo de estos meses.

Agradezco inmensamente a mis amigos por permitirme formar parte de sus vidas, el sobrellevar las cosas con ustedes siempre fue más fácil, gracias por su apoyo y amistad.

A cada una de las personas que directa o indirectamente formaron parte de este sueño, les estaré eternamente agradecido y los llevaré con cariño en mi mente y mi corazón.

¡Gracias totales!



Resumen

El presente documento se centra en proponer un nuevo lecho filtrante para la planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”, ubicada en el municipio de San Antonio de la Cal, Oaxaca; para ello, primeramente, se realizaron análisis fisicoquímicos (temperatura, olor, turbiedad, color, pH, sólidos disueltos totales, dureza total como CaCO_3 , nitrógeno de nitritos, hierro y manganeso) del agua cruda que es suministrada a la planta.

Asimismo, debido a que actualmente la PTAP no está recibiendo ningún tratamiento, se llevaron a cabo pruebas de jarras con hipoclorito de sodio, hidróxido de calcio, sulfato de aluminio y polímero para obtener las concentraciones óptimas que favoreciera la reducción de los coloides en suspensión y materia orgánica, evitando alterar el color, la turbiedad y el pH, además de reducir la mayor concentración de algunos metales presentes en el agua (hierro y manganeso) las cuales son muy altas.

Posteriormente, se elaboró un filtro prototipo a escala laboratorio con arena sílice y zeolita natural (clinoptilolita) como medio filtrante y se simuló el proceso de tratamiento que tendría el agua cruda con las concentraciones óptimas de las pruebas de jarras, para luego hacerla pasar por el filtro prototipo, y por medio de análisis fisicoquímicos se evaluó la eficiencia que el lecho filtrante tuvo, obteniendo como resultados la reducción de la turbiedad, el color, los sólidos disueltos totales, la dureza y el hierro a valores que cumplen con los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-2021. El manganeso fue la excepción, pues fue el único parámetro que no cumplió con la normatividad, sin embargo, se redujo un 50%.

Palabras clave: lecho filtrante, filtro prototipo, zeolita natural, agua potable.



Índice

| | |
|--|----|
| Agradecimientos | 2 |
| Resumen | 3 |
| Índice de figuras | 6 |
| Índice de tablas | 8 |
| Introducción | 9 |
| Descripción de la empresa | 10 |
| Problemas a resolver | 14 |
| Objetivos | 15 |
| ▪ Objetivo general | 15 |
| ▪ Objetivos específicos | 15 |
| Justificación | 16 |
| Marco teórico | 17 |
| 1. Proceso de tratamiento de agua potable | 17 |
| 1.1. Medición de caudales | 18 |
| 1.2. Coagulación | 18 |
| 1.3. Floculación | 20 |
| 1.4. Sedimentación | 23 |
| 1.5. Filtración | 26 |
| 1.5.1. Mecanismo de filtración | 26 |
| 1.5.2. Factores que influyen en la filtración | 34 |
| 1.5.3. Retrolavado de filtro | 46 |
| 1.6. Desinfección | 46 |
| 1.7. Normas Oficiales Mexicanas | 52 |
| Procedimiento y descripción de las actividades realizadas | 54 |
| ➤ Procedimiento para el muestreo | 54 |
| ➤ Análisis fisicoquímicos | 60 |
| ➤ Elaboración del filtro prototipo | 68 |
| Resultados de las actividades realizadas | 73 |
| ➤ Análisis fisicoquímicos | 73 |





- Prueba de jarras 75
- Eficiencia de la PTAP “San Antonio” 79
- Análisis de eficiencia de propuesta de filtro 80
- Conclusión 83
- Competencias desarrolladas y/o aplicadas 84
- Anexo 1 85
- Fuentes de información..... 86



Índice de figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.- FOTOGRAFÍA DEL LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA OPERADOR DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO (SOAPA). ELABORACIÓN PROPIA. | 12 |
| FIGURA 2.-UBICACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA "SAN ANTONIO". OBTENIDA DE GOOGLE EARTH (21, NOVIEMBRE, 2023). SITIO WEB: HTTPS://EARTH.GOOGLE.COM/WEB/SEARCH/PLANTA+SAN+ANTONIO+DE+LA+CAL/@17.03711668,-96.69950072,1599.08696202A,177.61681605D,35Y,342.15158817H,0T,0R/DATA=CIGIJGOKCW7MMEP_EJFAEVB9-xszDzFAGWUV2SIALVJAIX4TYJBWL1JAOgMKATA..... | 13 |
| FIGURA 3.- FOTOGRAFÍA FRONTAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA "SAN ANTONIO". ELABORACIÓN PROPIA. | 13 |
| FIGURA 4.- ESQUEMA EJEMPLO DE TREN DE PROCESO DE POTABILIZACIÓN. REPRODUCIDA DE: (CONAGUA, 2015, PÁG. 16). | 17 |
| FIGURA 5.- COLAPSO DE LA NUBE DE IONES EN LA COAGULACIÓN DE COLOIDES. REPRODUCIDA DE: (DAMIÁN MARTÍNEZ, 2020, PÁG. 20). | 19 |
| FIGURA 6.- EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS CON SISTEMA DE AGITACIÓN MÚLTIPLE. REPLICADA DE: (MARTÍNEZ CRUZ, 2017, PÁG. 36). | 21 |
| FIGURA 7.- COMPARADOR PARA ESTIMAR EL TAMAÑO DEL FLÓCULO PRODUCIDO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN. REPLICADA DE: (MARTÍNEZ CRUZ, 2017, PÁG. 33). | 23 |
| FIGURA 8.- DIAGRAMA PARA EL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN ZONAL Y SUS CORRESPONDIENTES ETAPAS. REPRODUCIDA DE: (OLIVA UC, GIACOMAN VALLEJOS, & PÉREZ CORTÉS, 2007, PÁG. 19). | 25 |
| FIGURA 9.- DIFERENTES MECANISMOS QUE PUEDEN REALIZAR TRANSPORTE. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 86). | 27 |
| FIGURA 10.- MECANISMO DE IMPACTO INERCIAL. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 86). | 28 |
| FIGURA 11.- MECANISMO DE IMPACTO INERCIAL. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 87). | 29 |
| FIGURA 12.- ACCIÓN DE LA TENSIÓN DE CIZALLAMIENTO. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 87). | 29 |
| FIGURA 13.- EFICIENCIA DEL TRANSPORTE DE PARTÍCULAS. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 88). | 30 |
| FIGURA 14.- VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE ATRACCIÓN O REPULSIÓN EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE DOS ESFERAS. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 90). | 31 |
| FIGURA 15.- INTERACCIÓN ENTRE EL GRANO DE ARENA Y LA PARTÍCULA DE ARCILLA CARGADA NEGATIVAMENTE. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 91). | 32 |
| FIGURA 16.-INTERACCIÓN ENTRE EL GRANO DE ARENA Y LA PARTÍCULA CON CARGA POSITIVA EN EXCESO. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 91). | 33 |
| FIGURA 17.-INTERACCIÓN ENTRE EL GRANO DE ARENA Y LA PARTÍCULA DE ARCILLA CON CARGA POSITIVA. REPRODUCIDA DE: (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 91). | 33 |
| FIGURA 18.- ANTRACITA. REPRODUCIDA DE: (CARBOTECNIA, 2018). | 38 |
| FIGURA 19.- ARENA SÍLICA. REPRODUCIDA DE: (CARBOTECNIA, 2023). | 39 |
| FIGURA 20.- CARBÓN ACTIVADO. REPRODUCIDA DE: (CARBOTECNIA, 2020). | 39 |
| FIGURA 21.- GRANATE. REPRODUCIDA DE: (SICHENG, 2010). | 40 |
| FIGURA 22.- ZEOLITA. RECUPERADA DE: (PURE WATER, 2022). | 41 |
| FIGURA 23.- PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA CARRERA DE FILTRACIÓN Y ESPESOR DE LA CAPA FILTRANTE. (REPRODUCIDA). (MALDONADO YACTAYO, 2005, PÁG. 103). | 43 |
| FIGURA 24.- CINÉTICA DE EVOLUCIÓN DEL CLORO Y PUNTO DE QUIEBRE. REPRODUCIDA DE: (LÓPEZ, 2016, PÁG. 12) | 52 |
| FIGURA 25.- VISTA FRONTAL DEL FILTRO PROTOTIPO. ELABORACIÓN PROPIA. | 69 |
| FIGURA 26.- VISTA SUPERIOR Y LATERAL DEL FILTRO PROTOTIPO. ELABORACIÓN PROPIA. | 69 |
| FIGURA 27.- BAJO DREN PARA DAR SOPORTE AL MEDIO FILTRANTE. ELABORACIÓN PROPIA. | 70 |





FIGURA 28.- TUBERÍAS DE CPVC PARA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA. ELABORACIÓN PROPIA. 70

FIGURA 29.- DIAGRAMA DEL FILTRO PROTOTIPO DE ARENA SÍLICA Y ZEOLITA. ELABORACIÓN PROPIA. 71

FIGURA 30.- TAMICES UTILIZADOS PARA CRIBAR LOS LECHOS FILTRANTES (ARENA SÍLICA Y ZEOLITA). ELABORACIÓN PROPIA 72

FIGURA 31.- LECHO SOPORTE DE GRAVA Y LECHO DE ARENA SÍLICA. ELABORACIÓN PROPIA. 72

FIGURA 32.- LECHO DE ZEOLITA Y VISTA FRONTAL DEL FILTRO PROTOTIPO. ELABORACIÓN PROPIA. 72

FIGURA 33.- POZO 19-1. ELABORACIÓN PROPIA. FIGURA 34.- POZO 20. ELABORACIÓN PROPIA. 73

FIGURA 35.- TOMA DE MUESTRA DE AGUA A LA ENTRADA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE “SAN ANTONIO”.
ELABORACIÓN PROPIA 73

FIGURA 36.- APARIENCIA DE LAS JARRAS ANTES DE SUMINISTRAR FLOCULANTE Y COAGULANTE. ELABORACIÓN PROPIA. 75

FIGURA 37.- APARIENCIA DE LAS JARRAS CON SULFATO DE ALUMINIO Y POLÍMERO DESPUÉS DE 2 HORAS. ELABORACIÓN PROPIA. . 76

FIGURA 38.- APARIENCIA DE LAS JARRAS CON HIDRÓXIDO DE CALCIO Y POLÍMERO DESPUÉS DE 2 HORAS. ELABORACIÓN PROPIA. . 76

FIGURA 39.- APARIENCIA DE LAS JARRAS ANTES DE SUMINISTRAR FLOCULANTE, COAGULANTE Y DESINFECTANTE. ELABORACIÓN
PROPIA. 77

FIGURA 40.- APARIENCIA DE LAS JARRAS CON HIDRÓXIDO DE CALCIO, POLÍMERO E HIPOCLORITO DE SODIO DESPUÉS DE 30 MINUTOS.
ELABORACIÓN PROPIA. 78

FIGURA 41.- APARIENCIA DEL AGUA CRUDA QUE SE SUMINISTRA A LA PTAP "SAN ANTONIO". ELABORACIÓN PROPIA. 81

FIGURA 42.- APARIENCIA DEL AGUA TRATADA CON HIPOCLORITO DE SODIO, HIDRÓXIDO DE CALCIO Y POLÍMERO. DESPUÉS DE UNA
HORA SE APRECIA EL SEDIMENTO FORMADO EN EL FONDO DE LOS VASOS DE PRECIPITADO. ELABORACIÓN PROPIA. 81

FIGURA 43.- DESPUÉS DE QUE LOS SÓLIDOS DISUELTOS SEDIMENTARAN, SE DECANTÓ EL AGUA EN EL GARRAFÓN DE 20 L. PARA
LUEGO SER BOMBEADA AL FILTRO PROTOTIPO. ELABORACIÓN PROPIA. 82

FIGURA 44.- 1) APARIENCIA DEL AGUA CRUDA QUE ES SUMINISTRADA A LA PTAP “SAN ANTONIO”; 2) APARIENCIA DEL AGUA QUE
RECIBIÓ UN TRATAMIENTO CON HIPOCLORITO DE SODIO, HIDRÓXIDO DE CALCIO Y POLÍMERO; 3) APARIENCIA DEL AGUA A LA
SALIDA DEL FILTRO PROTOTIPO CON ARENA SÍLICA Y ZEOLITA COMO MATERIAL FILTRANTE. ELABORACIÓN PROPIA. 82

FIGURA 45.- EVIDENCIA DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICAS REALIZADOS EN EL LABORATORIO Y PRUEBA DEL FILTRO PROTOTIPO.
ELABORACIÓN PROPIA. 82



Índice de tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1.- PARÁMETROS BÁSICOS USUALES DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN. ADAPTADA DE: (MARTÍNEZ CRUZ, 2017, PÁG. 31). | 21 |
| TABLA 2.- ÍNDICES DE WILLCOMB. ADAPTADA DE: (MARTÍNEZ CRUZ, 2017, PÁG. 33)..... | 23 |
| TABLA 3.- RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS REALIZADOS A LOS POZOS 19-1 Y 20, Y A LA ENTRADA DE LA PTAP "SAN ANTONIO". ELABORACIÓN PROPIA. | 74 |
| TABLA 4.- RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE JARRA CON SULFATO DE ALUMINIO Y POLÍMERO. ELABORACIÓN PROPIA. | 75 |
| TABLA 5.- RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE JARRA CON HIDRÓXIDO DE CALCIO Y POLÍMERO. ELABORACIÓN PROPIA..... | 76 |
| TABLA 6.- RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE JARRA CON HIPOCLORITO DE SODIO, HIDRÓXIDO DE CALCIO Y POLÍMERO. ELABORACIÓN PROPIA. | 78 |
| TABLA 7.- RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE LA EFICIENCIA DE LA PTAP "SAN ANTONIO". ELABORACIÓN PROPIA. | 79 |
| TABLA 8.- RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE LA EFICIENCIA DEL FILTRO PROTOTIPO CON EL MEDIO FILTRANTE PROPUESTO. ELABORACIÓN PROPIA. | 80 |



Introducción

El agua es un recurso fundamental para la vida en la Tierra; su importancia trasciende desde lo biológico hasta lo cultural, y su presencia es indispensable para el desarrollo y la supervivencia de todas las formas de vida en nuestro planeta.

Durante siglos, la relación entre demanda de agua y disponibilidad del recurso hídrico había gozado de cierta armonía, sin embargo, en los últimos años esto ha cambiado; el crecimiento poblacional, el desarrollo industrial, el uso irracional de los recursos y la producción agrícola intensiva, son algunos de los factores que han contribuido en la escasez de agua y la contaminación de la misma, provocando el deterioro de su calidad.

En definitiva, evaluar la calidad del agua, dependiendo de las condiciones del medio en el que se encuentre, tanto por fenómenos naturales como por contribución antropogénica, permite estimar su aceptabilidad para un uso en específico, es por eso que, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a un buen tratamiento de potabilización que garantice que el agua proveniente de fuentes naturales, como ríos, lagos o acuíferos, sea purificada y descontaminada de bacterias, virus, metales pesados, productos químicos, residuos y otros elementos nocivos que podrían representar un riesgo para la salud, provocando brotes de enfermedades gastrointestinales, infecciones e intoxicaciones que podrían propagarse a través del suministro de agua contaminada.

En el estado de Oaxaca el 69.74% de su recurso hídrico proviene de fuentes superficiales y su mayor uso se destina a la agricultura con 77.17% (CONAGUA, 2018). De acuerdo con (González Villarreal, Domínguez Mares, Cruz Palma, & Arriaga Medina, 2011) los principales problemas en el sector hídrico en el estado de Oaxaca son la contaminación del agua y la sobreexplotación de acuíferos.

La falta de un sistema adecuado de abastecimiento, la constante escasez del líquido, la demanda creciente de agua en la capital y la baja calidad del agua entregada a la población reflejan la necesidad de la rehabilitación de las plantas de tratamiento de agua potable como parte de un plan general de acción para resolver la problemática del servicio de agua potable y alcantarillado de la ciudad de Oaxaca y zona conurbada.

Es por eso que en el presente informe de residencia profesional se presenta la propuesta de un nuevo lecho filtrante para la planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”, para lo cual se elaboró un filtro prototipo a escala laboratorio que permitiera evaluar la eficiencia que tiene la arena sílice y la zeolita natural (clinoptilolita) como material filtrante.



Descripción de la empresa

▪ Reseña histórica

En 1902-1910 siendo gobernador del estado el C. Emilio Pimentel, se estableció la junta de saneamiento, cuyo objetivo era estudiar el proyecto de proveer de agua a la ciudad de Oaxaca.

Para 1920-1940 se instalan redes de distribución y tomas domiciliarias, al término del mandato del C. Constantino Capital, el 3 de mayo de 1940, se inició la construcción de la planta potabilizadora de aguas, en el cerro del fortín.

Al iniciarse la administración del C. Vicente González Fernández, gobernador del estado en 1940, atiende el problema de las obras de agua y saneamiento.

A fines de 1942, se terminan las obras de ampliación de las redes de agua y reposición de las tuberías instaladas en 1920.

El 26 de noviembre de 1942 el gobernador constitucional del estado, C. Vicente González Fernández, expide el reglamento de agua y saneamiento (decreto número 259 del 15 de diciembre de 1942). Señalándose que los servicios de agua potable y saneamiento de la ciudad, serán administrados por la “Junta de mejoras materiales de Oaxaca de Juárez”.

El 10 de diciembre del mismo año, el Dr. José E. Larrumbe, Jefe del Servicio Sanitario Coordinada a la junta de mejoras materiales, administradora del servicio, expidió el certificado de potabilidad del agua y anuncia oficialmente que es propia para beber.

Así el 10 de octubre de 1943, da inició a la operación de la planta potabilizadora de agua en la ciudad, siendo gobernador el C. Alfonso Pérez Gasga; el 6 de septiembre de 1962, dicta un acuerdo en el que señala que las atribuciones que tenía asignadas la junta de mejoras materiales de la ciudad de Oaxaca, serán ejercidas por el mismo gobierno a través de su departamento de comunicaciones y obras públicas,

En el año de 1970, se creó el departamento de operación y mantenimiento de la dirección general de obras públicas, que tenía a su cargo la operación y mantenimiento del sistema de agua potable de la ciudad.

Y en 1981, la federación transfiere los sistemas de agua potable a las entidades federativas para que coordinen y supervisen su operación, administración, planeación, estudio, rehabilitación, ampliación, programación, conservación y proyecto de la estructura necesaria para la captación, potabilización, conducción y distribución de agua potable, así como la estructura de alcantarillado y aquellas que se requieran para el control de la contaminación.



En el periódico oficial número 50 de fecha 12 de diciembre de 1981 aparece el decreto número 56, que da a conocer la ley para regular la prestación de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Oaxaca.

El 10 de diciembre del mismo año y según decreto número 57, publicado en el periódico oficial número 51 del estado de Oaxaca, siendo gobernador del estado el C. Pedro Vásquez Colmenares, se crea el organismo público descentralizado denominado “Comisión Coordinadora de los Sistemas de Obras y Servicios de Agua y Alcantarillado del Estado de Oaxaca” integrado por un consejo de administración y un director general, siendo la autoridad suprema de la comisión el primero, el cual se integró por un presidente, un secretario y vocales, así también, se instituye “La Administración Directa Local de Obras y Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de la Ciudad de Oaxaca” como la entidad ejecutora de la administración, operación y mantenimiento de los sistemas correspondientes con residencia en la ciudad de Oaxaca. Esta administración inicia sus actividades el 6 de enero de 1982.

El 31 de octubre de 2013 se aprueba el decreto número 2070 y se publica en el periódico oficial extra del 28 de noviembre del 2013, la ley del organismo operador público denominado “Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Oaxaca” (SOAPA, 2020)

▪ Misión

Proveer los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en forma eficiente e incluyente para todos los sectores de la población, orientando sus esfuerzos al desarrollo integral y sustentable del municipio de Oaxaca de Juárez y su zona conurbada, a través del impulso de proyectos estratégicos en el sector, sin comprometer los recursos naturales y fomentando una cultura de uso racional del vital líquido, que permita mejorar la calidad de vida de los usuarios, dentro de un marco de legalidad, democracia y convivencia armónica (SOAPA, 2020).

▪ Visión

Consolidarse como un organismo moderno, que garantice el acceso, disposición y saneamiento del agua para consumo personal, doméstico y de servicios, en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible a través de la prestación de servicios de calidad que generen un mayor bienestar en la ciudadanía, garantizando el adecuado funcionamiento de la infraestructura hidráulica y su viabilidad financiera, apoyados en un equipo comprometido, responsable y eficiente (SOAPA, 2020).



▪ Laboratorio de calidad del agua

El laboratorio de calidad del agua perteneciente al Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SOAPA), se encuentra ubicado en Manuel Sabino Crespo #509, colonia Centro, Oaxaca de Juárez. Es el responsable de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales. Además de cerciorarse de que se cumplan con los límites permisibles de calidad con base en la NOM-127-SSA1-2021.

Las determinaciones que se realizan en el laboratorio son:

- Físicoquímicas: pH, cloro residual, temperatura, sólidos disueltos totales, dureza, color, turbiedad, N-Nitritos, manganeso, fierro, alcalinidad, cloruros.
- Microbiológicas: coliformes termotolerantes por el método del número más probable.

Para lo cual se implementan las metodologías conforme a lo requerido en la normatividad mexicana (NMX-AA).



Figura 1.- Fotografía del laboratorio de calidad del agua del Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SOAPA). Elaboración propia.

▪ Planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”

La planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”, se encuentra ubicada en el municipio de San Antonio de la Cal, Oaxaca. Fue construida por la compañía Degremont Peletier; diseñada para un caudal de 400 l/s e inició su operación en 1979.



Se abastece de agua subterránea procedente de los pozos 19 y 20, los cuales están situados el bosque "El Tequio", en el municipio de Santa Cruz, Xoxocotlán.

La PTAP se encarga de suministrar agua a las colonias: San Antonio de la Cal, Surcos Largos, La Cieneguita, Satélite, Arenal de Cinco Señores, Alemán, Reforma Agraria, Gómez Sandoval, Felipe Carillo Puesto, José López Portillo, El Bajío, Experimental.



Figura 2.-Ubicación en tiempo real de la planta potabilizadora "San Antonio". Obtenida de Google Earth (21, noviembre, 2023). Sitio web: https://earth.google.com/web/search/Planta+san+antonio+de+la+cal/@17.03711668,-96.69950072,1599.08696202a,177.61681605d,35y,342.15158817h,Ot,Or/data=CijIqokCW7MmeP_EjFAEVB9-xszDzFAGWUV2sloLVjAIX4TYjBWL1jAOqMKATA



Figura 3.- Fotografía frontal de la planta potabilizadora "San Antonio". Elaboración propia.



Problemas a resolver

El proceso de filtración que se lleva a cabo en la planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”, actualmente presenta deficiencia en su operación, esto se debe principalmente a que sólo uno de los cuatro filtros con los que cuenta la planta se encuentra en funcionamiento, además de que el lecho filtrante (arena y grava) no ha recibido mantenimiento de retrolavado desde hace más de una década; cabe mencionar que el espesor del mismo es casi inexistente, por lo que no cumple con la función de retener partículas suspendidas del agua proveniente de la etapa de sedimentación de manera eficiente.

No obstante, de acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos efectuados al tanque de almacenamiento de la PTAP, se ha corroborado que el color, la turbiedad, los sólidos disueltos totales y la presencia de algunos metales como el hierro y manganeso superan los límites permisibles de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021; por lo que afecta a la población a la que se le distribuye el agua.



Objetivos

▪ **Objetivo general**

Proponer un nuevo lecho filtrante para la planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”.

▪ **Objetivos específicos**

1. Realizar análisis fisicoquímicos (temperatura, olor, turbiedad, color, pH, sólidos disueltos totales, dureza, nitritos, hierro y manganeso) de la calidad del agua que abastece a la PTAP “San Antonio”.
2. Adaptar un filtro prototipo a escala laboratorio con el lecho filtrante propuesto.
3. Evaluar la eficiencia del lecho filtrante propuesto por medio de análisis fisicoquímicos (temperatura, olor, turbiedad, color, pH, sólidos disueltos totales, dureza, nitritos, hierro y manganeso) para verificar el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021.





Justificación

La propuesta de un nuevo lecho filtrante para planta de tratamiento de agua potable “San Antonio” surge de la necesidad de mejorar el proceso de filtración, esto debido a que actualmente solo uno de los cuatro filtros con los que cuenta la planta está operando; cabe destacar que el material filtrante no ha recibido mantenimiento de retrolavado, el cual es esencial para el rendimiento del filtro, y consiste en remover las impurezas retenidas con un flujo de agua ascendente a través del medio filtrante, con suficiente fuerza para lograr separar los depósitos acumulados en el filtro y removerlos del sistema, logrando que el medio recupere la capacidad de remoción deseada, de manera que no se desarrollen problemas relacionados con la calidad del agua filtrada

La arena sílice es excelente material para la retención de los flóculos de tamaños muy pequeños que no son separados por la sedimentación y la zeolita natural (clinoptilolita) tiene una alta capacidad de intercambio catiónico y una gran afinidad por metales en solución los cuales se incorporan en su estructura cristalina; su uso como medio de filtración es una alternativa efectiva para la disminución de Fe y Mn en el agua natural, ya que actúa como soporte poroso sobre el que se obtiene una película adsorbente de Fe_2O_3 y MnO_2 que presentan alta capacidad para adsorber los cationes de dichos metales disueltos en agua

Es por eso que se tomaron en cuenta como una propuesta para ser probados en un filtro prototipo a escala laboratorio, el cual servirá para evaluar la eficiencia que estos tienen al reducir la turbiedad, el color, los sólidos disueltos totales, la dureza, el hierro y el manganeso a valores que cumplan con los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 y ser utilizado como nuevo lecho filtrante de la planta de agua potable “San Antonio” y brindar una calidad de agua óptima para la población a la que se le distribuye el agua.



Marco teórico

1. Proceso de tratamiento de agua potable

Los procesos de potabilización se integran con operaciones y procesos unitarios. En las operaciones unitarias la remoción de los contaminantes se realiza por fuerzas físicas, en los procesos unitarios el tratamiento se realiza con reacciones químicas y biológicas.

El conjunto de operaciones unitarias y procesos unitarios es conocido como tren de tratamiento o tren de proceso. Las consideraciones que se deben tomar en cuenta para seleccionar un tren de tratamiento dependen de las características de calidad del agua de abastecimiento. Entre éstas podemos encontrar: las variaciones en el tiempo, los límites permisibles en la normativa vigente, las condiciones del sitio para construcción de la planta, la tecnología disponible, la economía del proceso y muchos otros factores.

El objetivo es remover componentes indeseables en el agua de la fuente de abastecimiento, pero también disponer adecuadamente de los residuos de la planta potabilizadora (CONAGUA, 2015)

Los factores básicos que influyen en la selección de los procesos de tratamiento son:

1. Especificaciones del agua tratada.
2. Calidad del agua de abastecimiento y sus variaciones.
3. Condiciones económicas y sociales particulares.
4. Costos relativos de los diferentes procesos de tratamiento, referentes a la inversión, operación y mantenimiento.

La selección de los procesos estará influenciada primordialmente por los requisitos del efluente y la calidad del agua cruda y será facilitada por investigaciones de campo y pruebas de laboratorio. En caso de requerirse coagulación química se deben realizar pruebas de jarras para determinar gradientes de velocidad, pH óptimo, el tipo de coagulantes y rangos de dosificación y la conveniencia de usar coadyuvantes. En plantas de gran magnitud será conveniente realizar pruebas en plantas piloto. Tales plantas deben incluir modelos para determinar los parámetros de diseño y del tipo de granulometría de los materiales filtrantes.

En la figura 4 se puede observar un tren general de potabilización de agua, con la finalidad de que sirva de referencia para los siguientes incisos en los que se describen las principales unidades de proceso.

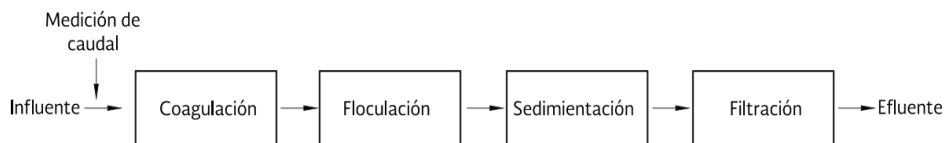


Figura 4.- Esquema ejemplo de tren de proceso de potabilización. Reproducida de: (CONAGUA, 2015, pág. 16).



1.1. Medición de caudales

El monitoreo sistemático y preciso de caudales en cada proceso es básico para una operación eficiente de una planta potabilizadora. Además, medir caudales sirve para determinar gradientes de velocidad y tiempos de residencia en mezcla rápida y floculación. También sirve para una correcta dosificación de reactivos, determinación de velocidades de filtración y retrolavado, determinación de eficiencias de producción de agua (influyente vs efluente) y recirculación de agua de lavado de filtros, entre otros.

Para la elección del medidor de caudal es recomendable tomar en cuenta los siguientes aspectos: que sea fácil de leer (lectura directa), que registre las mediciones, que sea fácil de instalar, hidráulicamente eficiente, preciso y resistente al uso. Es por esto que, para elegir un medidor de caudal, es necesario valorar el costo y presupuesto, el tipo de conducción, la accesibilidad, la exactitud, las características del flujo y la carga hidráulica disponible (CONAGUA, 2015).

1.2. Coagulación

El agua puede contener gran variedad de impurezas solubles e insolubles. Entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa. Lo anterior impide que las partículas se aproximen unas a otras y las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación (o flotación) y filtración (CONAGUA, 2015).

La coagulación es la desestabilización de la suspensión coloidal producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos. Los factores desestabilizantes de los coloides incluyen a fuerzas de atracción que dan lugar a la unión de partículas.

Las dispersiones coloidales tienen dos características comunes: su gran relación área-volumen en las partículas dispersas y el tener carga eléctrica (generalmente negativa) lo que origina una repulsión entre ellas, impidiendo su unión y separación del líquido. La coagulación tiene por objeto preparar a las partículas dispersas (mediante la anulación de las cargas superficiales) para lograr posteriormente, mediante la floculación, otras partículas más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua (Damián Martínez, 2020).

Para posibilitar las colisiones entre partículas es necesario establecer gradientes hidráulicos, recurriendo a la mezcla y agitación. Si las fuerzas eléctricas de repulsión entre las partículas se reducen en grado suficiente como para permitir que estas establezcan



contactos entre sí (favorecidas por el movimiento browniano), las fuerzas de London - Van der Waals (que pueden describirse como una fuerza atómica cohesiva que existe entre todos los átomos, atrayendo cada uno a todos los demás) permitirán que las partículas se adhieran unas a otras, formándose una aglomeración progresiva de estas (Abascal, 2013).

Las reacciones de coagulación duran fracciones de segundo desde que se ponen en contacto las partículas con el coagulante. La coagulación se consigue mediante una difusión rápida de las sustancias coagulantes empleando medios de agitación (más de 200 revoluciones por minuto). En la coagulación se reducen las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales debido a la formación de hidróxidos complejos. En la eficacia de la coagulación influyen diversos factores entre los que destaca el pH y las características fisicoquímicas de los lixiviados. Al poner en contacto las partículas coloidales con coagulantes químicos los iones de signo opuesto al de la partícula coloidal, que quedan en exceso en la disolución, rodean a la partícula formando con ésta una «doble capa eléctrica».

Parte de estos iones quedan fijados al sólido por fuerzas electrostáticas de adsorción y los demás constituyen una zona de difusión hasta llegar a una distribución iónica uniforme en el líquido. La diferencia de potencial de esta capa difusa se conoce como potencial electrocinético o potencial Z. La mayor parte de las sustancias que se ponen en contacto con un medio polar, como el agua, adquieren una carga eléctrica superficial por ionización o adsorción de iones, o ambas cosas a la vez (Barrera Díaz, 2014)

La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la "nube de iones" que rodean los coloides de modo que puedan aglomerarse como se muestra en la figura 5. La determinación adecuada del tipo de coagulante y la dosis no solo mejorará las características del agua resultante sino también disminuirá el costo del tratamiento (Damián Martínez, 2020).

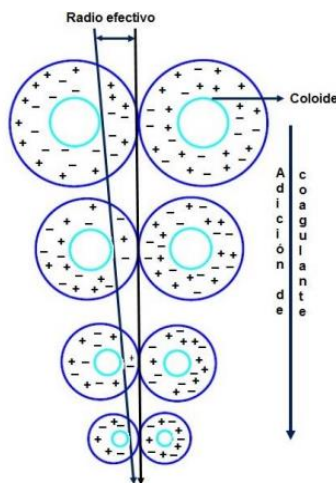


Figura 5.- Colapso de la nube de iones en la coagulación de coloides. Reproducida de: (Damián Martínez, 2020, pág. 20).



1.3. Floculación

Después de la coagulación las partículas formadas (microflóculos) están en disposición de reunirse, esta aglomeración de las partículas descargadas, llamada flóculos, ayudada ahora por una agitación lenta, es el objetivo de la floculación. En la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión.

La floculación está relacionada con los fenómenos de transporte de las partículas dentro del líquido, que son los que ocasionan el contacto de las partículas coaguladas para provocar colisiones entre ellas promoviendo su aglomeración. Estos flóculos inicialmente son pequeños, pero se juntan y forman aglomerados mayores capaces de sedimentar (Martínez Cruz, 2017).

Este proceso requiere un cierto período de tiempo; la floculación requiere un menor gradiente de agitación para impedir el rompimiento y disgregación de los flóculos ya formados. Durante la coagulación dosis fuertes de coagulantes producen un exceso de lodos y no se conseguirá un precipitado que posea las características deseadas para una buena separación. Por estas razones, se ha recomendado el uso de floculantes y/o ayudantes de la floculación (polielectrolitos). En los procesos convencionales estos suelen ser macromoléculas de polímeros orgánicos (Damián Martínez, 2020).

La floculación puede presentarse mediante dos modelos (Martínez Cruz, 2017):

- **Floculación pericinética:** esta producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano. El modelo de floculación pericinética se diferencia del modelo de floculación ortocinética en que su fuente de agitación es interna. Principalmente importarán el movimiento browniano y la sedimentación. Su efecto es principalmente sobre partículas de tamaño inferior a 1 micrón.
- **Floculación ortocinética:** se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética.

➤ Prueba de jarras

La prueba de jarras es un mecanismo de simulación de la coagulación-floculación que usualmente ocurre en las plantas de tratamiento y se realiza en pequeña escala empleando vasos de precipitación o “jarras”. Este ensayo se lleva a cabo con el fin de evaluar varios



parámetros de operación para de esta forma caracterizar el proceso y posteriormente diseñar las unidades a escala real (Martínez Cruz, 2017).

El ensayo se ejecuta colocando de 1 a 3 litros de agua cruda en cinco o seis vasos de precipitación, para luego adicionarles diversas dosis de coagulante a medida que se agitan a gran velocidad (mezcla rápida). Posteriormente, se agitan las jarras de forma lenta por un periodo entre 10 y 30 minutos; tiempo en el que se forman los flóculos, los cuales empezarán a sedimentar una vez detenido este periodo de mezcla lenta.

La figura 6 presenta un esquema del equipo de prueba de jarras que se emplea comúnmente en el laboratorio, el cual consta de un agitador múltiple de velocidad controlable.

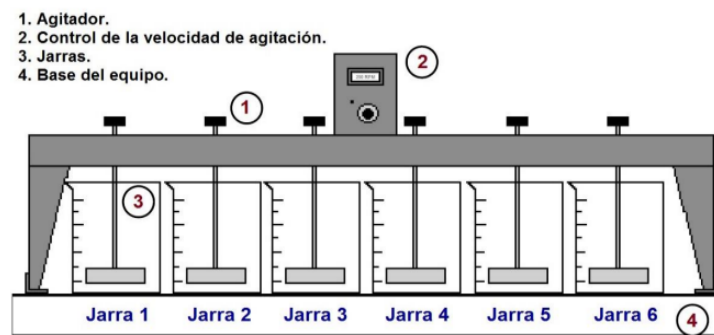


Figura 6.- Equipo de prueba de jarras con sistema de agitación múltiple. Replicada de: (Martínez Cruz, 2017, pág. 36).

Según (Martínez Cruz, 2017), el ensayo de prueba de jarras se puede establecer, entre otros, los siguientes parámetros:

- Dosis óptima de coagulante.
- Influencia de la concentración de los coagulantes.
- Influencia del pH en la coagulación.
- Gradiente y tiempo óptimo de floculación.
- Velocidad de sedimentación en las jarras.

Los valores usuales de los parámetros de coagulación-floculación se especifican en la tabla 1.

Tabla 1.- Parámetros básicos usuales de coagulación-floculación. Adaptada de: (Martínez Cruz, 2017, pág. 31).

| Parámetro | Descripción |
|-------------------------|---|
| Tipo de coagulante | Coagulante metálico solo o con ayuda de polímero o polímero solo. |
| Alcalinidad y pH óptimo | Se debe o no agregar alcalinizante conjuntamente con el coagulante. |

| | |
|---|--|
| Dosis óptima de coagulante | Varía entre 5 y 100 mg/L. |
| Gradiente de velocidad en la mezcla rápida | Varía entre 600 y 1000 s ⁻¹ para mezcladores mecánicos. |
| Tiempo de mezcla rápida | En fracciones de segundo o prolongada de 10 a 60 s. |
| Gradiente óptimo de velocidad en la floculación | Varía entre 15 y 100 s ⁻¹ . |
| Tiempo óptimo de retención en la floculación | Varía entre 15 y 35 min. |

• Evaluación de la prueba de jarras

Existen varios parámetros de tipo cualitativo y cuantitativo que se emplean para evaluar el proceso de coagulación-floculación, desarrollado mediante las pruebas de jarras (Martínez Cruz, 2017).

- Determinaciones cualitativas

- **Tamaño del flóculo producido:** es necesario evaluar el tamaño de los flóculos producidos, mediante la comparación con el esquema elaborado por la Water Research Association Inglaterra, que se presenta en la figura 10, o empleando el Índice de Willcomb, de la tabla 2, que establece el tipo de flóculos de acuerdo a ciertas características que se verifican por simple observación. Se selecciona como parámetro óptimo a la condición de la jarra que produzca flóculos más grandes, que sedimenten con mayor velocidad y muestren más transparente el agua tratada.
- **Tiempo inicial de formación del flóculo:** para establecer la velocidad de la reacción se estima el tiempo que tarda en aparecer el primer flóculo en el agua tratada, desde la inyección del coagulante en cada una de las jarras.

- Determinaciones cuantitativas

Las determinaciones cuantitativas son de carácter físico-químicas y se establecen antes y después del tratamiento. Terminada la prueba de jarras, los parámetros se evalúan sobre una alícuota del sobrenadante de cada una de las jarras, luego de transcurrido el tiempo de sedimentación, el cual no debe ser inferior a 10 minutos.

- **Turbiedad y color residual:** estos parámetros son considerados los más importantes para caracterizar los procesos de coagulación, floculación y sedimentación de las partículas en el agua. La medición brinda una exacta estimación de la cantidad de partículas removidas con el tratamiento, lo cual puede considerarse que está correlacionado directamente con la eficiencia de la aglomeración.
- **pH, alcalinidad y hierro:** se pueden medir de manera adicional estos parámetros, en caso de requerirse una completa caracterización del agua tratada que favorecen la aglomeración de los flóculos a través de puentes.



Para evaluar la calidad de los flóculos formados se usa el índice de Willcomb, el cual clasifica los flóculos por su tamaño, tal como se indica en la tabla 2.

Tabla 2.- índices de Willcomb. Adaptada de: (Martínez Cruz, 2017, pág. 33).

| Índice | Descripción |
|--------|---|
| 0 | Flóculo coloidal, sin señal de aglutinación. |
| 2 | Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible. |
| 4 | Disperso. Flóculo bien formado, pero uniformemente distribuido con sedimentación lenta. |
| 6 | Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande, precipita con lentitud. |
| 8 | Bueno. Flóculo que se deposita fácil, pero no completamente. |
| 10 | Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando un líquido cristalino. |

El diámetro de los flóculos es variable, desde menos de 0.001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de la mezcla y la floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención). Se observa el tamaño del flóculo producido y se evalúa cualitativamente según sus características. Su tamaño podría expresarse en milímetros de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra, como se muestra en la figura 7.

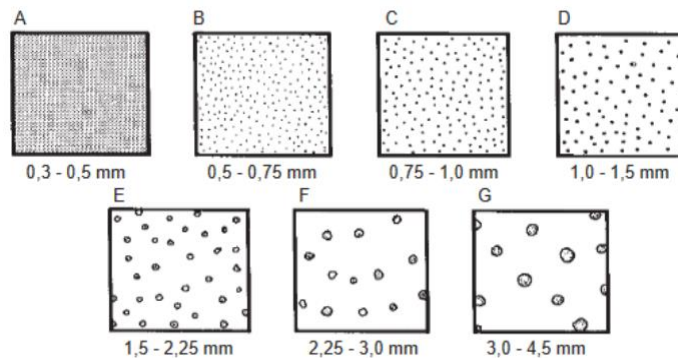


Figura 7.- Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en el proceso de coagulación. Replicada de: (Martínez Cruz, 2017, pág. 33).

1.4. Sedimentación

La sedimentación es la separación de partículas sólidas suspendidas en una corriente de líquido mediante su asentamiento por gravedad. El proceso de sedimentación tiene dos objetivos, la clarificación y el espesamiento. La finalidad primordial de la clarificación es remover las partículas finas suspendidas y producir un efluente claro, mientras que la del espesamiento es incrementar la concentración de sólidos suspendidos en una corriente de



alimentación. Estas funciones están relacionadas y la terminología sólo establece una distinción entre los resultados que se desean del proceso. Se consideran sólidos sedimentables a las partículas que por su tamaño y peso sedimentan en una hora, generalmente, la cantidad de sólidos sedimentables se expresa en mililitros de sólido por litro de agua, pero también se da en partes por millón, en peso (Arboleda Valencia, 2000).

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida (Oliva Uc, Giacomán Vallejos, & Pérez Cortés, 2007).

- **Sedimentación de partículas discretas:** son aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta. Además, se presenta en suspensiones con bajas concentraciones de sólidos, cada una de las partículas se comporta como entidades individuales y casi no hay interacción entre ellas.
- **Sedimentación de partículas floculentas:** es producida por la aglomeración de partículas coloidales desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad) sí cambian durante la caída. Este tipo de sedimentación ocurre cuando tenemos bajas concentraciones de partículas que son susceptibles de flocula.

Cuando existen bajas concentraciones de partículas, éstas sedimentan o decantan libremente; en cambio, con una alta concentración de partículas floculentas, superiores a 500 mg/L, éstas se encuentran a distancias tan reducidas que se adhieren entre sí y sedimentan masivamente. Así, se crea una clara superficie de separación entre los flóculos y el líquido que sobrenada y esto da origen al fenómeno de sedimentación conocido con el nombre de sedimentación interferida o zonal (Oliva Uc, Giacomán Vallejos, & Pérez Cortés, 2007)

Una hipótesis fundamental para la sedimentación interferida es que, la velocidad de caída de una partícula depende principalmente de la concentración de las partículas.

En este tipo de sedimentación, la alta concentración de partículas, produce que el agua suba a través de los intersticios de las partículas que están cayendo, por lo tanto, el agua



que fluye hacia arriba, produce que ciertas partículas queden suspendidas y además hace que las más pequeñas suban en vez de bajar.

Durante el proceso de sedimentación de lodos (con una suspensión floculenta de elevada concentración en donde se tiene inicialmente una concentración distribuida uniformemente en toda la altura de la columna de líquido), la altura de la capa superior de los lodos A va cambiando con el tiempo t (figura 8), por lo tanto, el cambio de la altura con el paso de tiempo está relacionado con la velocidad de sedimentación, para verlo mejor se explicarán las zonas (Oliva Uc, Giacomán Vallejos, & Pérez Cortés, 2007).

- **Zona A-B:** corresponde a la zona clara (parte superior del recipiente), las partículas descienden con un incremento sucesivo de la velocidad debido a que las partículas de las capas inferiores sedimentan previamente y por lo tanto no presentan mayores obstáculos durante su caída.
- **Zona B-C:** es considerada como la zona turbia, se puede ver que la curva tiene una pendiente rectilínea y esto corresponde a una velocidad de caída constante definida únicamente por el tipo de floculación y la concentración de las partículas.
- **Zona C-D:** (parte inferior de la zona turbia), se produce la disminución progresiva de la velocidad de caída de las partículas hasta su detención. Se le llama también zona de desaceleración o transición.
- **Zona D-E:** en esta zona los flóculos se tocan y ejercen presión sobre las capas inferiores, puesto que están soportados por estas. Esta es la zona de compresión.

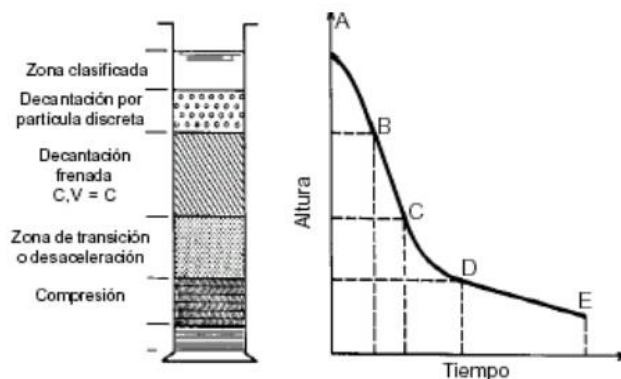


Figura 8.- Diagrama para el proceso de sedimentación zonal y sus correspondientes etapas. Reproducida de: (Oliva Uc, Giacomán Vallejos, & Pérez Cortés, 2007, pág. 19).

El desarrollo y aplicación de la sedimentación para la clarificación de un agua debe estar basada en el entendimiento del proceso y de las variables que pueden modificar su eficiencia. Los sólidos pueden estar contenidos en el agua en forma disueltos, flotando o en suspensión. Se le da el nombre de sedimentador a la estructura que reduce la velocidad

del agua para que pue dan sedimentar los sólidos. En las plantas de tratamiento son rectangulares o circulares, con o sin dispositivos mecánicos para la recolección de lodos. Pueden ser también cuadrados, pero son menos frecuentes (CONAGUA, 2015).

La selección del tipo de tanque para una aplicación dada depende del tamaño de la instalación, de las disposiciones y reglamentos de los organismos locales de control, de las condiciones locales del terreno y de la estimación de los costos, entre otros. Se recomienda disponer de dos o más tanques con objeto de que el proceso permanezca en funcionamiento mientras uno de ellos esté fuera de servicio por reparación y mantenimiento.

En plantas grandes, el número de tanques viene determinado principalmente por las limitaciones del tamaño. La profundidad común de los tanques de sedimentación varía entre 2 y 4 m. La longitud recomendable de los tanques rectangulares no debe exceder los 75 m. El ancho del tanque es a menudo controlado por el equipo disponible de recolección y eliminación de lodos, pero se recomienda que no sea mayor de 16 m. Las proporciones longitud:ancho empleadas en el diseño varían entre 3:1 y 6:1. Las pendientes del fondo pueden ser del 1 por ciento para tanques rectangulares y de 7-8 por ciento para tanques circulares. El tiempo de residencia varía desde menos de una hora hasta más de un día y los tanques que se limpian mecánicamente se diseñan para un tiempo de residencia de 3 horas (Arboleda Valencia, 2000).

1.5. Filtración

La filtración es un proceso de tratamiento destinado a clarificar el agua al remover materia sólida en suspensión mediante su paso por un medio granular o poroso. La filtración generalmente sigue a los procesos de coagulación, floculación y sedimentación. Permite además una buena eliminación de bacterias, color, turbiedad, así como ciertos problemas de olor y sabor en el agua (CONAGUA, 2015).

1.5.1. Mecanismo de filtración

De acuerdo con (Maldonado Yactayo, 2005), las fuerzas que mantienen a las partículas removidas de la suspensión adheridas a las superficies de los granos del medio filtrante son activas para distancias relativamente pequeñas (algunos ángstroms), la filtración usualmente es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas por remover son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecen adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento.

El transporte de partículas es un fenómeno físico e hidráulico, afectado principalmente por los parámetros que gobiernan la transferencia de masas. La adherencia entre partículas y



granos es básicamente un fenómeno de acción superficial, que es influenciado por parámetros físicos y químicos.

- **Mecanismos de transporte:** los distintos mecanismos que pueden realizar transporte de las partículas dentro de los poros del medio filtrante están esquematizados en la figura 9, en ella se ve cómo simultáneamente pueden actuar varias causas para aproximar el material suspendido hasta los granos del medio filtrante. Es interesante destacar que estas causas varían si la filtración se produce en las capas superficiales o en la profundidad del medio filtrante. En el primer caso, la acción física de cernido es el factor dominante, mientras que en el segundo caso es el de menor importancia.

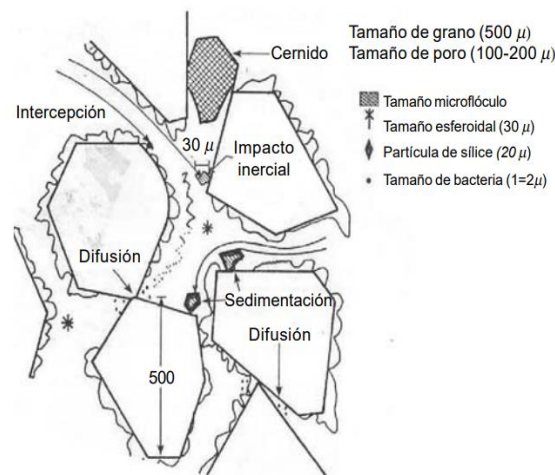


Figura 9.- Diferentes mecanismos que pueden realizar transporte. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 86).

Los mecanismos que pueden realizar transporte son los siguientes (Maldonado Yactayo, 2005):

- **Cernido:** resulta evidente que cuando la partícula es de tamaño mayor que los poros del lecho filtrante, puede quedar atrapada en los intersticios. El cernido, en general, actúa solo en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes, capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo, cuya velocidad aumenta en las constricciones.
- **Sedimentación:** el efecto de la gravedad sobre las partículas suspendidas durante la filtración fue sugerido hace más de 70 años, sin embargo, durante mucho tiempo la contribución de este mecanismo no se consideró significativa, pues la velocidad de sedimentación de las partículas suspendidas y, especialmente, la de los pequeños flóculos, es mucho más pequeña en comparación con la velocidad intersticial.



La sedimentación solo puede producirse con material suspendido relativamente grande y denso, cuya velocidad de asentamiento sea alta y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja. Algunas partículas más pequeñas y floculentas pueden quedar retenidas en regiones donde la velocidad de escurrimiento sea pequeña debido a la distribución parabólica de velocidad en el régimen laminar.

- **Intercepción:** normalmente, el régimen de escurrimiento durante la filtración es laminar y, por lo tanto, las partículas se mueven a lo largo de las líneas de corriente. Debido a que las partículas suspendidas tienen una densidad aproximadamente igual a la del agua, ellas serán removidas de la suspensión cuando, en relación con la superficie de los granos del medio filtrante, las líneas de corriente están a una distancia menor que la mitad del diámetro de las partículas suspendidas.
- **Difusión:** se ha observado que las partículas relativamente pequeñas presentan un movimiento errático cuando se encuentran suspendidas en un medio líquido (figura 9). Este fenómeno, resultado de un bombardeo intenso a las partículas suspendidas por las moléculas de agua, es conocido como movimiento browniano, y se debe al aumento de la energía termodinámica y a la disminución de la viscosidad del agua. La eficiencia del filtro debida a la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro de la partícula del grano.
- **Impacto inercial:** durante el escurrimiento, las líneas de corriente divergen al estar cerca de los granos del medio filtrante, de modo que las partículas suspendidas, con cantidad de movimiento suficiente para mantener su trayectoria, colisionan con los granos, según se muestra en la figura 10.

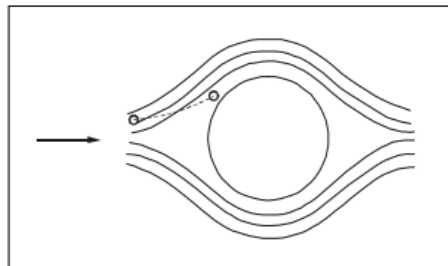


Figura 10.- Mecanismo de impacto inercial. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 86).

- **Acción hidrodinámica:** la remoción de partículas floculentas de tamaño relativamente grande ($\sim 10 \mu\text{m}$) es atribuida a la acción hidrodinámica, según se muestra en la figura 11.

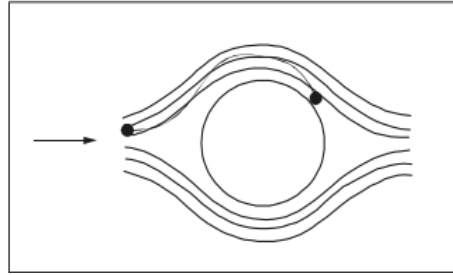


Figura 11.- Mecanismo de impacto inercial. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 87).

La comprensión de este mecanismo se facilita cuando se considera un escurrimiento en el que el gradiente de velocidad es constante. Una partícula suspendida en un fluido que escurre en estas condiciones estará sometida, como muestra la figura 12, a velocidades tangenciales variables en dirección perpendicular a la del escurrimiento.

La diferencia entre V_a y V_b tiende a hacer que la partícula gire y produzca una diferencia de presión en dirección perpendicular al escurrimiento, lo que hará que la partícula sea conducida a una región de velocidad más baja. A pesar de no tener exactamente las condiciones descritas anteriormente, en la práctica de la filtración, el fenómeno es análogo y es válido para explicar la remoción de partículas de un tamaño del orden de $10 \mu\text{m}$.

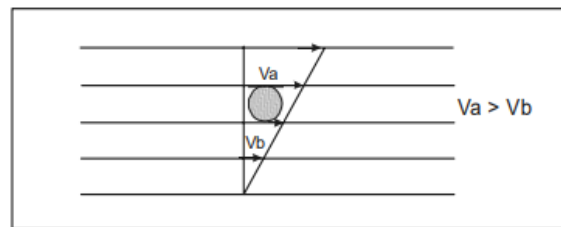


Figura 12.- Acción de la tensión de cizallamiento. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 87)

- **Mecanismos de transporte combinados:** es probable que todos los mecanismos actúen simultáneamente durante la filtración; sin embargo, el grado de importancia de cada uno de ellos depende de las características de la suspensión y del medio filtrante. Normalmente se ha dado poca importancia a los efectos de la acción física de cernido y de impacto inercial durante la filtración. La eficiencia del medio filtrante para remover partículas de la suspensión por acción de los mecanismos de transporte puede expresarse adecuadamente como una función de la intercepción, difusión, sedimentación y acción hidrodinámica.

Se ha estudiado el efecto combinado de la sedimentación, intercepción y difusión y se ha verificado que, para las partículas de densidad igual a 1.05 g/cm^3 , la eficiencia de colección de un grano aislado presenta un valor mínimo cuando el tamaño de las partículas suspendidas es del orden de $1.4 \mu\text{m}$, como se muestra en la figura 13.

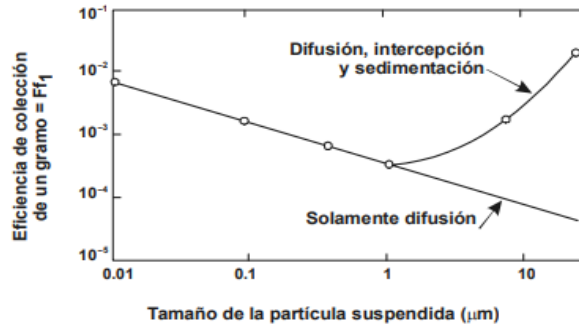


Figura 13.- Eficiencia del transporte de partículas. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 88).

De un modo general, se puede concluir que la eficacia de colección de las partículas suspendidas es inversamente proporcional a la velocidad de aproximación V , al diámetro de los granos del medio filtrante D y a la viscosidad μ , y que la eficiencia de colección es una función de las características de la suspensión.

- **Mecanismos de adherencia:** la adherencia entre las partículas transportadas y los granos está gobernada, principalmente, por las características de las superficies de las partículas suspendidas y de los granos. Las partículas se pueden adherir directamente tanto a la superficie de los granos como a partículas previamente retenidas.

La adherencia se atribuye a dos tipos de fenómenos: interacción entre las fuerzas eléctricas y las de Van der Waals, y al enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos de un material intermediario. Se ha sugerido, inclusive, que la filtración no es más que un caso especial de la floculación, donde algunas partículas son fijas (aquellas adheridas inicialmente a los granos) y otras suspendidas

- **Interacción combinada de las fuerzas electrostáticas y las de Van der Waals**

De un modo general, las partículas sólidas sumergidas en agua presentan cargas en sus superficies, debido a una o más de las siguientes razones:

- Disociación de iones en la superficie de las partículas.
- Cargas no balanceadas debido a las imperfecciones de la estructura del cristal.
- Reacciones químicas con iones específicos de la suspensión, con formación de enlaces químicos.
- Sustitución isomórfica en la estructura del cristal.

En la interfaz sólido-líquido existe una capa de iones de carga opuesta a la del sólido, conocida como capa estacionaria o compacta, y otra de iones esparcidos, también de carga opuesta, denominada capa difusa. Esta capa electroquímica doble establece un potencial de repulsión entre las partículas de la suspensión con cargas eléctricas semejantes. La magnitud de este potencial de repulsión y la distancia a la cual se extiende su campo de acción son afectadas por la composición química de la suspensión.

Las fuerzas de atracción entre los átomos y entre las partículas fueron postuladas por Van der Waals para explicar la diferencia entre los gases ideales, los reales, y los vapores. Estas fuerzas son resultantes de varias acciones diferentes, como el efecto de Keeson, la inducción y la dispersión.

Entre las partículas sólidas es posible que se produzcan interacciones por cualquiera de estos dos o tres efectos mencionados; por lo tanto, solamente la contribución debida a la dispersión se adiciona y hace efectiva a una distancia inferior a 500 ángstroms (Å°). Por ese motivo, la interacción de las fuerzas de Van der Waals entre las partículas sólidas es, en muchas ocasiones, referida como interacción de dispersión.

Si en una dispersión coloidal, las únicas fuerzas entre las partículas fueran las de atracción de Van der Waals y las de repulsión eléctrica, se podría calcular el efecto global de interacción por la adición de ambas como contribuciones. La figura 14 representa la variación de la energía de repulsión y atracción, y el efecto global entre dos partículas esféricas de radio igual a $1 \mu\text{m}$.

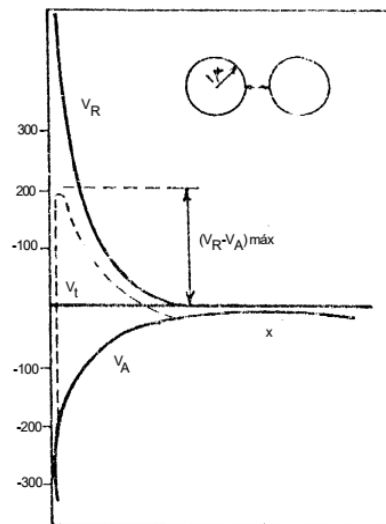


Figura 14.- Variación del potencial de atracción o repulsión en función de la distancia entre dos esferas.
Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 90).



Con el fin de reducir la estabilidad de los coloides para que se adhieran entre sí con las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante, el valor de la resultante, $(V_R - V_A)_{\text{máx}}$, debe reducirse o, preferentemente, anularse. La interacción entre las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante puede entenderse mejor a través del análisis de las figuras x, y, z.

En cualquiera de los casos, se considera que los granos del medio filtrante tienen cargas superficiales negativas.

La figura 15 muestra el caso de una partícula de arcilla cargada negativamente y de forma no redondeada. La barrera de energía, $(V_R - V_A)_{\text{máx}}$, evita que ocurra adherencia entre las partículas y los granos del medio filtrante; por lo tanto, si se considerara que algunas arcillas, como la caolinita, pueden tener regiones positivas como negativas cuando el pH de la suspensión es bajo, es de esperar que algunas partículas sean removidas de la suspensión.

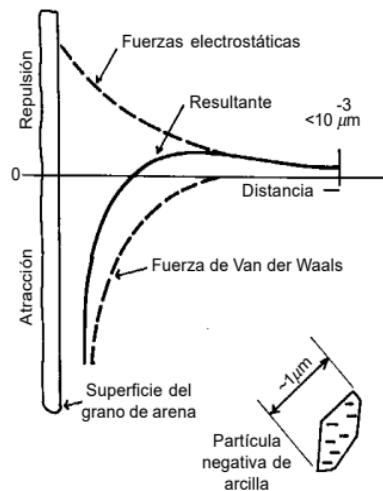


Figura 15.- Interacción entre el grano de arena y la partícula de arcilla cargada negativamente. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 91).

En el caso de la figura 16, la arcilla en forma de placas es representada como coágulo; esto es, un flóculo de tamaño aproximadamente igual a $1 \mu\text{m}$, donde los productos de hidrólisis del aluminio son incorporados de modo que la carga superficial resultante es positiva. La barrera de energía es sustituida por un potencial positivo, resultante de la suma de los efectos de las fuerzas de Van der Waals y las electrostáticas. La adherencia entre partículas y granos resulta del contacto entre ambos. La eficiencia de emoción es elevada al principio, pero, a medida que la superficie de los granos se torna positiva, la eficiencia disminuye. La situación es semejante a la que se tiene en



las operaciones de coagulación y floculación, cuando se produce la reversión del potencial Z.

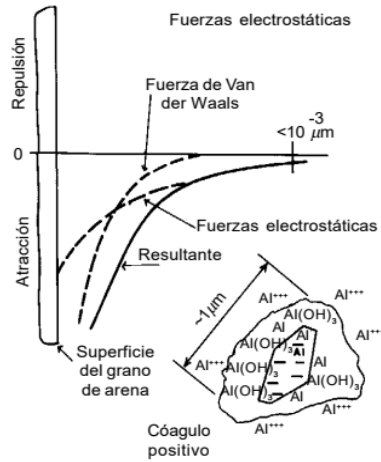


Figura 16.-Interacción entre el grano de arena y la partícula con carga positiva en exceso. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 91).

En el caso de la figura 17, las partículas están en el punto isoeléctrico; esto es, en el punto neutro. La barrera de energía desaparece y del contacto puede resultar una adherencia y filtración eficiente. En la práctica, esta condición puede no ser satisfactoria en el caso de filtros de arena, debido a que se produciría una excesiva deposición de partículas en las capas superiores y al rápido aumento de la pérdida de carga. A pesar de no haber sido estudiada con profundidad, la eficiencia de los filtros de arena es mayor cuando los flóculos son negativos.

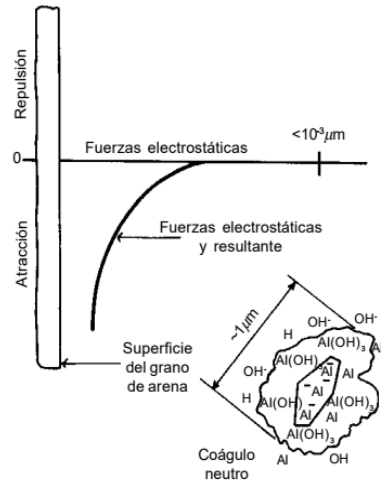


Figura 17.-Interacción entre el grano de arena y la partícula de arcilla con carga positiva. Reproducida de: (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 91).



- **Enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos**

Como se sabe, la desestabilización de los coloides es efectuada por los productos de la hidrólisis que a determinados pH se polimerizan. Las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan sus segmentos extendidos en el agua, los que pueden ser adsorbidos por otras partículas o por sitios vacantes en los granos del filtro. Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van der Waals y de las cargas electrostáticas.

El uso de ayudantes de filtración o polielectrolitos inyectados en el afluente al filtro puede, por eso, ser de gran utilidad para aumentar la adhesión de la materia suspendida al medio filtrante.

Las partículas con sus segmentos poliméricos adheridos, al atravesar las constricciones del medio filtrante, se enlazan con los segmentos sueltos adsorbidos por los granos o por los de partículas ya adheridas al lecho filtrante y quedan en esta forma retenidas.

1.5.2. Factores que influyen en la filtración

La eficiencia de la filtración está relacionada con las características de la suspensión y del medio filtrante, con la hidráulica de la filtración y la calidad del efluente. Por ejemplo, la filtración de agua cruda en filtros lentos de arena, y la de agua coagulada en filtros rápidos de arena, resultan de interacciones distintas entre los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas, pues un factor importante de ser tenido en cuenta en la filtración lenta puede, muchas veces, no ser importante para la filtración directa.

- **Características de la suspensión**

De modo general, la eficiencia de remoción de partículas suspendidas en un medio filtrante, está relacionada con las siguientes características de la suspensión:

- a) **Tipo de partículas suspendidas:** la filtración de flóculos que no sedimentan en una planta de ablandamiento difiere sustancialmente del caso en que se tienen flóculos provenientes de pretratamiento con una sal de hierro o aluminio. Por otro lado, el tipo de partículas primarias presentes en el agua cruda influye en la eficiencia de la filtración. Por ejemplo, la existencia de algas en el afluente a los filtros de una instalación de filtración directa, influye en la formación de curvas de pérdida de carga más acentuadas que aquellas en que el afluente solo posee partículas suspendidas coaguladas de arcilla o sílice.
- b) **Tamaño de las partículas suspendidas:** existe un tamaño crítico de partículas suspendidas, del orden de 1 µm, para el cual se tiene menos oportunidad de contacto entre la partícula suspendida y el grano del medio filtrante. Este hecho se puede observar desde el principio cuando el medio filtrante está limpio, hasta el final de la





carrera de filtración. Algunos productos químicos, como los coagulantes tradicionales y polímeros, pueden usarse para ajustar el tamaño de las partículas suspendidas de modo de obtener una eficiencia mayor. Las partículas menores que el tamaño crítico serán removidas eficientemente debido a la acción de otros mecanismos, como la interceptación y sedimentación.

- c) **Densidad de las partículas suspendidas:** cuanto mayor sea la densidad de las partículas suspendidas, mayor será la eficiencia de remoción de las partículas de tamaño superior al crítico mencionado anteriormente.
- d) **Resistencia o dureza de los flóculos:** la dureza de los flóculos es otro factor importante en la filtración rápida, pues los flóculos débiles tienden a fragmentarse y penetrar fácilmente en el interior del medio filtrante, favoreciendo que ocurra el traspase final de la turbidez límite, mientras que los flóculos duros o resistentes no se fragmentan fácilmente, pero producen una pérdida de carga mayor.
- e) **Temperatura del agua por filtrar:** en general, el aumento de temperatura conduce a una eficiencia mayor pues se tiene un aumento de energía termodinámica en las partículas del agua y consecuentemente, la difusión se vuelve un mecanismo importante cuando se tienen partículas suspendidas menores de una micra. Por otro lado, la disminución de la viscosidad facilita la acción del mecanismo de sedimentación de partículas mayores de 1 μm .
- f) **Concentración de partículas suspendidas en el afluente:** cuando el medio filtrante se encuentra limpio la eficiencia de remoción depende de la concentración de partículas suspendidas en el afluente. Después de algún tiempo de filtración, la eficiencia de remoción aumenta con el aumento de concentración de las partículas suspendidas en el afluente, pues las partículas retenidas hacen de colectoras con otras partículas suspendidas. Evidentemente, al existir una eficiencia de remoción mayor con el aumento de concentración, la curva de pérdida de carga en función del tiempo será más acentuada.
- g) **Potencial zeta de la suspensión:** cuando las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante tienen potencial zeta del mismo signo, la interacción entre las capas dificulta la adherencia, lo cual reduce la eficiencia de remoción. Como los materiales filtrantes usuales presentan potenciales zeta negativos, sería conveniente que las partículas suspendidas tuviesen potencial zeta neutro o positivo.
- h) **pH del afluente:** el pH influye en la capacidad de intercambio iónico entre las partículas suspendidas y los granos del medio filtrante. Para valores de pH inferiores a 7,0 disminuye el intercambio de cationes y aumenta el intercambio de aniones sobre las superficies positivas; mientras que para valores de pH superiores a 7.0 se produce un aumento en el intercambio de cationes y una disminución en el intercambio de aniones sobre las superficies negativas.



- **Características del medio filtrante**

Entre las características del medio filtrante que influyen en la filtración, se destacan:

- a. **Tipo de medio filtrante:** el tipo de medio filtrante debe seleccionarse basándose en la calidad que se desea para el agua filtrada. Adicionalmente, también debe tenerse en cuenta la duración de la carrera de filtración (capacidad de retención) y la facilidad de lavado. Un medio filtrante ideal es aquel de granulometría determinada y cierto peso específico, que requiere una cantidad mínima de agua para ser lavado de manera eficiente y que es capaz de remover la mayor cantidad posible de partículas suspendidas, para producir un efluente de buena calidad.

El principal rol de un medio filtrante es causar la separación de partículas de un fluido con el mínimo consumo de energía. Cuando se trabaja con líquidos, el material filtrante que se utiliza puede marcar una gran diferencia. La filtración trata de garantizar que el líquido esté filtrado adecuadamente.

Existen varios tipos de materiales filtrantes; todos ellos tienen espacios vacíos, también conocidos como “poros”. Estos son algunos de los tipos de filtros más utilizados en los sistemas de filtración (Carbotecnia, 2023).

- **Mallas:** son un producto cilíndrico que tiene en su interior un elemento filtrante perforado y metálico, por lo general la malla es fabricada con acero inoxidable estas mallas ayudan a filtrar fluidos y se obtienen muchos beneficios, se utiliza para separar, cribar o tamizar distintos fluidos.
- **Materiales no tejidos:** son una acumulación de fibras adheridas entre sí por agentes químicos (resinas o adhesivos) o medios físicos (como la temperatura y presión), y forman una estructura similar a un tejido que puede utilizarse en todo tipo de aplicaciones, llevan décadas utilizándose como filtros y toallitas, pero también pueden emplearse como medios filtrantes en líquidos.

La disponibilidad y variedad de formas y tamaños hacen de los no tejidos una excelente opción para aplicaciones de filtración en las que se requiere la eliminación de partículas, pero no necesariamente el objetivo principal. Algunos ejemplos son las fibras termo-adheridas o los polímeros espumados. Estos materiales generalmente crean porosidades más complejas, de esta forma se complica el paso de los sólidos a través de ellos.

- **Membranas:** es básicamente una fina capa de material utilizada para separar partículas de líquidos o gases, se suelen utilizar en plantas de tratamiento de agua y purificadores de aire porque, con el tiempo han bajado sus costos de fabricación y se pueden fabricar con muchos materiales diferentes (como papel, nailon, polímeros o cerámicos). Son materiales permeables.

También son muy eficaces para eliminar bacterias, virus y otros contaminantes de líquidos y gases.





- **Materiales granulares:** se usan como medios filtrantes o como sistemas de soporte en los filtros de lecho profundo. En columnas empacadas, estos forman espacios interparticulares. Los materiales granulares se utilizan para filtrar líquidos. La finalidad de los medios granulares es eliminar o separar las partículas sólidas del líquido, permitiendo al mismo tiempo el paso de líquidos, gases y/o vapores. Los medios granulares más utilizados en esta aplicación son:

- ❖ **Antracita:** de acuerdo con (Carbotecnia, 2018), este mineral se genera a partir de materia vegetal que se carboniza por efecto de los sedimentos que generan un aumento de la presión y la temperatura, después de ser sometido a fuertes condiciones y largo periodos geológicos, aumenta la dureza del material y su contenido de carbono, pasando de turba y lignito a carbón bituminoso, para finalmente dar paso a la formación de la antracita por procesos de metamorfosis. Es color negro, brillante, con gran dureza, presenta mayor contenido en carbono, hasta un 95%.

Es un excelente medio de filtración para clarificación del agua en uso potable o industrial, cuando es usada en combinación con arenas filtrantes. Se caracteriza por su elevada pureza, compuesta mayoritariamente de carbono fijo, con mínimas cantidades de materiales volátiles y sustancias no carbonizadas, lo que le confiere una gran estabilidad química. Su resistencia a la alteración química la hace ideal para el uso en filtración, dado que no introduce contaminantes adicionales al agua y mantiene sus propiedades de filtrado en una amplia gama de valores de pH.

Debido a la forma especial de sus granos permite que el material que se encuentra en suspensión sea retenido en la profundidad del lecho filtrante. En comparación con un filtro de arena, este medio filtrante permite un desempeño en el filtro de mayor flujo, menos caída de presión y un mejor y rápido retrolavado. La red de poros permite que el agua fluya entre ellos ofreciendo múltiples puntos de contacto para la intercepción y retención de partículas en suspensión y coloidales. Posee una densidad que es significativamente más baja que la de otros medios filtrantes granulares. Debido a su baja densidad se coloca en las capas superiores para optimizar el flujo y la filtración del agua en los siguientes medios, ya que retiene partículas de mayor tamaño.

Es resistente a la abrasión, su dureza le permite mantener su integridad física bajo las condiciones mecánicas del proceso de filtración, como la presión del agua, el movimiento y la carga de partículas. A diferencia de otros medios filtrantes más blandos, que pueden desgastarse o descomponerse con el tiempo, la antracita tiende a mantener su forma y tamaño de grano. Gracias a



estas características minimiza los efectos de la presión del agua en capas inferiores como la compactación de la arena.



Figura 18.- Antracita. Reproducida de: (Carbotecnia, 2018).

❖ **Arena sílica:** la arena sílica es un compuesto resultante de la combinación de sílice con el oxígeno, su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno, formando una molécula muy estable: SiO_2 .

Esta molécula es insoluble en agua y en la naturaleza se encuentra en forma de cuarzo. Pertenece a la clase de los silicatos y al sistema cristalino trigonal; es muy rico en variedades, los que se pueden agrupar en Macro cristalinas, con cristales bien visibles a simple vista, y Criptocristalinas, formada por cristales microscópicos.

Los usos industriales de la arena sílica derivan de sus importantes propiedades físicas y químicas, destacándose especialmente su dureza, resistencia química, alto punto de fusión, piezoelectricidad, piroelectricidad y transparencia. Las arenas son utilizadas principalmente (Carbotecnia, 2023):

- Como lecho filtrante para depuración y potabilización de las aguas (para la retención de los flósculos de tamaños muy pequeños que no son separados por decantación).
- Por su dureza son utilizados para la fabricación de lejías, abrasivos industriales y arenados.

La arena sílica es un medio filtrante duradero y de bajo mantenimiento, que puede ser utilizado en sistemas de filtración de gravedad o presión. Al ser un producto natural, no sólo es amigable con el medio ambiente, sino que también es altamente efectivo en la eliminación de impurezas, lo que la hace una alternativa económica y eficiente a otros medios filtrantes.





Figura 19.- Arena sílica. Reproducida de: (Carbotecnia, 2023).

- ❖ **Carbón activado:** El carbón activado tiene una estructura altamente porosa, con un amplio rango de tamaños de poros, desde los visibles a simple vista, hasta los de tamaño molecular. Las interacciones moleculares en los poros más pequeños proveen las fuertes fuerzas de adsorción de las moléculas contaminantes sobre el carbón activado. El carbón activado es un efectivo adsorbente porque provee una enorme área superficial a la cual los contaminantes químicos se pueden adherir.

El carbón activado es un material adsorbente que provee una superficie en la cual los iones o moléculas pueden concentrarse. Se usa para remover compuestos de tipo orgánico de fuentes de abastecimiento de agua potable. Es un método muy efectivo para la remoción de olor y color, a veces causados por productos y precursores que se forman durante la etapa de desinfección, también toxinas algales y compuestos orgánicos sintéticos y es parcialmente efectivo para remover algunos compuestos endocrino-disruptores (EDCS), algunos compuestos farmacéuticos y productos del cuidado personal (PPCPs) (CONAGUA, 2015).

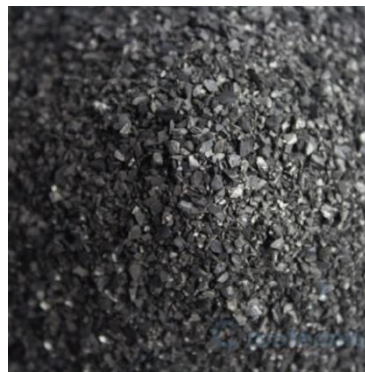


Figura 20.- Carbón activado. Reproducida de: (Carbotecnia, 2020).

- ❖ **Granate:** el granate es un mineral químicamente inerte, no metálico, de alta densidad, alta dureza y sin metales pesados. La resistencia química y abrasiva de Garnet lo convierte en una capa de filtración inferior ideal para sistemas de filtración de agua multicapa de flujo descendente. Su alta densidad proporciona estabilidad dentro de su lecho filtrante (Sicheng, 2010).

Se utiliza en la filtración de agua de múltiples medios y se recomienda como lecho de soporte para otros materiales como la arena.

Ventajas de los medios filtrantes de granate:

- La alta gravedad específica permite diseños de filtros únicos. En combinación con otros medios filtrantes, se pueden lograr tasas de flujo más altas, cargas más altas y una mejor filtración.
- La alta dureza reduce el desgaste y proporciona años de servicio confiable.
- Una excelente cama de soporte para otros medios de alta densidad.



Figura 21.- Granate. Reproducida de: (Sicheng, 2010).

- ❖ **Zeolita:** las zeolitas son minerales porosos de origen volcánica, constituidos de un andamiaje de tetraedros de silicio y aluminio, dispuestos de manera ordenada y unidos por átomos de oxígeno, que son el esqueleto de su estructura cristalina. En los espacios abiertos de ésta cuyo diámetro de poro va desde 3 a 10 ángstroms, se introducen las moléculas de agua sin participar en la cohesión de la red.

Lo más interesante de las zeolitas clinoptilolita es su estructura abierta, que parece una jaula, y la forma en que pueden atrapar otras moléculas en su interior. Así es como las moléculas de agua y los iones de metales alcalinos o alcalinotérreos (átomos cargados positivamente con muy pocos electrones, a veces llamados cationes) se convierten en parte de los cristales de zeolita, aunque no necesariamente permanecen allí permanentemente (Pure Water, 2022).

La zeolita natural puede modificarse mediante un tratamiento único o combinado, como calentamiento y modificación química (ácidos, bases y sales inorgánicas). El tratamiento químico y térmico de la zeolita puede provocar la migración de cationes y, por lo tanto, afectar la ubicación de los cationes y la apertura de los poros.

El agua presente en jaulas y canales de la zeolita contribuye del 10 al 25% a la masa total de las zeolitas. Para permitir el uso eficiente de las zeolitas en el tratamiento del agua, es importante conocer las propiedades de deshidratación y la estabilidad estructural de determinados materiales zeolíticos.

Beneficios de la zeolita natural:

- Reduce un poco la acidez del agua.
- Produce una mayor claridad en el agua filtrada.
- Es el medio filtrante más durable (más de 5 años).
- Solo requiere de un simple retrolavado periódico para mantener su eficiencia y su desempeño.
- Tiene una capacidad de flujo 4 veces superior a la de los medios filtrantes convencionales.
- Tiene una mayor capacidad de retención debido a que posee una mayor área superficial y porosidad.
- Económico
- Elimina la materia orgánica.
- Resistente a la abrasión
- Deshidrata el lodo
- Clasificado como GRAS (generalmente considerado como seguro) para humanos y animales.
- No tóxico y respetuoso con el medio ambiente.
- No contiene aditivos químicos ni colorantes.



Figura 22.- Zeolita. Recuperada de: (Pure Water, 2022).



b. Características granulométricas del material filtrante: los materiales filtrantes deben ser claramente especificados, de manera que no quede duda alguna sobre su granulometría. Los parámetros que se deben emplear para este fin son los siguientes (CONAGUA, 2015):

- **Tamaño efectivo:** en relación con el porcentaje (en peso acumulado) que pasa por las mallas de una serie granulométrica, el tamaño efectivo se refiere al tamaño de granos correspondiente al porcentaje de 10%.
- **Coefficiente de uniformidad (CU):** en relación con el porcentaje (en peso acumulado) que pasa por las mallas de una serie granulométrica, el coeficiente de uniformidad es igual a la relación entre el tamaño de los granos correspondientes a 60% y el tamaño de los granos correspondiente a 10%. Su valor se incrementa a medida que el material granular es menos uniforme.
- **Forma:** la forma de los granos normalmente se evalúa en función del coeficiente de esfericidad (C_e). El coeficiente de esfericidad de una partícula se define como el resultado de la división del área superficial de la esfera de igual volumen a la del grano por el área superficial de la partícula considerada. Como es obvio, este valor resulta igual a la unidad para las partículas esféricas y menor de uno para las irregulares.
- **Tamaño mínimo:** tamaño por debajo del cual no deben encontrarse granos en el medio filtrante.
- **Tamaño máximo:** tamaño por encima del cual no deben encontrarse granos en el medio filtrante.
- **Peso específico (Pe):** el peso específico del material es igual al peso de los granos dividido por el volumen efectivo que ocupa los granos.

c. Espesor de las capas filtrantes: la operación ideal de un filtro es aquella en que la pérdida de carga máxima se produce en el mismo instante en que el efluente presenta la turbiedad límite, conforme se puede observar cualitativamente en la figura 27 que muestra la curva de pérdida de carga y turbidez del efluente en función de la duración de la carrera de filtración y del espesor del medio filtrante, para una determinada tasa de filtración, turbiedad límite fijada, pérdida de carga límite fijada, e invariables las demás características de la suspensión y del medio filtrante.



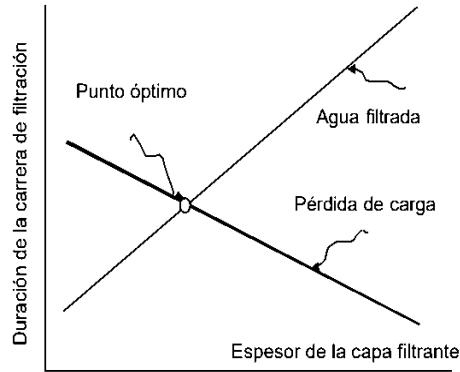


Figura 23.- Punto óptimo de operación en función de la carrera de filtración y espesor de la capa filtrante. (Reproducida). (Maldonado Yactayo, 2005, pág. 103)

▪ Características hidráulicas

Las características hidráulicas que influyen en la eficiencia de la filtración son las siguientes (CONAGUA, 2015):

- a. **Calidad de efluente requerida:** el desempeño de la filtración es monitoreada principalmente mediante mediciones de turbiedad. Se recomienda que se mida al menos cada cuatro horas y que al menos 95 por ciento de las mediciones se encuentren por debajo de 1 NTU.
- b. **Carrera de filtración efectiva:** la duración de la carrera de filtración efectiva establece la frecuencia del retrolavado de filtros y tiene un impacto en la recuperación del agua. Típicamente, el tiempo mínimo de filtración efectiva deseado es de un día.
- c. **Recuperación:** la recuperación es la relación entre la cantidad de agua filtrada neta y la cantidad total de agua procesada a través del filtro. Una parte del agua filtrada a menudo es usada para realizar el retrolavado, por lo tanto, la producción neta de agua filtrada es menor a la cantidad total de agua procesada a través del filtro. Los operadores comúnmente realizan retrolavados excesivos o retrolavan durante mucho tiempo pensando que limpiando el medio filtrante obtendrán carreras de filtración efectiva más largas, sin embargo, resulta contraproducente porque disminuye la recuperación.
- d. **Tasa de filtración:** la tasa de filtración determina el área requerida de filtración, la pérdida de carga con lecho limpio, la velocidad de acumulación de pérdida de carga, la distribución de los sólidos colectados en la cama, la calidad del agua efluente y la duración de la filtración efectiva. Los filtros se diseñan para tratar la capacidad máxima de la planta a la tasa de filtración de diseño con al menos un filtro fuera de servicio para realizar el retrolavado. Una tasa de filtración baja incrementa el costo de inversión debido a que incrementa el área





requerida de filtración, mientras que una tasa elevada incrementa la pérdida de carga y la frecuencia requerida de retrolavado. Por lo tanto, se recomienda utilizar la tasa de filtración más elevada que permita obtener un desempeño del filtro adecuado.

- e. **Carga hidráulica disponible para la filtración:** la carga de filtración es la diferencia entre la pérdida de carga cuando el lecho está limpio y la carga disponible en la estructura. Los diseños de los filtros raramente proveen más de 2 o 3 m de carga disponible a través de la capa de filtración.
- f. **El método de control de los filtros:** el control de flujo es una parte importante en cualquier sistema de filtración. Puede llevarse a cabo de diversas maneras. Todos los sistemas de control de flujo tienen ventajas y desventajas, pero deben cumplir tres objetivos:
 - Control de la tasa de filtración para cada filtro.
 - Distribución del flujo a través de filtros individuales.
 - Controlar el incremento en la pérdida de carga.

Se usan tres métodos básicos para controlar las tasas de filtración y la distribución del flujo:

- Modulación de la válvula de control.
- División del caudal influente.
- Filtrar con tasa declinante.

La carga total disponible en un filtro a gravedad se fija con la elevación de las estructuras de entrada y de salida. Se emplean tres estrategias para controlar el incremento en la pérdida de carga:

- Mantener constante la carga arriba del filtro y variar la carga en el efluente del filtro mediante una válvula de control.
- Mantener la carga constante en el efluente del filtro y variar la carga en la entrada del filtro.
- Mantener constante la pérdida de carga y permitir que la tasa de filtración disminuya conforme se acumulan los sólidos en el lecho filtrante.

Todos los métodos de control tienen ventajas y desventajas, ninguno es claramente superior a los otros.

- g. **Tipo de filtro:** hay muchas maneras de clasificar los filtros, por la presión a la que trabajan; la dirección y velocidad del flujo; el material filtrante; el modo de control o la manera en que se retienen los sólidos (CONAGUA, 2015).

- **Desde el punto de vista de la fuerza que provoca el flujo a través del medio, se pueden clasificar como:**
 - **De gravedad:** cuando el flujo es producido por la fuerza de gravedad y a cielo abierto.





- **A presión:** cuando el flujo es provocado por un equipo de bombeo y en tanques metálicos cerrados.
- **Según la velocidad de filtración (tasa de filtración), pueden ser:**
 - **Lentos:** con tasas de filtración entre 0.08 y 0.3 m³/m² h. Se les llama también biológicos porque fundamentan su operación en la actividad biológica que tiene lugar en la superficie del lecho filtrante.
 - **Rápidos:** con tasas de aplicación de 2 a 15 m³/m² h.
- **Desde el punto de vista del sentido del flujo, los filtros pueden ser:**
 - **Ascendentes:** se introduce agua por medio de los drenes dejando que esta atraviese el lecho y se la recolecta en la parte superior; tienen una excelente remoción bacteriana y facilitan los procesos de limpieza.
 - **Descendentes:** trabajan a gravedad reteniendo las partículas de mayor tamaño en la parte superior y permitiendo que el agua atraviese el lecho filtrante pudiendo generar cavidades que se llenan y unen entre si formados conductos de un tamaño mayor al de los poros circundantes, en los cuales se deposita el material en suspensión, pudiendo incrementar su tamaño hasta atravesar todo el lecho filtrante.
 - **Biflujo u horizontales:** los filtros biflujo combinan un flujo ascendente y descendente en un mismo lecho.
- **Respecto a la manera en que operan, pueden ser de:**
 - **Caudal constante:** cuando éste no varía durante la carrera de filtración (pero sí varía el nivel de agua sobrenadante).
 - **Caudal variable:** con carga constante.
- **De acuerdo a los materiales filtrantes, pueden ser:**
 - **Homogéneos o simples:** cuando sólo están compuestos por un material filtrante.
 - **Duales:** cuando hay dos materiales filtrantes (regularmente arena y antracita).
 - **Múltiples:** cuando cuentan con más de dos tipos de materiales filtrantes.
- **De acuerdo a la manera en que se retienen los sólidos en el medio filtrante, se pueden clasificar como:**
 - **Filtración superficial:** se lleva a cabo sobre un soporte delgado (una membrana, por ejemplo), con la consecuente formación de una capa de espesor creciente (torta) sobre el soporte.





- **Filtración profunda:** la retención de los sólidos se realiza en todo el espesor del medio filtrante, regularmente compuesto de material granular. En el primer caso, la acción física de tamizado es el mecanismo dominante. En la filtración de acción en profundidad son otros los mecanismos responsables de la remoción de las partículas.

1.5.3. Retrolavado de filtro

De acuerdo con (CONAGUA, 2015), el lavado del filtro es la operación en la cual se suspende el proceso de filtración y se inyecta agua por la parte de abajo del filtro (drenes) con una presión adecuada, con el objeto de que el lecho filtrante se expanda, los granos se froten y se desprenda todo el material que se ha quedado retenido entre ellos en la operación de filtrado.

Los filtros se lavan para restablecer su capacidad cuando la calidad del efluente se degrada o cuando la caída de presión a través del filtro alcanza un valor predeterminado. El lavado ocurre a contracorriente con un caudal suficiente para expandir los granos del medio formando una suspensión. El material retenido es transportado por el agua a través del lecho expandido hasta ser descargado al desagüe.

Está demostrado que la colisión entre partículas (abrasión) y las fuerzas hidráulicas cortantes son las causantes del desprendimiento de los sólidos del medio granular. El suministro de aire previo o durante el lavado es una práctica común que tiene como propósito incrementar la colisión entre partículas.

Si se aplica aire, este es introducido por un bajo dren. Si se emplean agitadores mecánicos, estos deben ser accionados antes de que se introduzca el agua. El agua sucia es colectada en una canaleta y mediante una tubería es llevada a un decantador para remover los sólidos (como lodos) y recuperar el agua para el tratamiento. El filtro nuevamente es puesto en servicio y la primera agua que sale debe ser desechada hasta que el filtro madure y recupere su eficiencia de operación

1.6. Desinfección

El agua ha servido como vía de transmisión de diversas enfermedades, sobre todo, relacionadas con el tracto digestivo. Entre ellas se incluye la fiebre tifoidea, parasitosis, disentería, hepatitis infecciosa, cólera, y otras enfermedades parasitarias. Muchos microorganismos causan mal olor y sabor al agua además de producir capas de musgo, cieno y moho en los cuerpos de agua, almacenamiento, instalaciones de tratamiento y conducción (CONAGUA, 2015).



El objetivo de la desinfección del agua es eliminar a los organismos patógenos que se encuentran en ella. Algunos microorganismos dañinos en los sistemas de almacenamiento y distribución de agua pueden ser bacterias, virus, hongos, mohos, algas, protozoarios y helmintos o lombrices parasitarias.

La acción de los desinfectantes se ha pretendido explicar por cuatro mecanismos: daño a la pared celular, alteración de la permeabilidad de las células, alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma, e inhibición de la actividad enzimática. El daño o destrucción de la pared celular da lugar a la lisis celular y a la muerte de la célula.

Todo desinfectante tiene que satisfacer ciertos criterios generales.

- Debe ser capaz de destruir o inactivar, en plazos razonables, los microorganismos cualesquiera que sean su especie y cantidad.
- Debe ser fiable cuando se utilice en las diversas condiciones que probablemente se encuentren en el sistema de tratamiento de aguas residuales.
- Debe ser capaz de mantener una concentración residual en el sistema de distribución final como resguardo contra la recontaminación o el rebrote de microorganismos.
- Debe ser razonablemente seguro y fácil de manejarse y aplicarse.
- La determinación de desinfectante en el agua debe ser sencilla, rápida y apropiada para realizarla en el campo, así como en el laboratorio.
- Tanto el costo del equipo (de su instalación, funcionamiento, mantenimiento y reparación), como el costo de la compra y el manejo de los materiales que se requieren para conseguir una dosificación eficaz y sostenida, deben ser razonables.

Los principales factores que afectan la eficiencia de desinfección son:

- **Tiempo de contacto:** se refiere al tiempo disponible para que el cloro actúe sobre los microorganismos. Este tiempo debe ser de 15 a 30 min.
- **Temperatura:** la destrucción de microorganismos con cloro es mucho más rápida a mayor temperatura. A pesar de esto, el cloro es más estable en agua fría, lo que en la práctica compensa la menor velocidad de desinfección. Así, para lograr la misma acción a 4 °C que a 21 °C, la concentración de cloro residual debe ser el doble.
- **pH:** afecta la acción desinfectante del cloro, particularmente la del cloro residual combinado. De forma general, mientras más alcalina sea el agua se requieren mayores dosis para una misma temperatura y tiempo de contacto. A un pH de 6.5 y una temperatura de 2 °C, 0.3 mg/L de cloro residual combinado causa un efecto letal en 100 por ciento de bacterias. A la misma temperatura y para lograr el mismo efecto, el cloro residual combinado debe aumentarse hasta 0.6 mg/L a pH de 7.0 y hasta 1.2 mg/L a pH de 8.5.



- **Concentración y tipo de bactericida:** la concentración del desinfectante junto con el tiempo de exposición, son los factores más importantes en el efecto bactericida. A mayor concentración mayor es el poder bactericida, aunque se llega a un límite en el cual el efecto bactericida permanece constante, aun cuando se incremente la concentración del agente biocida.

También el efecto bactericida es dependiente de la sustancia empleada; por ejemplo, entre los oxidantes: cloro, bromo y yodo, se observa una relación directa entre efectividad bactericida y potencial de oxidación de la sustancia.

- **Numero de microorganismos:** otro factor a considerar en el proceso de desinfección, es la población de microorganismos. Mientras mayor sea el número de microorganismos a destruir mayor es el tiempo de contacto requerido y/o la concentración del bactericida empleado.
- **Tipo de microorganismos:** algunas bacterias mueren fácilmente en contacto con el agente bactericida; otros son altamente resistentes y requieren de una acción más intensa. Los microorganismos que producen esporas, son especialmente resistentes a la acción bactericida y solo son destruidos por efectos caloríficos, o por una larga e intensa exposición a algún agente físico o químico.
- **Naturaleza del líquido suspendido:** el medio en que se encuentran los microorganismos es factor importante para la efectividad bactericida. En aguas turbias, en presencia de partículas coloidales, la efectividad bactericida disminuye. Esto se debe a que el microorganismo puede cubrirse al encapsularse entre las partículas de material suspendido, evitando así el contacto directo con el agente bactericida, sobreviviendo a su acción.

El proceso de desinfección puede llevarse a cabo por agentes físicos y agentes químicos (López, 2016):

❖ Agentes Físicos

Se caracterizan porque reducen la cantidad de microorganismos patógenos por daño en la pared o membrana celular o alteración de su fisiología ocasionándoles la muerte; los más usados son los siguientes:

- **Calor:** Puede usarse de diferentes formas: calor húmedo o vapor, aire seco y agua caliente; el calor húmedo destruye los microorganismos por coagulación de sus proteínas celulares y el principal método es la esterilización por vapor a presión; por su parte el calor seco es un sistema de esterilización apto para material termorresistente, su acción germicida se produce por difusión del calor y oxidación de los microorganismos presentes. La instalación requerida no es compleja, el inconveniente es la duración del



proceso y la alta temperatura que puede acelera el deterioro del material mientras que el uso del agua caliente no destruye todos los patógenos presentes en el agua y tiene un alto costo de operación al requerir de energía para llevar el agua a 100°C.

- **Rayos UV:** La luz ultravioleta (UV) ha sido utilizada con éxito en aguas de abastecimiento desde hace varias décadas y su desarrollo tecnológico ha avanzado notablemente en los últimos años; sin embargo, su uso en la desinfección de agua residual depurada es limitada, especialmente por su eficiencia baja cuando se utilizan aguas residuales de composición físico-química diferente e incluso variable en función de los vertidos de zona.

La luz ultravioleta se divide en tres tipos: UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280nm) y UV-C (280-100 nm); los tres tipos de UV producen daño directo, la radiación es absorbida por el ADN, formando estructuras que evitan la síntesis normal del ADN, ocasionando la muerte de la célula.

- **Radiación Solar:** esta alternativa es un método natural aplicado para desinfectar el agua usando sólo luz del sol; la radiación solar se conforma por varias franjas o tipos de radiación: ultravioleta (UV), visible e infrarroja. La capacidad germicida de la radiación solar se ha relacionado con fracción ultravioleta de esta. Por su parte, la fracción infrarroja contribuye notablemente a incrementar la temperatura del agua, induciendo condiciones adversas para los microorganismos que pudieran estar presentes en el agua.

❖ Agentes químicos

Existen determinadas sustancias químicas que pueden actuar sobre los microorganismos, con una acción no selectiva sobre las células en las que actúan, conocidas como desinfectantes y antisépticos. El desinfectante se utiliza para el control de microorganismos sobre objetos inanimados que pueden causar enfermedades; remueven parte o la totalidad de ellos. Estos agentes destruyen las formas vegetativas de los microorganismos, pero no necesariamente sus esporas.

No existe en el mercado un desinfectante que cumpla todas estas características; se escoge uno u otro en función del tipo de microorganismos que queremos eliminar, del material sobre el que se apliquen, la temperatura y el pH de trabajo, el tiempo de actuación, y de la presencia de materia orgánica sobre el material a desinfectar.

- **Ozono:** el ozono es un compuesto formado por tres átomos de oxígeno, cuya función más conocida es la de protección frente a la peligrosa radiación ultravioleta del sol; pero también es un potente oxidante y desinfectante con gran variedad de utilidades. La más destacada es la desinfección de aguas. Cuando este gas es inyectado en el agua, puede ejercer su poder oxidante mediante dos mecanismos de acción:
 - Oxidación directa de los compuestos mediante el ozono molecular.





- Oxidación por radicales libres hidroxilos.

Los radicales libres generados en el agua se combinan con las moléculas de ozono, constituyendo uno de los oxidantes más potentes; pero su vida media es de microsegundos.

De los oxidantes más utilizados en el tratamiento de aguas son los radicales libres de hidroxilo y el ozono que tienen el potencial más alto. La oxidación directa de la pared celular de las bacterias con el ozono constituye su principal modo de acción, provocando su rotura y con ello la salida de los constituyentes celulares al exterior. De la misma forma, la producción de radicales hidroxilos con la desintegración del ozono en el agua provoca un efecto similar. Los daños producidos por el ozono sobre los microorganismos no solo se limitan a la oxidación de su pared, también ocasiona la ruptura de enlaces carbono-nitrógeno de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), provocando su despolimerización. Los microorganismos, por tanto, no son capaces de desarrollar inmunidad al ozono como hacen frente a otros compuestos.

El ozono también es efectivo para la eliminación de virus y en general se cree que puede ser más efectivo que el cloro, además de que no se producen sólidos disueltos y no es afectado por el amonio o influenciado por el pH. Por estas razones la ozonización se considera una alternativa viable junto con la cloración y la hipocloración.

- **Permanganato de potasio:** el permanganato de potasio ($KMnO_4$), obtenido a partir del dióxido de manganeso (MnO_2) es utilizado para control de olor y color, mejora el sabor e inactiva a coliformes *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*, poliovirus y bacteriófagos en el tratamiento de agua para consumo. El $KMnO_4$ oxida y destruye enzimas celulares, siendo el ion MnO_4 el responsable de esta acción. Actualmente el permanganato de potasio se emplea en actividades agrícolas para la desinfección del agua superficial; sin embargo, la información científica que demuestra su eficacia como agente desinfectante no es suficiente.
- **Cobre y plata:** metales como la plata, el cobre, el mercurio, el magnesio y el hierro a bajas concentraciones pueden ser potenciales desinfectantes del agua, estos metales inactivan enzimas claves de los microorganismos al reaccionar con los grupos del ácido sulfhídrico. Los iones de plata y cobre son átomos que han perdido un electrón quedando con carga positiva. Los iones se introducen al interior de la célula a través de portadores de metales presentes en la membrana, compitiendo con ellos por los lugares de captación. Actúan interfiriendo en la permeabilidad gaseosa de la membrana (respiración celular) y una vez en el interior de la célula alteran su sistema enzimático, inhibiendo su metabolismo, producción de energía y modificando su material genético, llevando al microorganismo a perder su capacidad de reproducirse y crecer

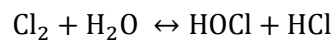


- **Halógenos:** los halógenos en particular el yodo y el cloro, son agentes antimicrobianos eficaces, tanto solos como parte de compuestos inorgánicos u orgánicos. El yodo (I_2) es uno de los antisépticos más antiguos y más efectivos; actúa contra toda clase de bacterias y contra muchas endosporas, diversos hongos y algunos virus. El yodo altera la síntesis proteica y de membranas celulares, por la formación de complejos con los aminoácidos y los ácidos grasos insaturados.

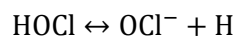
En todo el mundo, el mecanismo de desinfección más aplicado en los sistemas de tratamiento del agua residual es el del cloro y sus derivados. Fue introducido masivamente a principios del siglo XX y constituyó una revolución tecnológica, que complementó el proceso de filtración ya conocido y utilizado para el tratamiento del agua.

El cloro es un gas tóxico de olor penetrante más pesado que el aire y no combustible ni explosivo, su poder desinfectante radica en la capacidad de oxidación, destruyendo la célula tras provocar la rotura de la pared celular; en general, puede decirse que las reacciones redox del cloro con las sustancias inorgánicas son muy rápidas, mientras que la oxidación de la materia orgánica suele ser más lenta, llegando en ocasiones a necesitar varias horas para que se produzca la oxidación total de algunos compuestos.

El cloro es un oxidante fuerte que se suministra en forma gaseosa o como soluciones de hipoclorito de sodio o de calcio y reacciona con el agua para formar ácido clorhídrico (HCl) y ácido hipocloroso (HOCl), este último es el principal agente desinfectante como se muestra en la ecuación:



La reacción se lleva a cabo en segundos; el ácido hipocloroso se ioniza en forma instantánea en hidrogeno e ion hipoclorito según la ecuación:



La suma de estas dos formas (HOCl y OCl^-) constituye lo que llamamos cloro libre o residual. El cloro reacciona con numerosos compuestos minerales (hierro, magnesio, nitrógeno amoniacal, nitritos, bromuros, yoduros, sulfuros y cianuros), así como con materia orgánica presente en las aguas (sustancias húmicas).

Se deja siempre una cantidad excedente de cloro (cloro residual) para tener capacidad desinfectante. Para ello es conveniente rebasar el punto de quiebre; en la figura 24 se presenta la evolución del cloro residual y el punto de quiebre; a medida que se agrega el cloro las sustancias oxidantes y la materia orgánica reaccionan con el cloro y lo reducen en gran parte a iones de cloro (punto A), después de alcanzar esta demanda, el cloro continúa reaccionando con el amonio para formar cloraminas (puntos A y B); entre el punto B y el punto de quiebre, algunas cloraminas son convertidas a tricloruro de



nitrogeno (N_3O) y el cloro es reducido a ion cloro finalmente después del punto y con una continua adición de cloro habrá un aumento directamente proporcional en el cloro libre disponible.

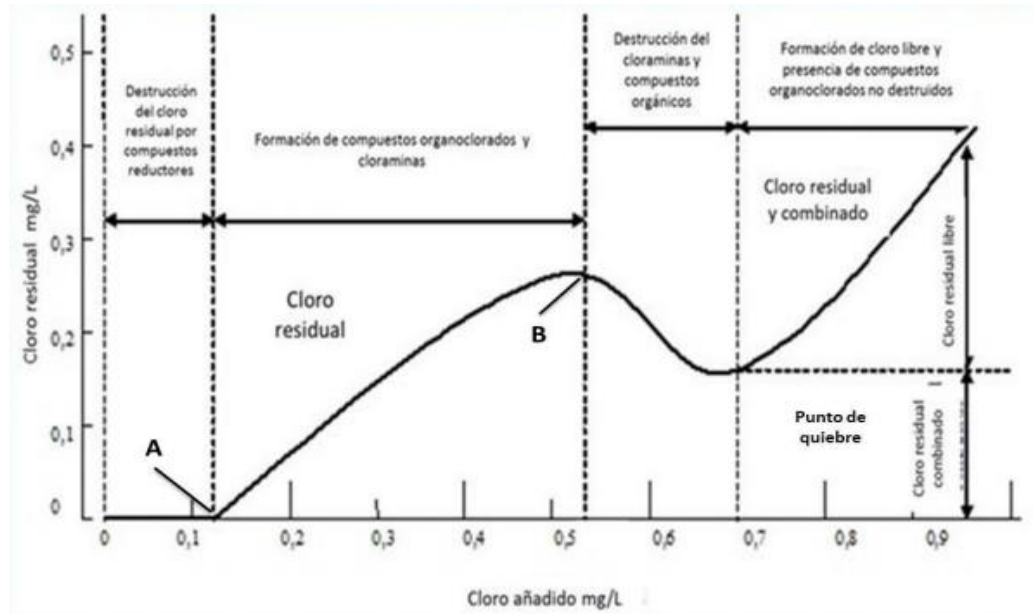


Figura 24.- Cinética de evolución del cloro y punto de quiebre. Reproducida de: (López, 2016, pág. 12)

1.7. Normas Oficiales Mexicanas

En México, como en otros países, las leyes y reglamentos existentes en materia de agua potable confieren atribuciones y funciones a diversas dependencias gubernamentales, ya sea como encargados de la prestación de este servicio o bien de su vigilancia. Estos ordenamientos jurídicos enmarcan los lineamientos requeridos en forma clara y precisa hasta converger en la acción concreta de asegurar y certificar la calidad del agua para uso y consumo humano (CONAGUA, 2015).

En la misma legislación se indican los puntos en los cuales convergen la federación, los estados y los municipios. También se establecen las atribuciones y alcances de las entidades federativas, así como las obligaciones que tiene cada uno de los involucrados en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano en calidad y cantidad adecuadas (IMTA, 2007)

Principales normativas que regulan los sistemas de abastecimiento y distribución de agua potable:





- **NOM-117-SSA1-1994:** Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.
- **NOM-127-SSA1-2021:** Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
- **NOM-179-SSA1-2020:** Agua para uso y consumo humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua.
- **NOM-201-SSA1-2015:** Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias.
- **NOM-230-SSA1-2002:** Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- **NOM-244-SSA1-2020:** Para evaluar la eficiencia en reducción bacteriana en equipos y sustancias germicidas para tratamiento doméstico de agua. Requisitos sanitarios.
- **NOM-245-SSA1-2010:** Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas.



Procedimiento y descripción de las actividades realizadas

➤ Procedimiento para el muestreo

Para llevar a cabo el muestreo se tomaron en cuenta los puntos que establece la NORMA Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.

▪ Materiales, reactivos y equipo de muestreo

1. Envases para toma de muestra.

- Para análisis microbiológico: frascos de vidrio con tapón esmerilado, frascos estériles desechables o bolsas estériles con cierre hermético y capacidad de 125 o 250 mL.
- Para análisis de metales: envase y tapa de plástico, adicionados de 1 mL de ácido nítrico concentrado por cada 100 mL de muestra.
- Para análisis de plaguicidas: envase de vidrio color ámbar o transparente cubierto de papel aluminio.

El material del envase, así como el volumen de muestra requerido y el método de preservación para determinación de los diferentes parámetros, deben ser señalados en la tabla del anexo 1.

2. Termómetro que permita mediciones en un intervalo de -1 a 50 °C con graduación de 1 °C.
3. Potenciómetro portátil o comparador visual para determinación de pH.
4. Colorímetro portátil o comparador visual para determinación de cloro residual.
5. Hilera con tapa.
6. Bolsas refrigerantes o bolsas con hielo cerradas.
7. Agua destilada o desionizada.
8. Solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 100 mg/L.
9. Gasas o torundas de algodón, estériles.
10. Equipos muestreadores comerciales.

▪ Preparación de envases para toma de muestra

Los recipientes para la toma de muestras, deberán ser proporcionados con la hoja de cadena de custodia por el laboratorio responsables del análisis, para análisis microbiológico o físico y químico, ya que deberá ser lavado y con la preparación adecuada para el análisis general o particular de los parámetros seleccionados.

a. Para análisis microbiológico.

- i. Esterilización de frascos para muestras de agua sin cloro libre residual: deben esterilizarse frascos de muestreo en estufa a 170 °C, por un tiempo mínimo de 60





- min. o autoclave a 120 °C durante 15 min. antes de esta esterilización debe cubrirse el tapón del frasco con papel resistente a ésta, en forma de capuchón.
- ii. Esterilización de frascos para muestras de agua con cloro residual libre: previo a la esterilización, agregar 0.1 mL de tiosulfato de sodio al 3% por cada 120 mL de capacidad de los mismos. A continuación, proceder como se indica en el punto i.
 - iii. La colecta de muestras con alto contenido de metales, incluyendo cobre zinc (mayor a 1.0 mg/L) los frascos para muestreo deben contener 0.3 mL de solución de sal sódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) al 15% (ajustar el pH de la solución a 6.5 antes de su uso) en frasco de 120 mL de capacidad adicionar por separado al frasco de muestreo antes de la esterilización o combinarse con la solución de tiosulfato de sodio antes de la adición.
- b. Para análisis físicos, químicos y radiactivos, de acuerdo a los parámetros a determinar, considerar lo especificado en la tabla del anexo 1.
- **Procedimiento para toma de muestra**
- a. Para análisis microbiológicos.
 1. En bomba de mano o grifo o válvula: el agua de los grifos o válvula debe provenir directamente del sistema de distribución. No debe efectuarse toma de muestra en grifos o válvulas que presenten fugas entre el tambor y el cuello, ya que el agua puede correr por la parte exterior del grifo o válvulas y contaminar la muestra.
 - i. Deben removerse los accesorios o aditamentos externos como mangueras, boquillas y filtros de plástico o hule antes de tomar la muestra.
 - ii. Si la limpieza del grifo o válvulas seleccionado es dudosa elegir otro grifo o válvula. Si se requiere tomar la muestra en el grifo o válvulas de dudosa limpieza por propósitos especiales del muestreo, debe limpiarse el orificio de salida con una gasa estéril o torunda de algodón impregnada de solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 100 mg/L. Adicionalmente cuando el material y las condiciones del punto de salida lo permitan se podrá calentar a flama directa y posteriormente limpiarse con alcohol.
 - iii. Debe dejarse correr el agua aproximadamente 3 min. hasta asegurarse que el agua que contenían las tuberías ha sido renovada o que la temperatura del agua sea estabilizada antes de tomar la muestra. Reducir el volumen de flujo para permitir el llenado de frasco sin salpicaduras.
 - iv. Colocarse guantes y cubrebocas.
 - v. Cerca del orificio de salida, en caso de frascos de vidrio con tapón esmerilado y protegidos con papel, deben quitarse simultáneamente el tapón del frasco y el papel de protección, manejándolos como unidad, evitando que se contaminen el tapón, el papel de protección, o el cuello de frasco. Para lo anterior es necesario sostener el tapón o tapa con esmeril o rosca hacia abajo; en caso de





frascos estériles desechables desprender y eliminar el sello de seguridad y mantener la tapa con la rosca hacia abajo; para el caso de uso de bolsas estériles desprender y eliminar el sello de seguridad de la bolsa.

- vi. Proceder a tomar la muestra sin pérdida de tiempo y sin enjugar el frasco; se debe dejar el espacio libre requerido para la agitación de la muestra previa al análisis (aproximadamente 10% de volumen del frasco). Efectuada la toma de muestra, deben colocarse el tapón con el papel de protección o la tapa al frasco; en el caso de las bolsas proceder al cerrado hermético.
2. En captación de un cuerpo de agua superficial o tanque de almacenamiento.
 - i. Deben lavarse las manos y antebrazos con agua y jabón, y colocarse guantes y cubrebocas.
 - ii. En el caso de frascos de vidrio con tapón esmerilado quitar únicamente el papel de protección evitando que se contamine, y en el caso de frascos y bolsas estériles desechables, desprender el sello de seguridad.
 - iii. Sumergir el frasco en el agua con el cuello hacia abajo hasta una profundidad de 15 a 30 cm, destapar y a continuación girar el frasco ligeramente permitiendo el llenado (en todos los casos debe evitarse tomar la muestra de la capa superficial o del fondo, donde puede haber nata o sedimentos y en el caso de captación en cuerpos de agua superficiales, no vedan tomarse muestras muy próximas a la orilla o muy distantes del punto de extracción); si existe corriente en el cuerpo de agua, la toma de muestra debe efectuarse con la boca del frasco a contracorriente. Efectuada la toma de muestra debe colocarse el tapón o tapa, sacar el frasco del agua y colocar el papel de protección en su caso. Para el caso en el que se utilice bolsa, sumergirla a la profundidad arriba indicada. Tomar la muestra y cerrar la bolsa bajo del agua, posteriormente sellar ésta fuera del agua.

En el caso de tanques de almacenamiento, si no es posible la toma de muestra como se indica en este punto, debe procederse como se menciona en el numeral 4.

3. En pozo profundo.
 - i. Si el pozo cuenta con grifo o válvula para toma de muestra, debe procederse como se indica en el numeral 1.
 - ii. Si el pozo no cuenta con grifo o válvula para toma de muestra, debe abrirse la válvula de una tubería de desfogue, dejarse correr el agua por un mínimo de 3 min. y a continuación se procede como en el punto iv y v del numeral 1.
4. En pozo somero o fuente similar.





- i. Cuando no es posible tomar la muestra con la extensión del brazo, debe atarse al frasco un sobrepeso usando el extremo de un cordel limpio, o en su caso equipo muestreador comercial.
 - ii. Deben quitarse simultáneamente el tapón y el papel de protección, de acuerdo a lo estipulado en el punto v del numeral 1.
 - iii. Proceder a tomar la muestra, bajando el frasco dentro del pozo hasta una profundidad de 15 a 30 cm, evitando que el frasco toque las paredes del pozo.
 - iv. Efectuada la toma de muestra, deben colocarse la tapa o el tapón con el papel de protección al frasco, o en su caso sellar la bolsa.
5. En grifo o válvula de muestreo o boca de manguera de distribución de cisterna de vehículo.
- i. Si la toma de muestra se efectúa en grifo, válvula de descarga o boca de la manguera, proceder como se indica en el numeral 1.
- b. Para análisis físico, químico y radiactivo.
El volumen de muestra debe tomarse como se indica en la tabla del anexo 1.
6. En bomba de mano o grifo o válvula del sistema de distribución o pozo profundo.
- i. Debe dejarse correr el agua aproximadamente por 3 min. o hasta que la temperatura de la muestra sea estable antes de la toma o hasta asegurarse que el agua contenida en la línea ha sido renovada.
 - ii. El muestreo debe realizarse cuidadosamente, evitando que se contaminen el tapón, boca e interior del envase; se requiere tomar un poco del agua que se va a analizar, se cierra el envase y agitar fuertemente para enjuagar, desechando esa agua; se efectúa esta operación dos o tres veces, procediendo enseguida a la toma de muestra.
7. En captaciones de agua superficial, tanque de almacenamiento, pozo somero o fuente similar, debe manejarse el envase siguiendo las indicaciones comprendidas en el punto i y iii del numeral 2.
- **Manejo de muestras**
- I. Las muestras tomadas deben colocarse en hielera con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo cerradas para su transporte al laboratorio, a una temperatura entre 4 y 10 °C, cuidando de no congelar las muestras. El hielo utilizado debe cumplir con las especificaciones establecidas en la NOM-201-SSA1-2002 Productos y Servicios. Agua y hielo para consumo humano preenvasados y a granel. Especificaciones sanitarias.
 - II. El periodo máximo que debe transcurrir entre la toma de muestra y el inicio del análisis es:





- Para análisis microbiológico en óptimas condiciones de preservación y transporte hasta 6 horas.
- Para análisis físicos, químicos y radiactivos el periodo depende de la preservación empleada para cada parámetro como se indica en la tabla del anexo 1.

▪ **Identificación y control de muestras**

- Para la identificación de las muestras deben etiquetarse los frascos y envases con la siguiente información:
 - ✓ Número de control para identificar la muestra, independientemente del número de registro del laboratorio.
 - ✓ Fecha y hora de muestreo.
- Para el control de la muestra debe llevarse un registro en formato establecido previamente con los datos anotados en la etiqueta del frasco o envase, así como la siguiente información:
 - ✓ Identificación del punto o sitio de muestreo.
 - ✓ Temperatura del agua.
 - ✓ pH.
 - ✓ Cloro residual libre.
 - ✓ Tipo de análisis a efectuar.
 - ✓ En su caso, reactivo empleado para la preservación.
 - ✓ Observaciones relativas a la toma de muestra, en su caso, de preferencia en situaciones de muestras especiales provenientes de alguna contingencia o evento ocasional.
 - ✓ Nombre de la persona que realizó el muestreo.

▪ **Selección de puntos de muestreo**

La selección de puntos de muestreo debe considerarse para cada sistema de abastecimiento en particular. Sin embargo, existen criterios que deben tomarse en cuenta para ello. Estos criterios son:

- Los puntos de muestreo deben ser representativos de las diferentes fuentes de agua que abastecen el sistema.
- Debe haber una distribución uniforme de los puntos de muestreo a lo largo del sistema y, en su caso, considerar los lugares más susceptibles de contaminación:
 - Puntos muertos.
 - Zonas de baja presión.
 - Zonas con antecedentes de problemas de contaminación.
 - Zonas con fugas frecuentes.
 - Zonas densamente pobladas y con alcantarillado insuficiente.





- Tanques de almacenamiento abiertos y carentes de protección, y
- Zonas periféricas del sistema más alejadas de las instalaciones de tratamiento.
- Los puntos se localizarán dependiendo del tipo de sistemas de distribución y en proporción al número de ramales.
- Debe haber como mínimo un punto de muestreo inmediatamente a la salida de las plantas de tratamiento, en su caso.





➤ **Análisis fisicoquímicos**

▪ **Determinación de pH y cloro libre o residual**

Para la determinación de pH y cloro libre o residual en el agua, se emplea un kit comparador visual que tiene dos tablas colorimétricas impresas para la medición de estos parámetros. Cumple con los valores obligatorios de 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0 (mg/L o ppm) para cloro libre o residual y 6.5, 6.8, 7.0, 7.2, 7.6, 8.2 y 8.5 para pH requeridos en la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano.

El procedimiento consiste en:

1. Enjuagar el comparador con la muestra a analizar 3 veces, esto para remover posibles residuos que tenga.
2. Llenar las celdas del comparador con la muestra a analizar, hasta las marcas señaladas.
3. Agregan 3 gotas de rojo de fenol como indicador para medir pH y una pastilla de dietil-p-fenilendiamina (DPD 1) para medir el cloro libre o residual.
4. Colocar la tapa del comparador y agitar para disolver la pastilla de DPD 1 y mezclar el rojo de fenol.
5. Medir los valores obtenidos comparando el color resultante con el de la tira de referencia del colorímetro, es recomendable colocar el comparador a contra luz o en un fondo blanco para poder visualizar fácilmente los valores.

▪ **Determinación de temperatura**

El procedimiento para medir la temperatura en una muestra consiste en:

1. Enjuagar con agua destilada la superficie del termómetro.
2. Sumergir el termómetro en posición centrada en el recipiente que contiene la muestra, hasta la marca de inmersión parcial o hasta una graduación apropiada.
3. Aplicar ligeros movimientos circulares por lo menos durante 1 minuto hasta que la lectura del termómetro se estabilice (si la temperatura de la muestra difiere en más de ± 5 °C de la del ambiente, repetir el muestreo).
4. Registrar la lectura que se obtienen directamente del termómetro.
5. Realizar por triplicado las operaciones del punto 1 al 4.
6. Calcular el promedio de las tres lecturas. Los resultados obtenidos se expresan redondeando al entero y en grados Celsius (°C).

▪ **Determinación de olor**

La determinación de olor se lleva a cabo al momento de tomar la muestra, pues el analista debe reportar el olor que percibe de esta, si es inodora, presenta olor a sulfuro de hidrógeno, o a cloro.



▪ **Determinación de color**

Para poder determinar el color que presenta la muestra a analizar se realiza el siguiente procedimiento:

1. Encender el espectrofotómetro HACH modelo DR/2010 oprimiendo la tecla “E/S”.
2. Ingresar el número de programa almacenado 120.
3. Ajustar el espectrofotómetro con el control de longitud de onda a 455 nm.
4. Llenar dos celdas con 25 ml, en una de ellas se colocará la muestra y en la otra agua destilada la cual es utilizada como blanco.
5. Limpiar la superficie de las celdas con una gasa para eliminar manchas y así evitar lecturas erróneas.
6. Colocar la celda con el blanco en el portaceldas y cubrir con la cubierta; presionar la tecla “ZERO” para poner en cero el aparato con la solución de referencia antes de medir la muestra.
7. Colocar la celda con la muestra en el portaceldas y cubrir con la cubierta, presionar la tecla “READ” para iniciar la lectura de la medición.
8. Registrar los valores obtenidos en unidades de Pt-Co

▪ **Determinación de turbiedad**

Para determinar la turbiedad presente en la muestra a analizar se realiza el siguiente procedimiento:

1. Encender el espectrofotómetro HACH modelo DR/2010 oprimiendo la tecla “E/S”.
2. Ingresar el número de programa almacenado 750.
3. Ajustar el espectrofotómetro con el control de longitud de onda a 860 nm.
4. Llenar dos celdas con 25 ml, en una de ellas se colocará la muestra y en la otra agua destilada la cual es utilizada como blanco.
5. Limpiar la superficie de las celdas con una gasa para eliminar manchas y así evitar lecturas erróneas.
6. Colocar la celda con el blanco en el portaceldas y cubrir con la cubierta; presionar la tecla “ZERO” para poner en cero el aparato con la solución de referencia antes de medir la muestra.
7. Colocar la celda con la muestra en el portaceldas y cubrir con la cubierta, presionar la tecla “READ” para iniciar la lectura de la medición.
8. Registrar los valores obtenidos en unidades nefelométricas (UNT).

▪ **Determinación de dureza**

Este método emplea como indicador el compuesto químico denominado negro de eriocromo T, el cual al ser agregado a una disolución que contenga iones calcio y magnesio, reacciona formando complejos de un color vino. Después se adiciona la



disolución de EDTA que remueve los iones calcio y magnesio de los complejos coloridos formando complejos solubles. Cuando ha sido agregada suficiente disolución EDTA, para liberar todos los iones calcio y magnesio, el indicador regresa a su color azul original.

Para determinar la dureza en el agua se requiere:

- Disolución amortiguadora
 - Disolver 1.179 gr de la sal disódica dihidratada de EDTA y 780 mg de sulfato de magnesio ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) o 644 mg de cloruro de magnesio ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) en 50 mL de agua.
 - Agregar esta disolución a 16.9 gr de cloruro de amonio (NH_4Cl) en 143 mL de hidróxido de amonio (NH_4OH), mezclar y diluir a 250 mL con agua.

La disolución amortiguadora también puede prepararse de la siguiente manera:

- Disolver 16.9 gr de cloruro de amonio (NH_4Cl) en 143 mL de hidróxido de amonio (NH_4OH), adicionar 1.25 g de EDTA sal di-magnésica (disponible comercialmente) y disolver en 250 mL de agua.
- Guardar la disolución amortiguadora en un recipiente de vidrio resistente, o de plástico perfectamente tapado, por no más de 1 mes. Desechar en cuanto en la porción de muestra utilizada no produzca un pH de 10 ± 0.1 .

También puede utilizarse la disolución amortiguadora disponible comercialmente, la cual contiene la sal di-magnésica de EDTA que no presenta olor.

- Indicador
 - Mezclar 0.5 gr de eriocromo negro T, sal sódica del ácido 1-hidroxi-2-naftilazo-5-nitro-2-naftol-4-sulfónico y 100 gr de NaCl, evitando el contacto con el aire. En caso de que el punto final de la titulación no se distinga, es necesario obtener nueva mezcla indicadora.

Puede utilizarse el indicador de calmagita en lugar del indicador de eriocromo negro T, para lo cual se requiere:

- Disolver 0.10 gr de calmagita (1-(1-hidroxi-4-metil-2-fenilazo)-2-naftol-4 ácido sulfónico) en 100 mL de agua destilada, utilíc 1 mL por 50 mL de solución a titular, ajustando el volumen si es necesario. Esta disolución es estable.

También se puede encontrar disponible comercialmente la mezcla de los indicadores de eriocromo negro T y calmagita en forma de polvo y mezclados con una sal inerte.





- Disolución patrón titulante de EDTA 0.01 M
 - Pesar 3.723 gr de la sal disódica del ácido etilen diamino tetraacético, ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_8\text{N}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), disolver en agua reactivo y diluir a 1 litro.
 - Verificar su concentración titulando contra disolución de carbonato de calcio patrón.
 - Almacenar en recipiente de polietileno (preferentemente) o vidrio borosilicato.
- Disolución patrón de CaCO_3 .
 - Pesar 1.0 gr de carbonato de calcio anhidro con una pureza mayor a 99.95%, colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 500mL.
 - Colocar un embudo en el cuello del matraz y agregar poco a poco disolución de HCl 1+1, hasta que todo el carbonato sea disuelto.
 - Agregar 200mL de agua destilada y hervir durante algunos minutos para desalojar el CO_2 , enfriar y agregar unas gotas de disolución indicadora de rojo de metilo, ajustar al color anaranjado, agregando unas gotas de disolución de $\text{NH}_4\text{OH} \cdot 3\text{N}$ o disolución de HCl 1+1 si se requiere.
 - Transferir a un matraz volumétrico de 1 L y llevar al volumen con agua destilada. La disolución patrón es equivalente a 1.000 mg de CaCO_3 por cada mL.
- Valoración de la disolución de EDTA.
 1. En matraces Erlenmeyer de 250 mL, tomar 10 mL de la disolución patrón de carbonato de calcio, y diluir a 50 mL con agua. Realizar por triplicado.
 2. En matraces Erlenmeyer de 250 mL, preparar por triplicado blancos con 50 mL de agua destilada.
 3. A patrones y blancos, agregar de 1 a 2 mL de la disolución amortiguadora o la cantidad necesaria para que las disoluciones alcancen un pH de 10.0 ± 0.01 . Posteriormente adicionar 1 a 2 gotas de disolución indicadora o una cantidad apropiada de la formula en polvo (mezcla de indicadores).
 4. Titular los patrones y blancos con la disolución de EDTA 0.01 M hasta el vire de violeta a azul.

Calcular el factor F con la fórmula siguiente:

$$F = \frac{\text{mg de CaCO}_3 \text{ en 10 mL de patrón titulado}}{\text{gasto mL disol. EDTA en patrón} - \text{gasto mL disol. EDTA en blanco}}$$

- Procedimiento analítico
 - Parte I
 1. Medir una alícuota de 50 mL de muestra, transferir a matraces Erlenmeyer de 250 mL, preparar las muestras por triplicado.



2. Adicionar 1 mL de disolución amortiguadora y agitar. Si es necesario, agregar más disolución amortiguadora hasta alcanzar un pH de 10. La titulación debe efectuarse a un pH específico de 10.0 ± 0.1 . Verificar y registrar la lectura de pH.
3. Adicionar 1 a 2 gotas de disolución indicadora o una cantidad apropiada de la fórmula en polvo (mezcla de indicadores), de tal manera que se perciba el vire característico de color violeta a color azul. Si la muestra da inmediatamente un color azul, significa que no tiene dureza.
4. Titular la muestra agregando gota a gota la disolución titulante de EDTA, agitando continuamente hasta el punto final en que se produce el cambio de color rojo vino a azul.

Los mL gastados de disolución de EDTA deben ser menores a 15 mL en caso contrario diluir la muestra. En caso de que no se aprecie el vire, será necesario usar indicador recién hecho y/o agregar inhibidor y/o aplicar digestión, de acuerdo a la supuesta interferencia presente. Puede ser necesario seguir procesos de eliminación de interferencias de acuerdo a lo indicado anteriormente.

▪ Parte II

1. Preparar una muestra fortificada en la misma proporción que la muestra, agregar 2.5 mL de la disolución patrón y seguir el mismo procedimiento que en el punto anterior.
2. Calcular el % de recobro.

➤ Análisis de datos y cálculos

Calcular la dureza total utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Dureza total} = \frac{\text{mg de CaCO}_3}{L} = \frac{(A - B)(F)(1000)}{50 \text{ mL de muestra}}$$

En donde:

- A: mL de disolución de EDTA empleados en la titulación de la muestra.
- B: mL de disolución de EDTA empleados en la titulación del blanco, cuando se utiliza alícuota de muestra llevada a 50 mL con agua reactivo.
- F: equivalente a mg de CaCO_3 por mL de disolución de EDTA, obtenido en la valoración.

La expresión de resultados debe ser en $\frac{\text{mg de CaCO}_3}{L}$ y con dos cifras decimales.





▪ **Determinación de hierro (Fe)**

Para analizar la cantidad de hierro presente en una muestra de agua se realiza el siguiente procedimiento:

1. Encender el espectrofotómetro HACH modelo DR/2010 oprimiendo la tecla “E/S”.
2. Ingresar el número de programa almacenado 265.
3. Ajustar el espectrofotómetro con el control de longitud de onda a 510 nm.
4. Insertar el elevador de celdas.
9. Llenar dos celdas con 10 ml del agua a analizar, una de ellas será la muestra y la otra será utilizada como blanco.
5. Agregar a la celda con la muestra un sobre de “FerroVer Hierro Reactivo”; e inmediatamente cubrir la parte superior de la celda con parafilm y agitar vigorosamente hasta disolver el reactivo.
6. Limpiar la superficie de las celdas con una gasa para eliminar manchas y así evitar lecturas erróneas.
7. Presionar la tecla “SHIFT” y “TIMER” y espera 3 minutos.
8. Colocar la celda con el blanco en el portaceldas y cubrir con la cubierta; presionar la tecla “ZERO” para poner en cero el aparato con la solución de referencia antes de medir la muestra.
9. Colocar la celda con la muestra en el portaceldas y cubrir con la cubierta pasando los 3 minutos de espera, presionar la tecla “READ” para iniciar la lectura de la medición.
10. Registrar los datos en mg/L de hierro (Fe).

▪ **Determinación de manganeso (Mn)**

Para analizar la cantidad de manganeso presente en una muestra de agua se realiza el siguiente procedimiento:

1. Encender el espectrofotómetro HACH modelo DR/2010 oprimiendo la tecla “E/S”.
2. Ingresar el número de programa almacenado 295.
3. Ajustar el espectrofotómetro con el control de longitud de onda a 525 nm.
4. Insertar el elevador de celdas.
5. Llenar dos celdas con 10 ml del agua a analizar, una de ellas será la muestra y la otra será utilizada como blanco.
6. Agregar a la celda con la muestra un sobre de “Tipo de citrato Buffer en polvo” y un sobre de “Periodato de sodio”; e inmediatamente cubrir parte superior de la celda con parafilm y agitar vigorosamente hasta disolver el reactivo.
7. Presionar la tecla “SHIFT” y “TIMER” y espera 2 minutos.
8. Colocar la celda con el blanco en el portaceldas y cubrir con la cubierta; presionar la tecla “ZERO” para poner en cero el aparato con la solución de referencia antes de medir la muestra.



- Colocar la celda con la muestra en el portaceldas y cubrir con la cubierta pasando los 2 minutos de espera, presionar la tecla “READ” para iniciar la lectura de la medición.
- Registrar los datos en mg/L de hierro (Fe).

▪ **Determinación de nitrógeno de nitritos (N-NO₂⁻)**

Para analizar la cantidad de nitritos presentes en una muestra de agua se realiza el siguiente procedimiento:

- Encender el espectrofotómetro HACH DR/2010 oprimiendo la tecla “E/S”.
- Ingresar el número de programa almacenado 371.
- Ajustar el espectrofotómetro con el control de longitud de onda a 507 nm.
- Insertar el elevador de celdas.
- Llenar dos celdas con 10 ml del agua a analizar, una de ellas será la muestra y la otra será utilizada como blanco.
- Agregar a la celda con la muestra un sobre de “NitriVer 3 Reactivo Nitrito”; e inmediatamente cubrir parte superior de la celda con parafilm y agitar vigorosamente hasta disolver el reactivo.
- Presionar la tecla “SHIFT” y “TIMER” y espera 20 minutos.
- Colocar la celda con el blanco en el portaceldas y cubrir con la cubierta; presionar la tecla “ZERO” para poner en cero el aparato con la solución de referencia antes de medir la muestra.
- Colocar la celda con la muestra en el portaceldas y cubrir con la cubierta pasando los 20 minutos de espera, presionar la tecla “READ” para iniciar la lectura de la medición.
- Registrar los datos en mg/L de nitrógeno de nitritos (N-NO₂⁻).

▪ **Determinación de sólidos disueltos totales**

El método utilizado para la determinación de sólidos disueltos totales en agua para uso y consumo humano es el siguiente:

➤ **Parte I: Preparación del disco de filtro de fibra de vidrio.**

- Insertar el disco en el aparato de filtración.
- Aplicar vacío y lavar con tres volúmenes sucesivos de agua reactivo de 20 mL, permitir el drenaje completo entre lavados y continuar la succión durante 3 minutos más.

Nota: si se utilizan discos prelavados omitir este paso.



- **Paso 2: Preparación del plato o cápsula de evaporación.**
 - Secar el plato o cápsula a $180 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (a 103 a 105 $^\circ\text{C}$) durante 1 hora en una estufa.
 - Enfriar en el desecador el tiempo necesario. Pesar inmediatamente antes de usar.
- **Paso 3: Selección de los tamaños del filtro y de la muestra.**
 - Elegir el volumen de la muestra para obtener entre 2.5 y 200 mg de residuo seco, generalmente se cumple con 100 mL de muestra. Si se requieren más de 10 minutos para completar la filtración, aumentar el tamaño del filtro o disminuir el volumen de la muestra.

Procedimiento analítico

1. Agitar la muestra con un agitador magnético y pipetear un volumen medido sobre un filtro de fibra de vidrio previamente lavado, con vacío aplicado hacia un recipiente limpio de tamaño adecuado al volumen de las muestras y los lavados.
2. Lavar con tres volúmenes sucesivos de 10ml de agua de grado reactivo, lo que permite el drenaje completo entre lavados, y continuar la succión durante unos 3 minutos después de que la filtración se ha completado.
3. Transferir el filtrado total con lavados a un plato o cápsula de evaporación previamente pesado y preparado como se indicó anteriormente, evaporar a sequedad en un baño de vapor o en una estufa de secado.
4. Cuando el tamaño de la porción de la muestra es mayor que la capacidad de la l plato o cápsula de evaporación, agregaras las porciones de muestra sucesivas al mismo plato después de secar el filtrado anterior.
5. Secar la muestra evaporada durante al menos 1 hora en una estufa a $180 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (o 103 a 105 $^\circ\text{C}$), enfriar en un desecador y pesar.
6. Repetir el ciclo de secado, enfriamiento, desecación y pesaje hasta que se obtenga un peso constante con una diferencia de 2 mg.
7. Analizar muestras por duplicado.
8. Las determinaciones duplicadas deben coincidir en un $\pm 5 \%$ de su peso promedio.

Para calcular la concentración de sólidos disueltos totales utilizando la siguiente fórmula:

$$mg \text{ de solido disueltos totales/L} = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{volumen de la muestra en mL}}$$

En donde:

- A: peso del residuo seco + peso del plato o cápsula vacía, mg
- B: peso de plato o cápsula vacía, mg.

➤ Elaboración del filtro prototipo

Para la elaboración del filtro prototipo, se tomó en cuenta las dimensiones reales del filtro de la planta potabilizadora “San Antonio”. El prototipo se elaboró con una escala de 1:20 para tener una perspectiva parecida a la realidad.

Materiales

- 1 caja de plástico de 26 L, de 55 x 35 x 19 cm.
- 1 placa de unicel de 100 x 50 de 2 cm de grosor
- 1 bote de silicón líquido
- 2 metros de papel contact
- 1 carpeta de plástico transparente
- 1 tijera
- 1 cúter
- 2 plastiLokas
- 1 metro de tubo CPVC de ½ pulgada
- 3 conexiones tipo T de CPVC de ½ pulgada
- 1 segueta
- 1 metro y medio de manguera de nivel de ½ pulgada
- 1 bomba de agua sumergible
- 1 garrafón de plástico con capacidad de 20 L.

Procedimiento de la elaboración del filtro prototipo

1. Se cortaron dos placas de unicel con medidas de 28.25 x 25 cm, y una 32.5 x 25 cm, dichas placas de unicel serán las paredes del filtro prototipo.
2. De la carpeta de plástico, se recortaron dos tiras con medidas de 26.25 x 2 cm y una de 32.5 x 2 cm, posteriormente se doblaron por la mitad a lo largo, se cortaron las esquinas en diagonal y se pegaron en la parte inferior de cada una de las placas de unicel, esto con la finalidad de que sirvieran como pestañas para mejorar la adherencia a la caja de plástico.
3. Se pegaron cada una de las placas de unicel a la caja de plástico.
4. Se forraron con papel contact las placas de unicel para que estas tuvieran mayor resistencia al agua y no presenten fugas.
5. Con ayuda de la segueta se cortaron 3 tubos de CPVC de 3.5 cm, 2 tubos de 25 cm y uno de 5 cm, dejando 1 cm en cada uno de los extremos de los tubos para las conexiones tipo T.
6. A los 3 tubos de 3.5 cm y los 2 tubos de 25 cm se les hicieron orificios a los laterales, de 0.25 cm de diámetro y con 5 cm de separación entre cada uno. Se colocaron las conexiones tipo T y con PlastiLoka se taparon los extremos de cada tubo.



7. Con ayuda de cables, se ataron los tubos de CPVC para que se pudieran sostenerse en el filtro.
8. Se hizo un orificio en la parte central inferior de la caja y se colocó el tubo de CPVC de 5 cm. Con PlastiLoka se selló alrededor del tubo para evitar fugas.
9. Se hizo un bajo dren de unicel de 32 x 25.5 cm al cual se le hicieron orificios para la circulación del agua.
10. Se hizo un orificio en la parte superior del galón de plástico de 20 L, para poder introducir la bomba de agua sumergible, que con ayuda de la manguera de nivel alimentaria la entrada del filtro.

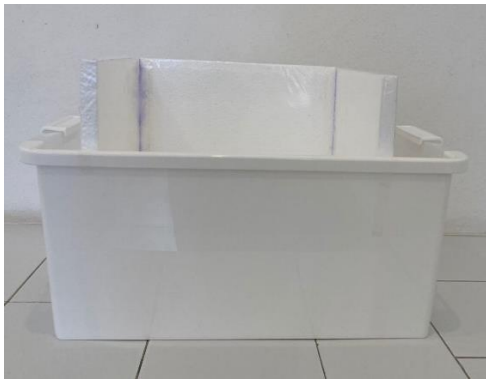


Figura 25.- Vista frontal del filtro prototipo. Elaboración propia



Figura 26.- Vista superior y lateral del filtro prototipo. Elaboración propia.



Figura 27.- Bajo dren para dar soporte al medio filtrante. Elaboración propia.



Figura 28.- Tuberías de CPVC para distribución del agua. Elaboración propia.

Preparación del medio filtrante

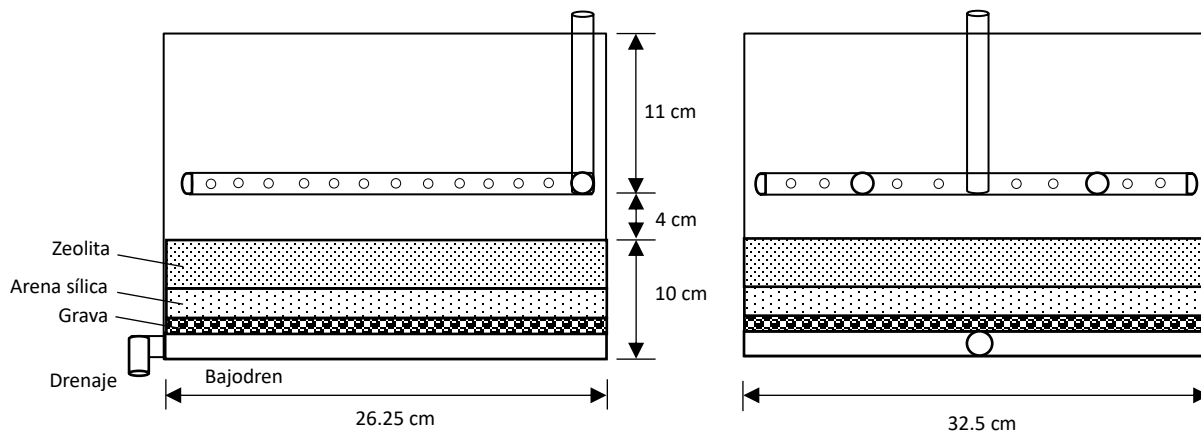
Para el montaje del lecho filtrante en el filtro prototipo se consideró el informe (IMTA, Estudios para el mejoramiento del sistema de agua potable y saneamiento de la ciudad de Oaxaca, 2005). Primeramente, se consideró utilizar grava cribada de $\frac{3}{4}$ " como medio de drenaje, permitiendo que el agua fluya sin obstáculos mientras atrapa partículas más grandes y sedimentos. El lecho de grava tuvo un espesor de 1.5 cm.

Además, se utilizó arena sílica, la cual es excelente material para para la retención de los flóculos de tamaños muy pequeños que no son separados por decantación. La arena sílica

fue cribada con tamices de abertura de malla de 1.8 a 0.8 mm, el espesor de este lecho fue de 1.5 cm.

Por último, se utilizó zeolita que generalmente se utiliza para la remoción de la dureza por intercambio iónico, además, la remoción del hierro y el manganeso es un efecto secundario en el proceso de la sedimentación, debido a la selectividad de la resina donde el hierro y el manganeso tienen que competir desfavorablemente con los iones del calcio y los otros iones de mayor valencia, presentes en el agua de las fuentes de abastecimiento. Dicha zeolita también fue cribada, con tamices de abertura de malla de 0.8 a 0.6 mm. El espesor de este lecho fue de 4 cm.

Antes de colocar cada lecho en el filtro prototipo, se lavaron para eliminar las impurezas retenidas, posteriormente se puso a secar y luego se colocaron en el orden como se muestra en la figura 29.



Lecho filtrante zeolita: 4 cm

Lecho filtrante arena sílica: 2.5 cm

Lecho soporte grava: 1.5 cm

Figura 29.- Diagrama del filtro prototipo de arena sílica y zeolita. Elaboración propia.



Figura 30.- Tamices utilizados para cribar los lechos filtrantes (arena sílica y zeolita). Elaboración propia



Figura 31.- Lecho soporte de grava y lecho de arena sílica. Elaboración propia.



Figura 32.- Lecho de zeolita y vista frontal del filtro prototipo. Elaboración propia.

Resultados de las actividades realizadas

➤ Análisis fisicoquímicos

Se llevó a cabo el análisis fisicoquímico de la calidad del agua de los pozos 19-1 y 20, los cuales están situados en el bosque “El Tequio”, en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. Dichos pozos se encargan de suministrar agua a la planta potabilizadora “San Antonio”. El monitoreo se realizó el 07/09/2023 a las 8:30 hrs, y posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio para ser analizadas el mismo día.



Figura 33.- Pozo 19-1. Elaboración propia.



Figura 34.- Pozo 20. Elaboración propia.

También se analizó la calidad del agua de entrada a la planta potabilizadora “San Antonio”, ubicada en el municipio de San Antonio de la Cal, Oaxaca. El monitoreo se realizó el 11/09/2023 a las 9:20 hrs., y posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio para ser analizadas el mismo día.



Figura 35.- Toma de muestra de agua a la entrada de la planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”.
 Elaboración propia

Los parámetros fisicoquímicos que se midieron fueron: temperatura, olor, color, turbiedad, pH, sólidos disueltos totales, dureza, nitritos y manganeso; con base en la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Los resultados obtenidos de los análisis realizados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.- Resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a los pozos 19-1 y 20, y a la entrada de la PTAP "San Antonio".
Elaboración propia.

| Parámetro | Unidad | Pozo 19-1 | Pozo 20 | PTAP "San Antonio" | NOM-127-SSA1-2021 (Límites permisibles) |
|---|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|--|
| Temperatura | °C | 26 | 26 | 26 | - |
| Olor | | ácido sulfúrico | ácido sulfúrico | ácido sulfúrico | - |
| Turbiedad | UNT | 3 | 8 | 9 | 4.0 |
| Color | UC | 15 | 21.5 | 49 | 15.0 |
| pH | Unidades de pH | 7.2 | 6.5 | 6.5 | 6.5 - 8.5 |
| Sólidos disueltos totales | mg/L | 592 | 1,600 | 1,576 | 1,000.00 |
| Dureza total como CaCO ₃ | mg/L | 396.08 | 541.70 | 238.81 | 500.00 |
| Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂ ⁻) | mg/L | 0.001 | 0.004 | 0.0116 | 0.50 |
| Manganeso | mg/L | 1.4 | 1.7 | 1.8 | 0.15 |
| Hierro | mg/L | ** | ** | ** | 0.3 |

| | |
|----|--|
| ** | No se contaba con reactivo para la determinación de hierro. |
| - | No se contempla en la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, pero se reporta. |
| | Excede los límites permisibles de la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. |



➤ **Prueba de jarras**

Se realizaron pruebas de jarras, con la finalidad de variar las dosis de polímero y coagulante en cada una de las jarras ocupadas, favoreciendo la reducción de los coloides en suspensión y materia orgánica; de esta manera se simula el proceso unitario de coagulación, floculación y sedimentación, permitiendo así, determinar la dosis óptima con la que se obtiene mejor calidad de agua posible.

Las condiciones iniciales que presentaba el agua de entrada a la planta potabilizadora “San Antonio” fueron:

- Turbiedad: 9 UNT
- Color: 49 UC
- pH: 6.5



Figura 36.- Apariencia de las jarras antes de suministrar floculante y coagulante. Elaboración propia.

En la primera prueba de jarras se empleó una solución de sulfato de aluminio al 10% y una solución de polímero al 1%. Fecha de realización: 12/09/2023. Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.- Resultados obtenidos de la prueba de jarra con sulfato de aluminio y polímero. Elaboración propia.

| Jarra | Sulfato de aluminio | | Polímero (Floc-1185-C) | | Turbiedad (UNT) | | | Color (UC) | | | pH | | |
|-------|---------------------|-----------|------------------------|----------|-----------------|----------|----------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | ppm | ml | ppm | ml | 30 min | 60 min | 120 min | 30 min | 60 min | 120 min | 30 min | 60 min | 120 min |
| 1 | 1 | 1 | 5 | 5 | 4 | 2 | 2 | 31 | 13 | 11 | 6.8 | 7.0 | 7.2 |
| 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 53 | 22 | 15 | 6.5 | 7.2 | 7.2 |
| 3 | 10 | 10 | 5 | 5 | 7 | 3 | 1 | 72 | 20 | 16 | 6.5 | 7.2 | 7.2 |
| 4 | 15 | 15 | 5 | 5 | 11 | 3 | 1 | 83 | 19 | 10 | 6.8 | 7.2 | 7.2 |
| 5 | 20 | 20 | 5 | 5 | 15 | 3 | 2 | 97 | 30 | 22 | 6.8 | 7.2 | 7.6 |

La jarra optima fue la #4; después de dos horas, la turbidez se redujo un 88.89% y el color un 79.6%, el pH tuvo un aumento a 7.2.



Figura 37.- Apariencia de las jarras con sulfato de aluminio y polímero después de 2 horas. Elaboración propia.

Para la segunda prueba de jarras se empleó una solución de hidróxido de calcio al 10% y una solución de polímero al 1%. Fecha de realización: 12/09/2023. Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5.- Resultados obtenidos de la prueba de jarra con hidróxido de calcio y polímero. Elaboración propia

| Jarra | Hidróxido de calcio | | Polímero (Floc-1185-C) | | Turbiedad (UNT) | | | Color (UC) | | | pH | | |
|----------|---------------------|----------|------------------------|----------|-----------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|------------|------------|
| | ppm | ml | ppm | ml | 30 min | 60 min | 120 min | 30 min | 60 min | 120 min | 30 min | 60 min | 120 min |
| 1 | 1 | 1 | 5 | 5 | 2 | 0 | 0 | 37 | 5 | 9 | 6.8 | 7.2 | 7.2 |
| 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 0 | 25 | 7 | 4 | 6.8 | 7.2 | 7.2 |
| 3 | 10 | 10 | 5 | 5 | 0 | 2 | 5 | 6 | 7 | 17 | 7.2 | 7.2 | 7.6 |
| 4 | 15 | 15 | 5 | 5 | 3 | 13 | 11 | 7 | 17 | 18 | 7.2 | 7.6 | 7.6 |
| 5 | 20 | 20 | 5 | 5 | 6 | 11 | 12 | 19 | 22 | 20 | 7.2 | 7.6 | 7.6 |

La jarra optima fue la #2; después de dos horas, la turbidez se redujo un 100 % y el color un 91.8 %, el pH tuvo un aumento a 7.2.



Figura 38.- Apariencia de las jarras con hidróxido de calcio y polímero después de 2 horas. Elaboración propia.

Se realizó una última prueba de jarras, pero en esta ocasión se utilizó hipoclorito de sodio como tratamiento de pre-oxidación, combinado con hidróxido de calcio y el polímero. Esta prueba se hizo debido a que, de acuerdo con los análisis fisicoquímicos realizados, se demostró que las concentraciones de algunos metales como el manganeso y el hierro son muy altas. De esta manera se determinó la concentración óptima con la que se logra reducir la mayor concentración de dichos metales y no altera el color, la turbiedad y el pH. La fecha de realización fue el 19/09/2023.

Las condiciones iniciales que presentaba el agua de entrada a la planta potabilizadora “San Antonio” fueron:

- Color: 45 UC
- Turbiedad: 8 UNT
- pH: 6.5
- Mn: 1.5 mg/L
- Fe: 1.4 mg/L

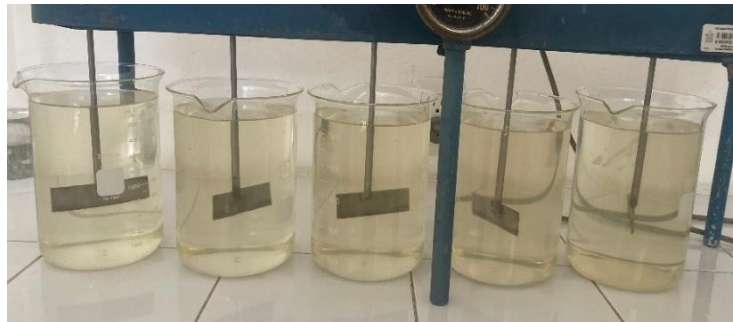


Figura 39.- Apariencia de las jarras antes de suministrar floculante, coagulante y desinfectante. Elaboración propia.

Para la prueba de jarras se empleó una solución de hipoclorito de sodio al 1%, una solución de hidróxido de calcio al 10% y una solución de polímero al 1%. Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos se muestran en la tabla 6.

La jarra óptima fue la #1; después de una hora, la turbidez se redujo un 87.5%, el color un 82.2%, el manganeso un 6.67% y el hierro un 81.42%; el pH tuvo un aumento a 7.0 y el cloro residual fue de 0.2.

Tabla 6.- Resultados obtenidos de la prueba de jarra con hipoclorito de sodio, hidróxido de calcio y polímero. Elaboración propia.

| Jarra | Hidróxido de calcio | | Polímero (Floc-1185-C) | | Hipoclorito de sodio | | pH | | Cloro residual | | Turbiedad (UNT) | Color (UC) | Fe mg/L | Mn mg/L |
|-------|---------------------|----|------------------------|----|----------------------|-----|--------|--------|----------------|--------|-----------------|------------|---------|---------|
| | ppm | ml | ppm | ml | ppm | ml | 60 min | 60 min | 30 min | 60 min | 60 min | 60 min | 60 min | 60 min |
| 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0.5 | 7.0 | 7.0 | 0.2 | 0.2 | 1 | 8 | 0.26 | 1.4 |
| 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 1 | 7.0 | 7.0 | 0.2 | 0.0 | 3 | 9 | 0.19 | 1.2 |
| 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 50 | 5 | 7.2 | 7.0 | 2.0 | 1.0 | 0 | 11 | 0.12 | 1.0 |
| 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 100 | 10 | 7.2 | 7.2 | 1.0 | 1.0 | 4.6 | 87 | 0.06 | 0.8 |
| 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 150 | 15 | 7.6 | 7.6 | 3.0 | 3.0 | 4 | 182 | 0.03 | 0.7 |



Figura 40.- Apariencia de las jarras con hidróxido de calcio, polímero e hipoclorito de sodio después de 30 minutos. Elaboración propia.

➤ **Eficiencia de la PTAP “San Antonio”**

Se llevó a cabo un análisis de eficiencia de la planta “San Antonio”, para lo cual se tomaron muestras en cada una de las etapas del proceso de potabilización. El monitoreo se realizó el 03/10/2023 a las 9:30 hrs. y posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio para ser analizadas el mismo día.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.- Resultados de los análisis fisicoquímicos de la eficiencia de la PTAP “San Antonio”. Elaboración propia.

| Parámetro | Unidad | Sitio de muestreo | | | | | NOM-127-SSA1-2021 (Límites permisibles) |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|---------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| | | Influyente | Floculación | Efluente de sedimentación | Efluente de filtración | Tanque de almacenamiento | |
| Temperatura | °C | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | - |
| pH | Unidades de pH | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 – 8.5 |
| Cl ₂ | UNT | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 – 1.5 |
| Color | UC | 30 | 57 | 33 | 27 | 40 | 15.0 |
| Turbiedad | Unidades de pH | 23 | 13 | 12 | 11 | 25 | 4.0 |
| Sólidos disueltos totales | mg/L | 1,523 | 1,489 | 1,477 | 1,396 | 1,200 | 1,000.00 |
| Dureza total como CaCO ₃ | mg/L | 485.4 | 520.34 | 489.28 | 477.63 | 477.63 | 500.00 |
| Manganeso | mg/L | 1.9 | 1.3 | 1.2 | 1.6 | 1.4 | 0.15 |
| Hierro | mg/L | ** | ** | ** | ** | ** | 0.3 |

| | |
|----|--|
| ** | No se contaba con reactivo para la determinación de hierro. |
| - | No se contempla en la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, pero se reporta. |
| | Excede los límites permisibles de la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. |

➤ **Análisis de eficiencia de propuesta de filtro**

Una vez armado el filtro prototipo con el material filtrante propuesto, se procedió a realizar un tratamiento al agua cruda que es suministrada a la PTAP “San Antonio” con la dosis óptima de hipoclorito de sodio como tratamiento de pre-oxidación y la dosis óptima de hidróxido de calcio y polímero como tratamiento de floculación y coagulación. De esta manera se simuló el proceso de potabilización que debería tener la PTAP “San Antonio”.

Posteriormente, después de 1 hora, el agua sedimentada fue decantada al garrafón de 20 litros y luego fue bombeada al filtro prototipo.

Se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos del agua cruda a la entrada de la PTAP “San Antonio”, al agua que se trató y al agua a la salida del filtro prototipo, de esta manera se evaluó la eficiencia que el material filtrante propuesto tuvo con la finalidad de cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.

Tabla 8.- Resultados de los análisis fisicoquímicos de la eficiencia del filtro prototipo con el medio filtrante propuesto. Elaboración propia.

| Parámetro | Unidad | Agua cruda de entrada a la PTAP “San Antonio” | Agua con tratamiento | Agua a la salida del filtro propuesto | | | NOM-127-SSA1-2021 (Límites permisibles) |
|-------------------------------------|----------------|---|----------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|---|
| | | | | Primera corrida | Segunda corrida | Tercera corrida | |
| Temperatura | °C | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | - |
| Olor | | ácido sulfúrico | Ligero a cloro | inodoro | inodoro | inodoro | - |
| Turbiedad | UNT | 7 | 2 | 1.6 | 0 | 0 | 4.0 |
| Color | UC | 55 | 14 | 8 | 7.3 | 7.2 | 15.0 |
| pH | Unidades de pH | 6.5 | 7.0 | 7.6 | 7.2 | 7.2 | 6.5 - 8.5 |
| Cloro | mg/L | 0.0 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 – 1.5 |
| Sólidos disueltos totales | mg/L | 1702 | | | | | 1,000.00 |
| Dureza total como CaCO ₃ | mg/L | 512.58 | 489.28 | 432.97 | 411.61 | 403.85 | 500.00 |



| | | | | | | | |
|---|------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------|
| Nitrógeno de nitritos (N-NO ₂ ⁻) | mg/L | 0.007 | 0.004 | 0.083 | 0.071 | 0.071 | 0.50 |
| Manganeso | mg/L | 1.4 | 1.33 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.15 |
| Hierro | mg/L | 1.26 | 0.14 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.3 |

| | |
|---|--|
| - | No se contempla en la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, pero se reporta. |
| | Excede los límites permisibles de la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. |



Figura 41.- Apariencia del agua cruda que se suministra a la PTAP "San Antonio". Elaboración propia.



Figura 42.- Apariencia del agua tratada con hipoclorito de sodio, hidróxido de calcio y polímero. Después de una hora se aprecia el sedimento formado en el fondo de los vasos de precipitado. Elaboración propia.



Figura 43.- Después de que los sólidos disueltos sedimentaran, se decantó el agua en el garrafón de 20 L. para luego ser bombeada al filtro prototipo. Elaboración propia.

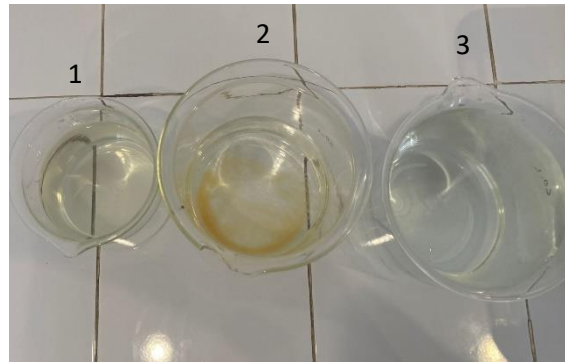


Figura 44.- 1) Apariencia del agua cruda que es suministrada a la PTAP "San Antonio"; 2) apariencia del agua que recibió un tratamiento con hipoclorito de sodio, hidróxido de calcio y polímero; 3) apariencia del agua a la salida del filtro prototipo con arena sílica y zeolita como material filtrante. Elaboración propia.



Figura 45.- Evidencia de los análisis fisicoquímicas realizados en el laboratorio y prueba del filtro prototipo. Elaboración propia.

Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis fisicoquímicos realizados en la prueba de eficiencia del filtro prototipo propuesto se llegó a la conclusión que el agua cruda que abastece a la planta de tratamiento de agua potable “San Antonio” debe recibir un tratamiento de pre-oxidación con hipoclorito de sodio para reducir las altas concentraciones de manganeso y de hierro, además de que se debe utilizar hidróxido de calcio y polímero, como tratamiento químico de floculación y coagulación ya que se obtuvo mejor calidad de agua al agregar estos reactivos.

De esta manera, los parámetros fisicoquímicos del agua mejoraron significativamente; es ahí donde intervino la propuesta de arena sílica y zeolita natural como nuevo material filtrante para la planta de tratamiento de agua potable “San Antonio”, pues con ayuda del filtro prototipo a escala laboratorio se pudieron realizar pruebas para analizar la efectividad que estos tienen.

De acuerdo con los análisis realizados a la eficiencia del filtro prototipo, se logró determinar que la turbiedad, el color, los sólidos disueltos totales, la dureza y el hierro redujeron hasta cumplir con los límites permisibles de la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. A excepción del manganeso pues este se redujo un 64.28% y aun excede el límite permisible.





Competencias desarrolladas y/o aplicadas

En la elaboración de este proyecto de residencia se aplicaron y reafirmaron conocimientos adquiridos durante la carrera de ingeniería química, dentro de los conocimientos relacionados con la materia de tratamiento de efluentes industriales en el tema del proceso y funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua potable, además de las normatividades vigentes y parámetros de control que se deben tener. También conocimientos relacionaos con química analítica en las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos.



Anexo 1

Tabla 1. Preservación de muestras

| DETERMINACION | MATERIAL DE ENVASE | VOLUMEN MINIMO (mL) | PRESERVACION | TIEMPO MAXIMO DE ALMACENAMIENTO |
|--|--------------------|---------------------|---|--|
| Cianuros | p. v | 1000 | Adicionar NaOH a pH>12; refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 24 horas |
| Cloro residual | p. v | 50 | Analizar inmediatamente | |
| Cloruros | p. v | 200 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 48 horas |
| Color | p. v | 500 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 48 horas |
| Dureza total | p. v | 100 | Adicionar HNO3 o H2SO4 a pH<2 (*) | 14 días |
| Fenoles | p. v PTFE | 500 | Adicionar H2SO4 a pH<2 y refrigerar de 4 a 10°C | Analizar tan pronto sea posible |
| Fluoruros | P | 500 | Refrigerar de 4 a 10°C | 28 días |
| Hidrocarburos aromáticos (BTEX) | S | 25 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 7 días |
| Metales en general | p. v (A) | 1000 | Adicionar 1 mL de ácido nítrico concentrado por cada 100 mL de muestra. | 180 días Sólo para la determinación de mercurio almacenar por un máximo de 4 semanas |
| Nitratos | p. v | 100 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 48 horas |
| Nitritos | p. v | 100 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | |
| Nitrógeno amoniacal | p. v | 500 | Adicionar H2SO4 a pH<2 y refrigerar de 4 a 10°C | 7 días |
| Olor | V | 500 | Analizar tan pronto como sea posible. Refrigerar | 6 hrs. |
| pH | p. v | 50 | Analizar inmediatamente | |
| Plaguicidas | s | 1000 | Refrigerar de 4 a 10°C. | 7 días Extraídos los plaguicidas con solventes el tiempo de almacenamiento máximo será de 40 días |
| Radiactividad alfa global | p.v | 1000 | Adicionar HCl o HNO3 a pH <2. | 180 días |
| Radiactividad beta global | p.v | 1000 | Adicionar HCl o HNO3 a pH <2. | 180 días |
| Sólidos | p. v | 200 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 7 días |
| Sodio | p. v | 100 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 18 días |
| Sulfatos | p. v | 100 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 28 días |
| Sustancias Activas al Azul de Metileno | p. v | 250 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 48 horas |
| Temperatura | p. v | | Determinar inmediatamente | |
| Trihalometanos | S | 25 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 7 días |
| Turbiedad | p. v | 100 | Refrigerar de 4 a 10°C y en la oscuridad | 24 horas |
| Yodo | v (ámbar) | 50 | Analizar inmediatamente | |

*Omitir la preservación en caso de que la muestra se analice inmediatamente.

p - plástico

p(A) enjuagado con HNO₃ 1+1

pH - potencial de hidrógeno

s - vidrio enjuagado con solventes orgánicos; interior de la tapa del envase recubierta con teflón

v - vidrio

v(A) - enjuagado con HNO₃ 1+1

PTFE - tapa de politetrafluoroetileno

BTEX - benceno, tolueno, etilbenceno, xileno

Fuentes de información

- Abascal, L. P. (Febrero de 2013). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/289973388.pdf>
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: McGRAW-HILL.
- Barrera Díaz, C. E. (11 de Febrero de 2014). Obtenido de http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/52617/Barrera+D%EDaz_trip+a+2014.pdf?sequence=1
- Carbotecnia. (28 de Diciembre de 2018). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/producto/antracita/>
- Carbotecnia. (12 de Diciembre de 2020). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/>
- Carbotecnia. (09 de Febrero de 2023). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/medios-filtrantes-para-liquidos/>
- Carbotecnia. (23 de Febrero de 2023). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/producto/medio-arena-silica-para-filtros-de-agua/>
- Carbotecnia*. (04 de Enero de 2002). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/producto/medio-garnet-filtros-de-lecho-profundo/>
- Cisneros, B. E. (2007). *Información y calidad del agua en México*. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- CONAGUA. (2015). *Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada*. México.
- CONAGUA. (2015). *Evaluación rápida de plantas potabilizadoras*. México.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México, 2018*. Ciudad de México, México: CONAGUA-SEMARNAT.
- Damián Martínez, Y. (08 de Enero de 2020). *UNCP*. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5610/T010_45819869_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Díaz, C. E. (2014). Obtenido de http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/52617/Barrera+D%EDaz_trip+a+2014.pdf?sequence=1





- González Villarreal, F. J., Domínguez Mares, M., Cruz Palma, K., & Arriaga Medina, J. A. (2011). *Identificación de estudios y proyectos del sector hídrico: Oaxaca, Puebla y Tlaxcala 2005-2011*. México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- IMTA. (2005). *Estudios para el mejoramiento del sistema de agua potable y saneamiento de la ciudad de Oaxaca*. Oaxaca de Juárez, Oaxaca: SEMARNAT.
- IMTA. (2007). *Curso diseño de plantas potabilizadoras*. Morelos.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca, 2017*. México: INEGI.
- López, M. G. (Diciembre de 2016). *IPN*. Obtenido de <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/23350/1/Tesis%20Gpe%20Reyes%20.pdf>
- Maldonado Yactayo, V. (12 de Enero de 2005). Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/nueve.pdf>
- Martínez Cruz, A. (Noviembre de 2017). Obtenido de <http://132.248.9.195/ptd2017/octubre/0766872/0766872.pdf>
- Oliva Uc, J., Giacoman Vallejos, G., & Pérez Cortés, M. (2007). Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. *Ingeniería*, 12(2), 17-29.
- Pure Water. (28 de Marzo de 2022). Obtenido de <https://purewater.com.co/product/purikor-zeolita-mineral-para-sistemas-de-tratamiento-de-agua-y-filtracion-en-piscinas/#:~:text=Es%20una%20zeolita%20Clinoptilolita%20modificada,por%20%C3%A1tomos%20de%20ox%C3%ADgeno%20compartidos>.
- Sicheng. (2010). Obtenido de <https://es.gritgarnet.com/producto/granate-medio-filtrante/>
- SOAPA. (12 de Septiembre de 2020). *Gobierno del Estado de Oaxaca*. Obtenido de <https://www.oaxaca.gob.mx/soapa/resena-historica/>.

