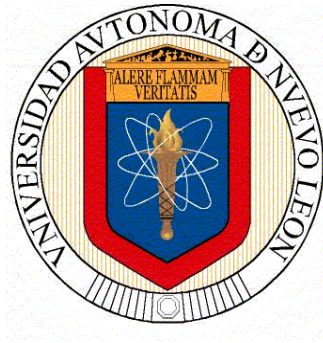


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**REMOCIÓN DE FLUORUROS EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO  
MEDIANTE CARBÓN ACTIVADO DE HUESO (BONE CHAR) PARA EL  
CUMPLIMIENTO DE LA NOM-127-SSA1-2021**

**PRESENTADA POR**

**CARLOS ORNELAS OROZCO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ENERO 2026**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**REMOCIÓN DE FLUORUROS EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO  
MEDIANTE CARBÓN ACTIVADO DE HUESO (BONE CHAR) PARA EL  
CUMPLIMIENTO DE LA NOM-127-SSA1-2021**

Autor: Carlos Ornelas Orozco

Asesor: Dr. Jimmy Loaiza Navia

San Nicolás de los Garza, Nuevo León

Enero de 2026

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi esposa e hijos todo el apoyo moral para lograr este objetivo tan importante en mi vida profesional.

Agradezco a mis padres todo el respaldo que me brindaron durante mis estudios de maestría, que fue una etapa de crecimiento personal.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a todos los profesores que compartieron conmigo, generosamente sus conocimientos durante el estudio de la maestría así como durante la preparación del presente trabajo.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1. Introducción general**

El agua es el recurso natural más importante para la sociedad en términos de salud y desarrollo económico. Sin embargo, su calidad está destinada a verse afectada por una multitud de factores tanto naturales como provocados por el hombre, lo que dificultaría su suministro y la haría impura.

Los fluoruros ( $F^-$ ), entre los elementos que ocurren naturalmente en las aguas subterráneas, como la fluorita ( $CaF_2$ ), la criolita ( $Na_3AlF_6$ ) o la apatita, son un problema de salud pública significativo, particularmente en áreas geológicamente diversas dotadas de formaciones geológicas de minerales de fluoruro. Estos minerales se disuelven, liberando fluoruro en el agua y elevando sus niveles a niveles excesivos en alimentos y bebidas humanas.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el agua potable contenga 1.5 mg/L de fluoruro como punto base de su nivel guía, sabiendo que el aumento de las concentraciones causa fluorosis dental y, cuando se consume durante períodos prolongados, fluorosis del esqueleto óseo.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, publicada en mayo de 2022 en el Diario Oficial de la Federación de México, mantiene este valor como el máximo permisible y establece un proceso gradual de cumplimiento más estricto (1.0 mg/L) dependiendo de la población y el plazo de implementación.

Este conjunto de regulaciones requiere que las empresas operadoras, las instalaciones de salud y las comunidades implementen medios efectivos y duraderos para la eliminación de fluoruros de los sistemas de distribución de agua.

Dentro de este marco, la defluoración, es decir, la eliminación o reducción de fluoruro, ha marcado una tendencia en el país, particularmente en las tierras altas mexicanas, como San Luis Potosí, Durango, Guanajuato, Zacatecas, Chihuahua y Aguascalientes, donde se han reportado concentraciones naturales de fluoruro superiores a 2.0 mg/L en pozos de suministro.

La exposición prolongada a estos niveles es perjudicial para la salud humana, principalmente para la población pediátrica. Estudios epidemiológicos en México también indican que las tasas de prevalencia de fluorosis dental superan el 80% en poblaciones con concentraciones  $>3.0$  mg/L y, en casos más graves, cambios óseos progresivos graduales, como se encuentra en otras poblaciones.

La búsqueda de enfoques eficientes y respetuosos con el medio ambiente para cumplir con la NOM-127-SSA1-2021 ha impulsado estudios de procesos fisicoquímicos y adsorbentes naturales o sintéticos.

De estos, el carbón de hueso (BC, por sus siglas en inglés) ha aparecido como una tecnología prometedora para la defluoración del agua potable porque el BC es un material biogénico, es relativamente económico de producir, es un adsorbente de alta densidad y tiene potencial regenerativo. Este material, que incluye hidroxiapatita  $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$  y carbono amorfo, presenta buena selectividad para el fluoruro a través de mecanismos de intercambio iónico (sustitución  $\text{OH}^-/\text{F}^-$ ) y precipitación superficial de fluoroapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ). Este proceso operativo puede reducir las concentraciones de  $\text{F}^-$  contenidas en el agua a los valores permisibles, cuando se ajustan las condiciones de operación y el pH de  $\text{F}^-$ .

El carbón de hueso también se puede preparar a partir de residuos óseos animales (principalmente bovinos o porcinos) para obtener carbón de hueso a través de un proceso de carbonización controlada entre 500 y 700 °C, promoviendo así también la economía circular, con residuos agroindustriales explotados y un material adsorbente de bajo impacto ambiental producido.

Su efecto, basado en varios factores, incluyendo la temperatura y el tiempo de pirólisis, el pH del modo operativo, la concentración inicial de fluoruro, aniones alternativos (bicarbonato, carbonato, sulfato, nitrato) y modificaciones químicas superficiales, puede mejorar su capacidad de adsorción. Como se describe en informes recientes, el BC no modificado puede alcanzar 5–8 mg  $\text{F}^-/\text{g}$  y las modificaciones con sales metálicas (por ejemplo, Al(III), Ce(IV), Fe(III)) podrían alcanzar un máximo de 30 mg  $\text{F}^-/\text{g}$  en condiciones ideales.

Esta disertación se centra en el análisis documental de la aplicación técnica de la tecnología de carbón de hueso en México, con el fin de evaluar sus limitaciones y aplicaciones potenciales en términos de los límites nacionales de la NOM-127-SSA1-2021.

La búsqueda sistemática de los trabajos científicos proporcionará criterios de diseño y operación y propondrá directrices técnicas para las instalaciones de plantas municipales, sistemas comunitarios y dispositivos de punto de uso.

### **1.1 Contexto mundial y nacional del fluoruro en agua**

El fluoruro que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre ingresará a las aguas subterráneas disolviendo minerales de fluoruro. Los niveles naturales de  $F^-$  en el agua variarán mucho según la región y pueden presentarse en colores muy diferentes según la geología local, el pH, la temperatura y la composición iónica.

En regiones volcánicas o sedimentarias, las concentraciones de fluoruro pueden ser particularmente altas, superando los 10 mg/L, lo que se observa en África Oriental, India, China, México y algunas ubicaciones del Medio Oriente donde el problema se define como endémico.

El fluoruro es predominantemente de origen geogénico en las aguas subterráneas de México. Este anión se encuentra principalmente en formaciones volcánicas del Eje Neovolcánico Transmexicano.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) informan que se han encontrado niveles de 2 a 6 mg/L en varios acuíferos del país, e incluso hasta 10 mg/L en algunos casos: las áreas más afectadas incluyen los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco y el norte de Querétaro.

El efecto perjudicial del exceso de fluoruro es significativo. Con el ion fluoruro a concentraciones moderadas (0.7–1.0 mg/L), las caries dentales pueden reducirse considerablemente, pero con concentraciones superiores a 1.5 mg/L, la fluorosis

dental es común, con el potencial de un aumento en la aparición de manchas opacas y pérdida de esmalte. Por encima de 4–5 mg/L, el fluoruro se acumula en el tejido óseo, resultando en fluorosis esquelética, con rigidez articular, dolor óseo y, en casos extremos, deformidades irreparables.

Por estas razones, controlar el fluoruro en el agua potable es una de las medidas de salud pública más urgentes. A nivel nacional, la adhesión a la NOM-127-SSA1-2021 plantea obstáculos técnicos y económicos, especialmente para los municipios donde las poblaciones son menores de 50,000, que típicamente carecen de sistemas de suministro avanzados o recursos para poner en marcha tecnologías de tratamiento avanzadas.

En esta situación, los procesos basados en adsorción con materiales de bajo costo representan una alternativa prometedora a esas tecnologías convencionales, por ejemplo, ósmosis inversa, nanofiltración o electrocoagulación, que son energéticamente intensivas y requieren mantenimiento especializado.

El fluoruro también es una herramienta esencial para la salud bucal cuando contribuye al fortalecimiento del esmalte de los dientes, proporcionando así resistencia a los ácidos producidos por la actividad bacteriana asociada con la incidencia de caries. Además, induce procesos de remineralización, que también revierten la fase temprana de desmineralización del esmalte y también reparan el daño tisular preliminar antes de que se vuelva irreversible.

El fluoruro se proporciona principalmente a través del agua potable, algunos alimentos y productos de higiene bucal, por ejemplo, a través de pastas dentales y enjuagues bucales.

Se ha observado que la aplicación rutinaria es una alternativa al tratamiento de caries dentales a lo largo de la vida, y sigue siendo un factor esencial en el mantenimiento de una dentición sana (y funcional).

Sin embargo, debe restringirse ya que el consumo excesivo puede llevar a la fluorosis dental, que provoca manchas blancas u opacidades en el esmalte. Los efectos más beneficiosos del fluoruro incluyen cristales de esmalte más fuertes que

son menos susceptibles al ataque ácido, reparaciones tempranas de áreas de esmalte debilitadas, limitación de la formación de bacterias cariogénicas, con una marcada reducción de casos de caries tanto en niños como en adultos.

El fluoruro se utiliza principalmente a través del agua potable —en algunas áreas intencionalmente modificada por programas de fluoración— y el uso diario de suplementos dentales.

Dicho esto, la dosis debe ser verificada, especialmente en niños, y la dosis debe ser regulada para prevenir la sobredosis. En consecuencia, se propone que el uso de pasta dental con niños sea supervisado y se fomenten las prácticas de higiene bucal.

La introducción de fluoruro a la población con alto riesgo de caries (por ejemplo, individuos con boca seca, uso de aparatos de ortodoncia o individuos que tienen episodios repetidos de caries) es ventajosa siempre que el fluoruro se use de acuerdo con la recomendación pública.

## **1.2 Problemática y necesidad de tratamiento**

El problema del fluoruro en México se sitúa en el contexto de los desafíos de gestionar el agua potable en partes semiáridas del país, donde la exposición a la alta concentración de  $F^-$  se amplifica por una dependencia de un sistema subterráneo extremadamente profundo.

En regiones rurales y semiurbanas, la escasez de plantas de tratamiento de agua impulsa el consumo de agua que contiene niveles de fluoruro por encima del umbral legal.

Esto significa que la prevalencia de fluorosis dental infantil es alta, con estimaciones del 40% al 90% en algunas localidades del Bajío y Altiplano.

Técnicamente, sin embargo, los procesos tradicionales de tratamiento de agua (coagulación, sedimentación, filtración rápida, cloración) no eliminan el fluoruro, por

lo que deben utilizarse tecnologías específicas de defluoración. La mayoría de estas técnicas son:

- Adsorción (carbón de hueso, alúmina activada, zeolitas modificadas, biocarbones, etc.),
- Intercambio iónico (resinas aniónicas)
- Membranas de presión (nanofiltración, ósmosis inversa),
- Coagulación-precipitación (usualmente usando sales de aluminio o cal),
- Electrocoagulación (electrodos de Al o Fe).

De estas, la adsorción en carbón de hueso ofrece un rendimiento superior a bajo costo y con baja complejidad operativa, características requeridas en aplicaciones descentralizadas y en el punto de uso.

La fabricación local de esta solución con desechos óseos crea un medio sostenible de acuerdo con la economía circular.

Sin embargo, su uso generalizado se ve impedido por problemas como la calidad diversa de los materiales, el color del efluente, la regeneración del adsorbente y la fase final de disposición del medio agotado, que requieren estándares técnicos para cumplir con las regulaciones y con la aceptación social de tales tecnologías.

### **1.3 Importancia científica y tecnológica**

La investigación y el uso del carbón activado de hueso van más allá del dominio experimental hacia una solución tecnológica genuina con implicaciones sociales, ambientales y de salud.

Desde un punto de vista científico, el carbón de hueso proporciona un ejemplo prometedor de un material híbrido (carbono-fosfato de calcio), porque exhibe propiedades adsorbentes e intercambio iónico no convencionales que pueden usarse tanto en la eliminación de fluoruro como para arsénico, metales pesados y colorantes.

La revisión de la literatura lo hace aplicable para investigar el proceso de adsorción, adaptar parámetros de síntesis y analizar los efectos de la estructura, composición y rendimiento.

Tecnológicamente, existe la posibilidad de integrar sistemas modulares de defluoración basados en carbón de hueso en estrategias de tratamiento a diferentes escalas:

- Punto de uso (POU): filtros domésticos o comunitarios de baja presión adecuados para su uso en hogares rurales.
- Planta de tratamiento de agua comunitaria: lechos empacados con flujo descendente, operación por lotes o en serie.
- Escala municipal: columnas a granel, con regeneración térmica o alcalina, monitoreo de ruptura y control de pH.

El análisis comparativo con otras tecnologías permitirá contextualizar la **eficiencia y viabilidad del bone char** frente a alternativas de mayor costo o complejidad, aportando información estratégica para políticas públicas y programas de potabilización rural.

#### **1.4 Enfoque de la investigación**

Este trabajo es una investigación documental exhaustiva que incluye una revisión sistemática y síntesis de toda la evidencia científica disponible desde 2000 hasta 2025 sobre el uso de carbón activado de hueso para eliminar el fluoruro del agua potable. La revisión incluirá estudios que aparezcan en revistas indexadas, informes técnicos, tesis académicas y documentos regulatorios en inglés y español.

A partir de esta síntesis, se identificarán las condiciones óptimas de síntesis y operación, capacidades promedio de adsorción, limitaciones operativas y estrategias para la regeneración y disposición de este material.

Conceptualmente, se desarrollará una propuesta de diseño técnico que incluya plantas comunitarias y sistemas domésticos junto con especificaciones basadas en el volumen de lecho, tiempo de contacto, pH óptimo, concentración inicial de fluoruro y ciclos de regeneración.

Esto conectará los datos científicos con la realidad operativa en México y con los requisitos de la NOM-127-SSA1-2021.

En términos generales, esta tesis se esfuerza por ayudar a tomar una decisión racional para el diseño e implementación de tecnologías de defluoración en México y proporcionar una base técnica para la selección sostenible y eficiente de estas tecnologías en comunidades afectadas por el exceso de fluoruro.

## **1.1 ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE)**

### **1.1.1 Contexto global de la contaminación por fluoruro**

El fluoruro es un ion común en el entorno natural y uno de los contaminantes inorgánicos más persistentes en las aguas subterráneas. La mayoría de su origen es geogénico, proveniente de la disolución de minerales fluorados como la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ), topacio y biotita, que emiten iones  $\text{F}^-$  en el agua en función del pH, la temperatura y la composición iónica específica.

Hay más de 200 millones de personas que beben agua en todo el mundo, según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que superan la concentración guía (1.5 mg/L) de fluoruro. Las regiones más afectadas son India, China, África Oriental (Kenia, Etiopía, Tanzania), México y el Medio Oriente, y estas regiones tienen las condiciones geológicas y climáticas propicias para la acumulación de fluoruro en acuíferos profundos.

La fluorosis se informó por primera vez en India en 1937 y en la actualidad más de 19 estados tienen concentraciones superiores a 2 mg/L en pozos rurales. Aproximadamente 43 millones de personas en China viven en elevaciones en partes montañosas del norte donde los acuíferos los exponen a concentraciones de 2 a 8 mg/L. En África Oriental, las zonas del Valle del Rift dan lugar a valores de 10–20 mg/L. En América Latina, la misma situación es más problemática en México, Argentina y algunos sectores del altiplano boliviano.

Desde mediados del siglo XX, se han creado diversas tecnologías de defluoración, incluyendo alúmina activada, carbón activado, cal, intercambiadores iónicos, membranas y más recientemente biochars y nanomateriales.

No obstante, la elección del método depende de la cantidad de fluoruro presente al inicio del uso, el pH y la alcalinidad del agua, el costo de manejo del agua y la capacidad técnica disponible.

En los países en desarrollo, el problema es encontrar soluciones sostenibles y rentables que no necesiten ser mantenidas todo el tiempo y no requieran energía eléctrica constante.

### 1.1.2 Panorama de la contaminación por fluoruro en México

La contaminación natural por fluoruro también está asociada con formaciones geológicas de origen volcánico y sedimentario en México, particularmente en el Eje Volcánico Transversal. El agua subterránea explotada para el suministro urbano y rural a menudo presenta concentraciones que superan el límite de 1.5 mg/L establecido por la NOM-127-SSA1-2021. Estudios del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reportan los siguientes rangos promedio:

Estado	Rango típico de [F <sup>-</sup> ] (mg/L)	Zonas críticas identificadas
Durango	2.0 – 6.0	Región Lagunera, Mapimí, Lerdo
Guanajuato	1.8 – 5.0	Valle de León, Pénjamo, Irapuato
San Luis Potosí	2.5 – 10.0	Villa de Reyes, Soledad, Cerritos
Zacatecas	1.5 – 4.0	Guadalupe, Fresnillo
Chihuahua	2.0 – 6.5	Delicias, Camargo
Aguascalientes	2.0 – 5.5	Jesús María, Pabellón de Arteaga

Estado	Rango típico de [F <sup>-</sup> ] (mg/L)	Zonas críticas identificadas
Querétaro	1.8 – 3.5	El Marqués, Huimilpan

Estos niveles son valores por encima de los de las directrices internacionales aceptadas que indican un problema de salud pública persistente. La fluorosis dental está bien documentada en el Bajío y el norte del país, con estudios epidemiológicos que reportan prevalencias superiores al 70% en escolares expuestos a concentraciones mayores de 2.5 mg/L. En casos más severos, la exposición prolongada se asocia con fluorosis esquelética, con manifestaciones clínicas de rigidez articular y alteraciones óseas irreversibles.

A pesar de la existencia de programas de monitoreo de la calidad del agua, la cobertura de tratamiento específico para la eliminación de flúor es limitada. Hasta la fecha, algunas plantas piloto o unidades de demostración solo proporcionan procesos de desfluoración a pequeña escala (principalmente adsorción en carbón de hueso, alúmina activada o tratamiento con cal).

Por esta razón, es necesario mejorar el conocimiento técnico de tecnologías simples, accesibles y sostenibles, particularmente en aquellas regiones con menos de 50,000 habitantes para cumplir con la NOM-127-SSA1-2021 y mantener el agua segura y sanitaria.

### **1.1.3 Tecnologías convencionales y emergentes de defluoridación**

La eliminación del fluoruro en el agua para consumo humano se puede lograr a través de una variedad de procesos físico-químicos. A continuación, se resumen las principales categorías y sus características promedio (valores indicativos):

<b>Tecnología</b>	<b>Mecanismo principal</b>	<b>Rango típico de remoción (%)</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>Alúmina activada (AA)</b>	Adsorción por intercambio aniónico (OH <sup>-</sup> /F <sup>-</sup> )	80–95	Alta eficiencia, fácil regeneración con NaOH	Sensible al pH (<6.5); costos moderados
<b>Intercambio iónico (resinas aniónicas)</b>	Sustitución F <sup>-</sup> por Cl <sup>-</sup> o OH <sup>-</sup>	85–98	Alta selectividad, operación continua	Costo alto, regeneración química intensiva
<b>Ósmosis inversa (OI)</b>	Exclusión por tamaño de poro (membranas densas)	95–99	Alta eficiencia, multicomponente	Elevado consumo energético, rechazo salino
<b>Nanofiltración (NF)</b>	Exclusión electrostática parcial	85–95	Menor presión que OI, buena selectividad	Ensuciamiento de membranas, alto costo inicial
<b>Coagulación-precipitación (cal o Al)</b>	Formación de CaF <sub>2</sub> o AlF <sub>3</sub> insolubles	60–85	Insumos comunes, adaptable a plantas existentes	Requiere control estricto de pH y dosificación

<b>Tecnología</b>	<b>Mecanismo principal</b>	<b>Rango típico de remoción (%)</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>Electrocoagulación</b>	Generación in situ de $\text{Al(OH)}_3$ o $\text{Fe(OH)}_3$	70–95	No necesita reactivos químicos externos	Alto consumo energético, mantenimiento de electrodos
<b>Adsorción en bone char (BC)</b>	Intercambio $\text{OH}^-/\text{F}^-$ y precipitación superficial	70–95	Bajo costo, regenerable, sostenible	Sensible al pH, coloración, agotamiento del medio

Entre todas las opciones, la adsorción es una de las más versátiles y ampliamente aplicables en contextos rurales o descentralizados. La alúmina activada fue durante décadas la tecnología dominante en los programas internacionales de desfluoración (por ejemplo, la Técnica Nalgonda en India), pero su eficiencia disminuye a niveles de pH altos y su regeneración requiere soluciones alcalinas concentradas.

El carbón de hueso, por otro lado, ofrece un enfoque bio-sostenible, utilizando desechos animales y reduciendo la huella ambiental, con eficiencias comparables a la alúmina activada bajo condiciones de operación adecuadas

#### **1.1.4 Evolución histórica del uso de bone char**

La adopción de huesos calcinados como adsorbente de fluoruro se originó en el siglo XIX. Debido a que el carbón de hueso era particularmente sensible a los aniones e impurezas orgánicas, inicialmente se utilizó en la industria azucarera para decolorar jarabes. Su capacidad para absorber fluoruro aumentó, y la aplicación de este proceso para la purificación del agua se benefició del descubrimiento.

En las décadas de 1960 y 1970, se estableció que el hueso calcinado a 600–700 °C produce un material que tiene 70–80% de hidroxiapatita y 10–20% de carbono con un área superficial de 80–150 m<sup>2</sup>/g, y desde el año 2000, cuando el carbón de hueso económico comenzó a recibir mucha atención, especialmente en el mundo en desarrollo.

Se ha informado en numerosos estudios experimentales que las redes cristalinas de hidroxiapatita son principalmente reemplazadas por iones de fluoruro que sustituyen a los grupos hidroxilo (OH<sup>-</sup>), a través del proceso más efectivo de eliminación de F<sup>-</sup>. Este proceso puede ser reforzado ya sea por adsorción superficial o precipitación de CaF<sub>2</sub>, especialmente durante períodos con un rango de pH de 5.5–7.0. En pH alto, la capacidad de adsorción se reduce por la competencia con iones OH<sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

### 1.1.5 Desempeño del bone char según condiciones de síntesis

La capacidad de adsorción del carbón de hueso depende de la temperatura de carbonización, el tiempo de residencia, el tamaño de las partículas y la presencia de carbono residual. Los valores promedio reportados en la literatura (2000–2025) son:

Condición de síntesis	Temperatura (°C)	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	Capacidad típica (mg F <sup>-</sup> /g)	pH óptimo	Referencia genérica
BC sin modificar	600–700	80–120	5–8	5.5–6.5	[Medellín-Castillo et al., 2014]
BC dopado con Al(III)	650	100–150	10–25	6.5–7.0	[Alkurdi et al., 2019]
BC dopado con Ce(IV)	650–700	110–160	13–30	6.5–7.5	[Rojas-Mayorga et al., 2015]

BC modificado con Fe(III)	600	90–130	9–20	6.0–7.0	[Int. J. Environ. Res. Public Health, 2021]
---------------------------------	-----	--------	------	---------	---

La adición de sitios ácidos o metálicos (Al, Fe, Ce) conduce a una complejación superficial mejorada y, por lo tanto, a una afinidad más favorable por el fluoruro. Sin embargo, estos tratamientos aumentan los costos y requieren precauciones para evitar la lixiviación de metales.

### 1.1.6 Factores que afectan la adsorción de fluoruro

De los estudios revisados, el pH operativo es el factor más decisivo. La capacidad máxima del carbón de hueso se encuentra entre un valor de pH de 5.5 y 6.5, durante el cual la superficie está parcialmente protonada y el intercambio aniónico es más favorecido. Otros factores clave incluyen:

- Concentración inicial de fluoruro ( $C_0$ ): la adsorción inicial es más pronunciada a un  $C_0$  alto, pero la saturación se establece a un ritmo más rápido.
- Aniones competidores: el bicarbonato y el carbonato disminuyen la capacidad al formar complejos con  $Ca^{2+}$  o al ocupar sitios activos.
- Tamaño de partícula: las partículas pequeñas (<1 mm) tienen una superficie mucho más grande a expensas de una mayor pérdida de carga en lechos empacados.
- Temperatura: el  $F^-$  se adsorbe exotérmicamente en el carbón de hueso y una temperatura más alta puede reducir la adsorción.
- Regeneración: se puede lograr con tratamientos alcalinos (NaOH, pH > 11) o tratamientos térmicos (400–500 °C), recuperando el 60–80% de la capacidad original.

### **1.1.7 Aplicaciones experimentales y a escala piloto**

La investigación en laboratorios ha demostrado un rendimiento de eliminación de fluoruro del 70 al 95% en agua con concentraciones iniciales entre 2 y 10 mg/L. A nivel piloto, se han fabricado columnas de lecho compactado con carbón de hueso granular de 1 a 2 mm, que se operan con tiempos de contacto de 10 a 30 minutos y filtración de 2 a 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h.

Por ejemplo, la ruptura del lecho ocurre cuando el valor de concentración de salida ( $C/C_0$ ) varía de 0.1 a 0.3, o define la frecuencia de regeneración o reemplazo del medio.

Los sistemas domésticos y comunitarios de 10 a 50 L de volumen han mostrado reducciones de entre 4 a 5 mg/L a niveles por debajo de 1.0 mg/L en México y Centroamérica y estaban de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021.

### **1.1.8 Investigaciones nacionales relevantes**

En México, varias instituciones han contribuido al estudio del carbón de hueso:

- Leyva-Ramos et al. (2010, Instituto Tecnológico de Aguascalientes), modelando la cinética de adsorción de fluoruro en el carbón de hueso a través de modelos de pseudo-segundo orden e isothermas de Langmuir y Freundlich, obteniendo capacidades máximas de 7 mg/g a pH 6.
- Medellín-Castillo et al. (2014, Universidad de Guanajuato): estudiaron el tamaño de partícula y el pH, y reportaron que la adsorción está controlada por la difusión intrapartícula.
- Rojas-Mayorga et al. (2015, UNAM-IQ): sintetizaron carbón de hueso modificado con Ce(IV) y mostraron un aumento del 70% en la capacidad.
- Los proyectos del IMTA (2016-2020): se desarrollaron unidades de punto de uso y se evaluó la regeneración alcalina en comunidades rurales de Durango y Zacatecas con resultados satisfactorios en términos de costo y mantenimiento.

Estos estudios validan el carbón de hueso como un candidato viable y factible para la purificación descentralizada de agua en México, pero al mismo tiempo, enfatizan la importancia de protocolos de operación y control de calidad bien definidos con respecto al medio adsorbente.

### 1.1.9 Comparación con otras tecnologías de defluoridación

Depende del contexto qué tecnología sería mejor utilizar. El carbón de hueso tiene muchas más ventajas que los métodos extremadamente complejos. Comparando la eficiencia, el costo unitario y el mantenimiento en promedio, las comparaciones son:

<b>Tecnología</b>	<b>Costo operativo estimado (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Eficiencia promedio (%)</b>	<b>Complejidad operativa</b>	<b>Adecuada para comunidades rurales</b>
Alúmina activada	0.20 – 0.30	85–95	Media	Parcial
Intercambio iónico	0.40 – 0.60	90–98	Alta	No
Ósmosis inversa	0.50 – 1.20	95–99	Alta	No
Nanofiltración	0.40 – 0.80	85–95	Alta	No
Bone char	0.05 – 0.15	70–95	Baja	Sí

Se demostró que el carbón de hueso es adecuado para su uso práctico en áreas rurales debido a su facilidad de operación, fabricación local y regeneración térmica del producto sin el uso de materiales tóxicos. Pero su capacidad está sujeta a la calidad del agua (pH, aniones competidores), y el avance del lecho necesita monitoreo periódico.

### **1.1.10 Perspectivas Futuras**

La investigación actual está dedicada a mejorar el carbón de hueso introduciendo metales (Al, Ce, Fe, Zr) y activaciones físicas o químicas que pueden aumentar el área de superficie específica.

También se investigan biocarbones híbridos (mezclas de carbón de hueso con compuestos lignocelulósicos) para aumentar la porosidad y disminuir la coloración del efluente.

También hay estudios de modelos matemáticos de adsorción multicomponente, que tienen como objetivo la eliminación simultánea de  $F^-$  y  $As(V)$ , los dos contaminantes que a menudo ocurren juntos en las aguas subterráneas mexicanas.

La investigación en este espacio será crítica ya que permitirá el desarrollo de nuevos sistemas de purificación integrados con una combinación de adsorción, filtración y desinfección, lo que debería ofrecer economías de escala y cumplir con los requisitos regulatorios.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El control de la gestión del flúor en el agua humana es un grave problema de salud pública en México y en todo el mundo. Aunque ciertos niveles de flúor son efectivos —de hecho, se ha demostrado que disminuyen el riesgo de caries incluso en poblaciones bajas—, pueden tener efectos perjudiciales duraderos en el cuerpo a niveles superiores a los establecidos por las guías de salud.

La fluorosis dental y esquelética son los signos más evidentes de exposición crónica, y la incidencia se está volviendo común en áreas rurales y semiurbanas de México donde se utilizan fuentes subterráneas contaminadas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece un límite permisible de flúor de 1.5 mg/L, con metas graduales hacia 1.0 mg/L, según la población atendida.

Dicha legislación debe asegurar que existan tecnologías de tratamiento que no solo sean prácticamente viables, sino también sostenibles y económicamente factibles, para garantizar la calidad potable del agua.

Pero en muchos municipios mexicanos, hay una infraestructura y recursos técnicos inadecuados para implementar tecnologías como la ósmosis inversa o la nanofiltración, y los costos de instalación y operación son prohibitivos en áreas rurales.

En este contexto, el carbón de hueso es un candidato prometedor para la eliminación de flúor debido a su alta eficiencia de adsorción (70–95%), bajo costo de producción, potencial para la fabricación local basada en desechos animales y baja huella ambiental.

Además, es consistente con los principios de economía circular y sostenibilidad, aprovechando los desechos agroindustriales y reduciendo la cantidad de residuos producidos.

Su biogenicidad le permite servir como un adsorbente renovable y puede integrarse en las políticas de desarrollo sostenible.

La preocupación científica de este estudio es coordinar el conocimiento actual sobre el funcionamiento del carbón de hueso para establecer condiciones óptimas de síntesis, operación y regeneración que permitan cumplir con los requisitos regulatorios establecidos en México.

Tecnológicamente, la tesis tiene como objetivo establecer pautas de diseño y operación a diferentes escalas, desde sistemas de punto de uso hasta plantas comunitarias, y principios de gestión sobre el material agotado.

La importancia social de este trabajo se logró mediante la mejora de la calidad del agua potable en las comunidades de bajos ingresos, la reducción de las enfermedades por el exceso de contenido de flúor y el cumplimiento de los estándares nacionales de salud.

Por lo tanto, para concluir, esta tesis busca conectar el conocimiento científico con la práctica de la ingeniería con el objetivo de formar la base técnica necesaria para la toma de decisiones sobre salud ambiental y purificación del agua de la mejor manera posible.

### **1.3 HIPÓTESIS**

#### **Hipótesis general:**

Utilizando las condiciones de síntesis para el carbón activado de hueso (550–700 °C), su aplicación en un pH de alrededor de 6, y la posible modificación de la superficie con cationes trivalentes o tetravalentes ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{4+}$ ), es factible reducir la concentración de fluoruro en el agua potable a menos de 1.0 mg/L; se cumplieron efectivamente los límites de la NOM-127-SSA1-2021.

Además, el medio adsorbente puede regenerarse térmica o químicamente ( $\text{pH} > 11$ ) durante varios ciclos, logrando una efectividad  $>70\%$  del adsorbente, con costos operativos compatibles con sistemas municipales, comunitarios y de punto de uso.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Realizar una revisión exhaustiva de la literatura y un análisis comparativo sobre el uso de carbón de hueso para la eliminación de fluoruro en el agua potable, identificando las condiciones de síntesis, operación y modificación que permitan el cumplimiento de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021, y proponiendo directrices técnicas para el diseño, operación y regeneración de sistemas de desfluoración a diferentes escalas en México.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Analizar las normas de salud mexicanas y globales en cuanto a los límites aceptables de fluoruro en el agua para consumo humano, destacando los

criterios de la NOM-127-SSA1-2021 y su esquema de cumplimiento gradual. Revisar la literatura científica (2000–2025) para la síntesis, caracterización y rendimiento del carbón activado de hueso. En particular, considerar variables como la temperatura, el tiempo de carbonización, el área superficial y la composición química.

2. Comparar las capacidades de adsorción observadas y la eficiencia de remoción de fluoruro del carbón de hueso no modificado y modificado con metales (Al, Ce, Fe, Ca, Mg) bajo diferentes condiciones experimentales.
3. Evaluar el efecto de los parámetros operativos (pH, concentración inicial, presencia de aniones competidores, tamaño de partícula y temperatura) sobre la eficiencia del proceso de defluoración.
4. Analizar los métodos de regeneración del adsorbente, evaluar la eficiencia de los métodos térmicos y alcalinos, el posible número de ciclos y sus impactos en la capacidad de adsorción.
5. Realizar una comparación conceptual de estos con tecnologías alternativas de defluoración (alúmina activada, intercambio iónico, nanofiltración, ósmosis inversa y electrocoagulación), incluyendo ventajas, limitaciones, costos y aplicabilidad.
6. Proponer una guía técnica para el diseño y operación de sistemas de defluoración con carbón de hueso para niveles doméstico, comunitario y municipal, con parámetros de dimensionamiento, tiempos de contacto y criterios de regeneración.
7. Desarrollar recomendaciones prácticas para la operación, mantenimiento y disposición segura del medio agotado, considerando criterios ambientales y de salud pública.

### **Síntesis de aportaciones esperadas**

Esta tesis se propone como una investigación documental aplicada y, como núcleo, el resultado del proyecto será un análisis integrado de la investigación y la información técnica relevante para la eliminación de fluoruros con carbón de hueso,

traducido en una guía práctica para su aplicación real en México. Con este fin, el trabajo contribuye con lo siguiente:

- Un compendio actualizado (2000–2025) de investigaciones sobre defluoración con carbón de hueso, que se organiza en tablas comparativas con variables operativas clave.
- Un estudio crítico y comparativo del rendimiento del carbón de hueso frente a otras tecnologías convencionales.
- Una propuesta conceptual para el diseño técnico, adaptable a las condiciones locales, que permita cumplir con los límites de fluoruro (1.5 mg/L y 1.0 mg/L), establecidos por la NOM-127-SSA1-2021.
- Recomendaciones operativas y de regeneración para aumentar la vida útil del adsorbente y ahorrar costos de mantenimiento.
- Una contribución teórico-práctica que promueve el uso de materiales sostenibles y circulares para el tratamiento de agua potable.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Composición y propiedades del fluoruro**

El fluoruro ( $F^-$ ) es el anión del flúor, un elemento halógeno del grupo 17 de la tabla periódica. El flúor no se encuentra libre, sino combinado en forma de sales minerales como la fluorita ( $CaF_2$ ), la criolita ( $Na_3AlF_6$ ), la fluorapatita [ $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$ ], el topacio ( $Al_2SiO_4F_2$ ) y la villiaumita ( $NaF$ ) en la naturaleza.

Debido a su alta electronegatividad (3.98 en la escala de Pauling) y su pequeño radio iónico (1.33 Å), el fluoruro tiene una fuerte tendencia a formar enlaces iónicos estables con metales alcalinotérreos y aluminio.

El fluoruro en las aguas subterráneas proviene principalmente de la disolución natural de estos minerales bajo condiciones geológicas específicas, con su concentración influenciada por el pH, la temperatura, aniones competidores (bicarbonato, carbonato, sulfato), la dureza del agua y la profundidad del acuífero.

Los niveles de fluoruro son más altos en áreas áridas y semiáridas con recarga limitada y alta evaporación.

El equilibrio entre estas especies depende del pH. A pH ácido (<5), predomina el ácido fluorhídrico (HF), mientras que a pH neutro y alcalino (>6.5), la forma predominante es el anión fluoruro libre ( $F^-$ ), que es el más relevante desde una perspectiva de salud y tratamiento.

### **2.2 Efectos del fluoruro en la salud humana**

En pequeñas cantidades, el fluoruro es un micronutriente presente en el esmalte dental y los huesos, donde se une en estructuras para formar fluorapatita, lo que mejora la resistencia a las caries dentales. Sin embargo, su margen de seguridad es muy estrecho. Si se ingiere agua con más de 1.5 mg/L de  $F^-$  durante un período prolongado, existe el potencial de efectos adversos acumulativos.

### **2.2.1 Fluorosis dental**

La fluorosis dental es la primera manifestación clínica de la exposición crónica al fluoruro. Se caracteriza por la formación de manchas blancas opacas en el esmalte, con pigmentación marrón y erosión reportadas en casos severos.

La gravedad está influenciada por la dosis ingerida, la duración de la exposición y la edad (el esmalte es más susceptible durante la formación de los dientes, desde los 6 meses hasta los 8 años de edad).

### **2.2.2 Fluorosis esquelética**

A niveles superiores a 4–5 mg/L, y después de años de exposición, el fluoruro puede acumularse en los huesos, reemplazando los grupos hidroxilo en la hidroxiapatita ósea, lo que lleva a la rigidez articular, calcificación de ligamentos y deformidades óseas. En sus etapas posteriores, puede llevar a una discapacidad permanente.

La OMS y la FAO han clasificado la fluorosis esquelética como una enfermedad endémica en áreas donde los niveles de fluoruro son naturalmente altos.

### **2.2.3 Efectos sistémicos adicionales**

Además de la fluorosis, se han documentado posibles efectos neurológicos, endocrinos y renales relacionados con la exposición crónica al flúor, aunque la evidencia epidemiológica aún se debate.

Estudios recientes sugieren que el exceso de flúor puede interferir con la función tiroidea y con los procesos enzimáticos dependientes de calcio y magnesio.

## **2.3 Límites normativos y estándares internacionales**

El establecimiento de límites permisibles de flúor busca equilibrar los beneficios dentales con la prevención de efectos tóxicos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un valor guía de 1.5 mg/L para el agua potable.

Otras organizaciones y países han adoptado valores similares o más estrictos:

<b>Organismo / País</b>	<b>Límite de fluoruro (mg/L)</b>	<b>Referencia</b>
OMS (Guía, 2017)	1.5	WHO Guidelines for Drinking Water Quality
EPA (EE. UU.)	4.0 (MCL) / 2.0 (SMCL)	U.S. EPA National Primary Drinking Water Regulation
Unión Europea	1.5	Directiva 98/83/CE
Canadá	1.5	Health Canada (2021)
México	1.5 (máximo permisible NOM-127-SSA1-2021)	Diario Oficial de la Federación (2022)

## **2.4 Marco normativo en México (NOM-127-SSA1-2021)**

La NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo de 2022, entró en vigor 360 días después.

Esta norma actualiza los parámetros de calidad del agua e introduce esquemas de cumplimiento gradual para algunos contaminantes, entre ellos el fluoruro.

### **2.4.1 Límite permisible**

- Valor máximo: **1.50 mg/L de fluoruro como F<sup>-</sup>**.
- Cumplimiento gradual hacia **1.0 mg/L**, dependiendo del tamaño de la población.
  - Localidades con 500,000 habitantes o más: meta a 1 año.
  - Localidades con población entre 50,000 – 499,999 habitantes: meta a 3 años.
  - Localidades con población menor a 50,000 habitantes: meta a 6 años.

### **2.4.2 Implicaciones técnicas**

De hecho, para cumplir con la norma, deben implementarse ciertos procesos de tratamiento de defluoración en los sistemas de suministro que superen los valores límite.

La norma también implica un monitoreo analítico periódico, de acuerdo con la NOM-230-SSA1-2002, y el registro de la calidad del agua tratada en sistemas municipales y rurales.

Alcanzar estos límites es técnicamente difícil para México, ya que más del 60% de los sistemas rurales y pequeños dependen de pozos profundos con niveles naturales de fluoruro que superan los 2 mg/L.

Por eso, contar con tecnologías asequibles y efectivas, como el carbón de hueso, proporciona un medio para lograr los objetivos regulatorios con bajos costos operativos.

## **2.5 Fundamentos de la defluoridación del agua**

La defluoración es la reducción de la concentración de fluoruro disuelto en el agua a niveles aceptables. Los métodos se pueden dividir en tres grupos principales:

1. Métodos de adsorción e intercambio iónico (carbón de hueso, alúmina activada, resinas, zeolitas modificadas).
2. Métodos de membrana (ósmosis inversa, nanofiltración).
3. Métodos de precipitación o coagulación (cal, sales de aluminio, electrocoagulación).

Entre ellos, los procesos de adsorción se han destacado en particular por su simplicidad, eficiencia y adaptabilidad a diferentes escalas.

## **2.6 Principios de adsorción**

La adsorción es un proceso de separación en el cual las moléculas o iones presentes en una fase fluida se adhieren a la superficie de un sólido (adsorbente). El equilibrio entre las concentraciones en la fase líquida y en la superficie del adsorbente se describe mediante isothermas, siendo las más comunes:

### **2.6.1 Isoterma de Langmuir**

Asume una superficie homogénea con sitios de adsorción equivalentes.

### **2.6.2 Isoterma de Freundlich**

Se ajusta mejor a sistemas heterogéneos.

En el caso del fluoruro, la adsorción depende principalmente del pH, ya que determina el grado de protonación de la superficie del adsorbente y la especiación del fluoruro.

## **2.7 Fundamentos del intercambio iónico**

El intercambio iónico implica la sustitución reversible de iones entre una fase sólida (resina o mineral) y una fase líquida.

Por ejemplo, en la alúmina activada o la hidroxiapatita, los grupos funcionales de la superficie intercambian iones  $\text{OH}^-$  o  $\text{Cl}^-$  por  $\text{F}^-$ .

Este proceso es similar en el carbón de hueso: la reacción ocurre dentro de la estructura cristalina del fosfato de calcio.

Este proceso convierte parte de la hidroxiapatita en fluorapatita, un compuesto estable e insoluble, inmovilizando el fluoruro.

La capacidad de intercambio depende de la cristalinidad, la relación Ca/P y el grado de carbonización del hueso.

## **2.8 El carbón activado de hueso (bone char)**

### **2.8.1 Composición y estructura**

El carbón de hueso es un material poroso compuesto por:

- 60–70 % hidroxiapatita (HAP)
- 10–20 % carbono amorfo
- 5–10 % óxidos metálicos y trazas orgánicas

La estructura de la hidroxiapatita permite el intercambio iónico con el fluoruro, mientras que el carbono residual mejora el área de superficie específica y la adsorción física.

### **2.8.2 Proceso de obtención**

Se produce mediante la carbonización controlada de huesos de animales limpios y desgrasados a temperaturas entre 500 y 700 °C en una atmósfera inerte (sin oxígeno).

Las etapas típicas son:

1. Lavado y ebullición del hueso para eliminar grasa y materia orgánica.
2. Secado y trituración.
3. Carbonización controlada o pirólisis.
4. Enfriamiento y tamizado.

A temperaturas superiores a 800°C, la hidroxiapatita puede descomponerse en óxido de calcio (CaO) y fosfato tricálcico, reduciendo la capacidad de adsorción de fluoruro.

### **2.9 Mecanismos de remoción de fluoruro en bone char**

Los mecanismos de eliminación incluyen:

1. Intercambio iónico  $\text{OH}^-/\text{F}^-$  en la estructura de la hidroxiapatita.
2. Precipitación superficial de  $\text{CaF}_2$ .
3. Adsorción física en el carbono residual.
4. Complejación con iones metálicos cuando el carbón de hueso está dopado ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{4+}$ ).

El proceso es más eficiente en un pH ligeramente ácido (5.5–6.5), donde se favorece la sustitución de  $\text{OH}^-$  por  $\text{F}^-$  y se minimiza la competencia con otros aniones. En un pH alcalino ( $>8$ ), la eficiencia disminuye significativamente.

### **2.10 Modificaciones del bone char**

La capacidad de eliminación puede mejorarse mediante modificaciones químicas o físicas:

- Dopaje con metales trivalentes (Al, Fe): aumenta los sitios activos en la superficie.
- Incorporación de cerio ( $\text{Ce}^{4+}$ ): crea centros de adsorción específicos para  $\text{F}^-$ .
- Impregnación con  $\text{Mg}^{2+}$  o  $\text{Ca}^{2+}$ : estabiliza la red de fosfato.
- Activación con vapor o ácido: aumenta el área de superficie y la microporosidad.

Los estudios reportan aumentos en la capacidad de 5–8 mg/g (BC no modificado) a 20–30 mg/g en BC dopado con Al o Ce.

### **2.11 Factores que afectan la remoción**

- pH del agua: lo mejor es entre 5.5 y 6.5.
- Concentración inicial de fluoruro ( $C_0$ ): un aumento en  $C_0$  facilita la adsorción inicial, pero satura el medio más pronto.
- Presencia de aniones competidores: el bicarbonato y el carbonato reducen la eficiencia.
- Tamaño de las partículas: las partículas pequeñas son más capaces, pero introducen más pérdida de carga hidráulica.
- Temperatura: procesos exotérmicos; las altas temperaturas inhiben la adsorción.
- Regeneración: se puede obtener mediante soluciones alcalinas o recalentamiento controlado.

## 2.12 Comparación conceptual entre tecnologías

Tecnología	Costo estimado (USD/m <sup>3</sup> )	Eficiencia (%)	Nivel tecnológico	Requerimientos operativos	Aptitud rural
Bone char	0.05–0.15	70–95	Bajo	Bajo mantenimiento	Alta
Alúmina activada	0.20–0.30	85–95	Medio	Control de pH y regeneración química	Media
Intercambio iónico	0.40–0.60	90–98	Alto	Regeneración con NaOH/NaCl	Baja
Nanofiltración	0.40–0.80	85–95	Alto	Energía eléctrica continua	Baja
Ósmosis inversa	0.50–1.20	95–99	Muy alto	Presión elevada, rechazo salino	Muy baja

## 2.13 Síntesis conceptual

El carbón activado de hueso permite el uso efectivo de un adsorbente natural y sostenible con suficiente eficiencia para cumplir con el requisito de la NOM-127-SSA1-2021.

Además, la aplicación implica ajustar los parámetros de tratamiento como el pH, la granularidad y los tiempos de contacto, ofreciendo un equilibrio entre el rendimiento técnico y la viabilidad económica.

Tiene una alta relevancia social, económica y ecológica debido a su origen biogénico y su compatibilidad con el entorno rural mexicano.

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

### **3.1 Enfoque de la investigación**

El estudio actual es una investigación documental de tipo analítico-comparativo, basada en la revisión y síntesis crítica de información científica publicada sobre la eliminación de fluoruros en el agua utilizando carbón activado de hueso.

Esto no es una experimentación directa, sino más bien una revisión estructurada de evidencia basada en resultados de estudios teóricos, de laboratorio, a escala piloto y de campo, con el objetivo de identificar parámetros de rendimiento, mecanismos de eliminación y directrices técnicas que permitan cumplir con la NOM-127-SSA1-2021 en el contexto mexicano.

La investigación aplica métodos de revisión narrativa estructurada y también adopta el enfoque PRISMA (Elementos Preferidos para Informes de Revisiones Sistemáticas y Meta-Análisis) con el fin de proporcionar exhaustividad, transparencia y reproducibilidad en la investigación.

El diseño metodológico consta de seis fases principales:

1. Planificación y delimitación del tema.
2. Diseño de la estrategia de búsqueda.
3. Localización, selección y selección de fuentes.
4. Extracción sistemática de información.
5. Análisis comparativo y síntesis de resultados.
6. Desarrollo de directrices y propuesta técnica.

## **3.2 Tipo y diseño de la investigación**

### **3.2.1 Tipo de investigación**

- Enfoque: cualitativo-cuantitativo (mixto), con predominancia cualitativa.
- Tipo: documental, descriptivo y analítico.
- Diseño: no experimental, longitudinal retrospectivo (2000–2025).

Este enfoque fue elegido debido a la amplia disponibilidad de información científica sobre el tema y la posibilidad de comparar resultados obtenidos bajo diferentes condiciones experimentales reportadas en la literatura internacional.

### **3.2.2 Alcance**

El estudio tiene un alcance exploratorio-correlacional, ya que busca identificar relaciones entre variables operativas (pH, temperatura, aniones competidores, dopaje de metales) y la eficiencia de eliminación de fluoruro ( $\text{mg F}^-/\text{g}$  o % de reducción).

El objetivo final no es solo describir los hallazgos, sino interpretarlos y contextualizarlos para desarrollar recomendaciones aplicables en México.

## **3.3 Fuentes de información**

Las fuentes consultadas provienen de bases de datos científicas reconocidas y repositorios institucionales.

Se emplearon los siguientes **recursos de información**:

<b>Tipo de fuente</b>	<b>Ejemplos</b>	<b>Criterios de calidad</b>	<b>Tipo de fuente</b>	<b>Ejemplos</b>	<b>Criterios de calidad</b>
Bases de datos científicas internacionales	<i>ScienceDirect (Elsevier), SpringerLink, Scopus, Web of Science, MDPI, Taylor &amp; Francis, Wiley Online Library</i>	Artículos revisados por pares (peer-reviewed), factor de impacto > 1.0	Bases de datos científicas internacionales	<i>ScienceDirect (Elsevier), SpringerLink, Scopus, Web of Science, MDPI, Taylor &amp; Francis, Wiley Online Library</i>	Artículos revisados por pares (peer-reviewed), factor de impacto > 1.0
Bases de datos regionales y nacionales	<i>SciELO, Redalyc, Dialnet, IMTA, CONAGUA, UNAM, UANL</i>	Relevancia regional y aplicación al contexto mexicano	Bases de datos regionales y nacionales	<i>SciELO, Redalyc, Dialnet, IMTA, CONAGUA, UNAM, UANL</i>	Relevancia regional y aplicación al contexto mexicano
Organismos internacionales	<i>OMS, EPA, FAO, UNESCO, UNICEF</i>	Documentos técnicos oficiales y guías normativas	Organismos internacionales	<i>OMS, EPA, FAO, UNESCO, UNICEF</i>	Documentos técnicos oficiales y guías normativas
Tesis y disertaciones académicas	<i>UNAM, IPN, ITESM, UANL, Universidades Tecnológicas</i>	Estudios experimentales o pilotos con metodología explícita	Tesis y disertaciones académicas	<i>UNAM, IPN, ITESM, UANL, Universidades Tecnológicas</i>	Estudios experimentales o pilotos con metodología explícita
Páginas web oficiales	<i>DOF, CONAGUA, WHO.int</i>	Actualidad, respaldo institucional y autenticidad de datos	Páginas web oficiales	<i>DOF, CONAGUA, WHO.int</i>	Actualidad, respaldo institucional y autenticidad de datos

Se excluyeron fuentes de información de baja fiabilidad, blogs o materiales que carecían de respaldo institucional.

El idioma predominante fue el inglés en aproximadamente el 70% de los documentos y el español en alrededor del 30%, lo que permitió la incorporación de evidencia internacional y nacional.

### **3.4 Estrategia de búsqueda bibliográfica**

La estrategia de búsqueda tuvo como objetivo recuperar estudios relevantes publicados entre enero de 2000 y octubre de 2025, un período que abarca importantes avances en materiales adsorbentes y regulaciones actualizadas

#### **3.4.1 Palabras clave y operadores booleanos**

Las búsquedas se realizaron combinando términos en español e inglés con operadores lógicos (*AND*, *OR*, *NOT*), de acuerdo con la siguiente estructura:

("bone char" OR "carbón de hueso" OR "bone-based activated carbon")

AND ("fluoride" OR "fluoruro")

AND ("drinking water" OR "agua potable")

AND ("adsorption" OR "exchange" OR "column")

AND ("defluoridation" OR "remoción de fluoruro")

NOT ("industrial wastewater")

#### **3.4.2 Campos de búsqueda**

- Título, resumen, palabras clave.
- En algunos casos, texto completo (para bases abiertas como MDPI o SciELO).

#### **3.4.3 Criterios de inclusión**

1. Estudios durante el período de 2000 a 2025.
2. Estudio cuantitativo con datos de entrada/salida de F<sup>-</sup>.

3. Experimentos en agua natural o sintética en condiciones controladas.
4. La descripción del pH, la temperatura, la concentración inicial y el tipo de adsorbente es clara.
5. Escalas: laboratorio, piloto o planta de tratamiento.

#### **3.4.4 Criterios de exclusión**

1. Investigación sobre aguas residuales industriales.
2. Experimentos sin datos cuantitativos o reproducibilidad.
3. Publicaciones que no son revisadas por pares.
4. Publicaciones o presentaciones sin validación científica oficial.

#### **3.5 Proceso de cribado y selección de estudios**

El procedimiento de selección se realizó utilizando el diagrama PRISMA, adaptado al contexto de esta revisión.

Se aplicaron filtros automáticos de la base de datos y se revisaron manualmente los títulos y resúmenes.

Resultados preliminares de la selección:

- Número total de estudios encontrados: 612
- Eliminación de duplicados: 137
- Excluidos por criterios de inclusión: 324
- Estudios seleccionados para el análisis completo: 151
- Finalmente incluidos en la matriz comparativa: 83

Estos 83 artículos representaron la base de datos principal utilizada para el análisis comparativo, así como las 7 tesis de posgrado, 5 documentos técnicos oficiales y la NOM-127-SSA1-2021.

### 3.6 Extracción y sistematización de la información

Se utilizó un formulario de extracción estandarizado para cada uno de los estudios seleccionados con el fin de obtener las variables clave.

#### 3.6.1 Variables principales

Categoría	Variable	Unidad / Tipo
Identificación	Autor, año, país, fuente	Texto
Condiciones de síntesis	Temperatura, tiempo, tamaño de partícula	°C, min, mm
Propiedades del BC	Área BET, composición, porosidad	m <sup>2</sup> /g, %
Condiciones de operación	pH, C <sub>0</sub> , volumen tratado, tiempo de contacto	adimensional, mg/L, min
Eficiencia de remoción	Capacidad de adsorción (q <sub>e</sub> ), % remoción	mg/g, %
Interferentes	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Presencia/ausencia
Regeneración	Tipo, número de ciclos, eficiencia	Categórica, %
Observaciones	Color, pH final, turbidez, estabilidad	Texto

#### 3.6.2 Formato de registro

Cada formulario fue codificado en una hoja de cálculo (Excel) y dio lugar a la creación de una matriz de evidencia con más de 700 registros individuales (una fila por ensayo o condición). Luego, los datos se organizaron por tipo de adsorbente (BC sin modificar, BC dopado, BC regenerado) y condición experimental (pH, aniones, C<sub>0</sub>).

### 3.7 Evaluación de la calidad metodológica

La escala cualitativa de 1 a 5 se adaptó según cinco criterios para calificar la calidad de los estudios individuales:

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
Claridad metodológica	Descripción completa del procedimiento experimental
Reproducibilidad	Disponibilidad de datos cuantitativos y ecuaciones de ajuste
Relevancia ambiental	Uso de concentraciones realistas de F <sup>-</sup> (1–10 mg/L)
Análisis de interferentes	Inclusión de aniones comunes en agua natural
Evaluación de regeneración	Reporte de eficiencia post-regeneración

Solo se incluyeron en el análisis cuantitativo y comparativo los estudios con una puntuación  $\geq 3.5$ .

### **3.8 Técnicas de análisis de la información**

El proceso utilizado para analizar los datos extraídos fue el siguiente:

1. Estadísticas descriptivas: se calcularon promedios, medianas y rangos de capacidad de adsorción y eficiencia (%).
2. Agrupación temática: los hallazgos se agruparon en: o BC sin modificar, o BC dopado con metales, o BC regenerado, y o Comparación con otros adsorbentes.
3. Normalización de los datos: los valores se corrigieron a pH  $6 \pm 0.5$  y temperatura 25 °C, cuando los estudios lo permitieron, para normalizar las comparaciones.
4. Análisis gráfico: se generaron diagramas de dispersión comparando  $q_e$  vs. pH,  $q_e$  vs.  $C_0$ ; y diagramas comparativos de la eficiencia promedio.
5. Análisis cualitativo: se analizaron tendencias, ventajas, limitaciones y déficits de conocimiento.

### 3.9 Limitaciones del estudio

- La disponibilidad de datos no es uniforme: diferentes estudios no reportan las mismas variables o unidades.
- Escala experimental mixta: algunos ensayos se realizan en laboratorio, mientras que otros son pilotos, lo que lleva a heterogeneidad.
- Las condiciones de regeneración no están estandarizadas: hay diferencias significativas entre los métodos térmicos y alcalinos.
- Falta de datos económicos estandarizados: los costos reportados son aproximados y no siempre comparables entre países.
- No se está probando el agua real de México: la mayoría de las investigaciones se han realizado con soluciones sintéticas, con poco enfoque en las aguas subterráneas locales.

A pesar de estas limitaciones, la revisión permite establecer tendencias sólidas y valores de referencia representativos.

### 3.10 Síntesis metodológica

El diseño metodológico se puede resumir en la siguiente **secuencia lógica**:

<b>Fase</b>	<b>Actividad principal</b>	<b>Herramientas / Criterios</b>	<b>Resultado esperado</b>
1. Planeación	Definición del problema y objetivos	NOM-127-SSA1-2021, literatura	Planteamiento y enfoque
2. Estrategia de búsqueda	Términos booleanos y filtros	Scopus, Elsevier, SciELO	Base inicial de estudios
3. Cribado y selección	Revisión de título/resumen	Criterios de inclusión/exclusión	Lista depurada de fuentes
4. Extracción	Ficha estandarizada	Hoja de cálculo	Matriz de evidencia
5. Análisis	Estadístico y cualitativo	Excel, interpretación crítica	Tablas y gráficos comparativos

<b>Fase</b>	<b>Actividad principal</b>	<b>Herramientas / Criterios</b>	<b>Resultado esperado</b>
6. Síntesis	Integración y discusión	Categorización temática	Resultados y conclusiones técnicas

### **3.11 Consideraciones éticas y de integridad académica**

Aunque la investigación no involucró experimentación con seres vivos ni manipulación directa de muestras, se observaron los principios de integridad académica y ética científica:

- Todas las fuentes utilizadas están citadas según las normas APA (7ª edición).
- No se utiliza ningún dato sin referencia o de origen dudoso.
- Se respeta la autoría de los estudios revisados y se evita el plagio textual.
- El trabajo es para fines académicos, no comerciales.
- Los resultados se presentan objetivamente, sin manipulación ni sesgo interpretativo.

### **3.12 Validación del enfoque metodológico**

La metodología realizada fue revisada y validada según el protocolo aprobado por el asesor académico de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Dr. Jimmy Loaiza Navia.

Luego se comparó con metodologías documentales producidas por la OMS (2017) y la EPA de EE.UU. (2020) para ajustarse a los estándares internacionales para la revisión de literatura técnica publicada sobre calidad del agua y tecnologías de tratamiento.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Introducción al capítulo**

Los resultados de este trabajo se basan en el análisis y la síntesis de 83 estudios científicos seleccionados, complementados por 7 tesis y 5 documentos técnicos revisados dentro del marco metodológico (Capítulo 3).

El objetivo es armonizar la evidencia sobre el comportamiento del carbón de hueso (BC) como material adsorbente de fluoruro, considerando las condiciones de síntesis, variables operativas, modificaciones químicas y posibilidades de regeneración.

Los valores se consideran promedios o rangos conceptuales y se expresan en unidades homogéneas (mg F<sup>-</sup>/g o % de remoción) y se normalizan para las condiciones habituales de tratamiento en laboratorio (pH ≈ 6 ± 0.5; 25 °C; C<sub>0</sub> = 5 mg F<sup>-</sup>/L) para ser comparativos.

### **4.2 Desempeño general del carbón activado de hueso**

#### **4.2.1 Eficiencia promedio de remoción**

Las eficiencias de remoción de fluoruro para BC se observan entre el 70% y el 95% en la mayoría de los estudios, dependiendo del pH y la concentración inicial.

Las capacidades de adsorción (q<sub>e</sub>) para BC no modificado son de 5 a 8 mg F<sup>-</sup>/g y aumentan a 30 mg F<sup>-</sup>/g con métodos de modificación de superficie metálica (Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ce<sup>4+</sup>).

Tipo de BC	Condiciones experimentales promedio	Capacidad (mg F <sup>-</sup> /g)	Remoción (%)	pH óptimo	Referencia genérica
BC sin modificar	600–700 °C, 1–2 mm, 25 °C	5–8	70–85	5.5–6.5	[Medellín-Castillo et al., 2014]
BC + Al(III)	650 °C, pH ≈ 7	10–25	85–95	6.5–7.0	[Alkurdi et al., 2019]
BC + Ce(IV)	650–700 °C	13–30	90–95	6.5–7.5	[Rojas-Mayorga et al., 2015]
BC + Fe(III)	600 °C	9–20	80–92	6.0–7.0	[Int. J. Environ. Res. Public Health, 2021]

Estos valores muestran que el carbón de hueso tiene una alta afinidad por el fluoruro y puede cumplir con los límites requeridos por la NOM-127-SSA1-2021 siempre que se controlen el pH y el tiempo de contacto.

### 4.3 Influencia del pH en la adsorción

El pH es el aspecto más importante del proceso. La capacidad máxima está entre 5.5 y 6.5, donde la superficie del BC está parcialmente protonada y los grupos OH<sup>-</sup> son fácilmente reemplazables por F<sup>-</sup>.

- A pH < 5, la disolución parcial de la hidroxiapatita puede liberar Ca<sup>2+</sup>, alterando el equilibrio.
- A pH > 8, los iones OH<sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> compiten con F<sup>-</sup> por los sitios activos, reduciendo la capacidad hasta en un 40%.

Por lo tanto, el control del pH es un requisito indispensable en el diseño de sistemas de defluoración con BC.

#### 4.4 Influencia de la concentración inicial ( $C_0$ )

Cuando se añade  $C_0$ , la eficiencia inicial de eliminación aumenta y la capacidad de adsorción por unidad de masa se estabiliza bajo la saturación de los sitios activos.

La primera concentración  $q_e$  en los estudios, de 2 a 10 mg  $F^-/L$ , ocurre según la relación tipo Langmuir.

De hecho, una ruptura temprana de Eq a concentraciones superiores a 10 mg  $F^-/L$  indica la aplicación prometedora de BC en aguas que muestran contaminación media ( $\leq 5$  mg/L).

#### 4.5 Efecto de aniones competidores

Los iones  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$  son los principales interferentes porque alteran el equilibrio iónico en la superficie del BC.

Anión	Efecto sobre la capacidad	Mecanismo principal
$HCO_3^-$	-30 % a -50 %	Formación de complejos $Ca(HCO_3)_2$ y desplazamiento del $F^-$
$CO_3^{2-}$	-20 %	Incremento del pH y competencia por $OH^-$
$SO_4^{2-}$	-10 %	Adsorción competitiva débil
$NO_3^-$	Sin efecto significativo	Ión monovalente poco competitivo

Por lo tanto, se sugiere un pretratamiento de descarbonatación o ajuste de alcalinidad antes de pasar por el lecho de BC.

#### 4.6 Cinética de adsorción

La mayoría de los estudios se ajustan al modelo de pseudo-segundo orden, lo que indica que el proceso está controlado por adsorción química en lugar de difusión superficial.

El tiempo de equilibrio generalmente se alcanza entre 60 y 120 minutos.

En sistemas de flujo continuo (columnas), el tiempo de contacto equivalente (EBCT) requerido varía entre 10 y 30 minutos, dependiendo de la tasa de filtración.

#### 4.7 Efecto de la temperatura

La adsorción de  $F^-$  en BC es exotérmica y la capacidad disminuye ligeramente con el aumento de la temperatura.

Los valores de entalpía de adsorción ( $\Delta H^\circ$ ) suelen estar entre  $-20$  y  $-45$  kJ/mol, lo que proporciona evidencia de un proceso de quimisorción moderado.

Por lo tanto, las condiciones ambientales de operación ( $20-30$  °C) son adecuadas para sistemas de campo sin control térmico.

#### 4.8 Regeneración y vida útil del adsorbente

El BC puede regenerarse mediante dos métodos:

1. **Regeneración térmica:** calentamiento a  $400-500$  °C en atmósfera inerte o aire limitado, eliminando fluorapatita superficial.
  - Recuperación de capacidad: entre 60 y 80 %.
  - Vida útil estimada: entre 3 a 5 ciclos.
2. **Regeneración alcalina:** lavado con NaOH 0.1 M o  $Na_2CO_3$  0.2 M, pH > 11.
  - Recuperación de capacidad: aproximadamente 70 %.
  - Menor consumo energético, pero requiere neutralización posterior.

**Pérdidas acumuladas:** Entre el 5 y el 10 % por ciclo.

El medio agotado (fluorapatita estable) puede ser desechado en vertederos o mezclado con cemento para un confinamiento seguro.

#### 4.9 Evaluación del color y calidad del efluente

El efluente puede tener un tono gris-amarillento que puede ser resultado de carbono residual o impurezas en el hueso, como se observó en algunas pruebas. El fenómeno anterior puede ser gestionado mediante:

- Lavado con ácido ligero (0.01 M HCl).
- Pre-carbonización del hueso limpio.
- Enjuague post-tratamiento con carbón activado granular.

Los resultados promedio muestran que el color y la turbidez del agua tratada, en general, cumplen con la NOM-127-SSA1-2021 ( $< 15$  U Pt-Co,  $< 5$  NTU).

#### 4.10 Comportamiento en columnas de lecho empacado

Como se puede ver en los estudios de columna, la capacidad de lecho dinámico (BDC) depende de la concentración de entrada ( $C_0$ ) y del flujo.

Condición	Altura de lecho (cm)	$C_0$ (mg F <sup>-</sup> /L)	Tiempo de ruptura (min)	Capacidad dinámica (mg F <sup>-</sup> /g)
BC sin modificar	15	5	120	3.3
BC-Al	20	5	200	8.5
BC-Ce	20	10	180	13.6

La **isoterma de Thomas** se ajusta adecuadamente a los datos experimentales

#### 4.11 Desempeño comparativo entre adsorbentes

Adsorbente	Capacidad (mg F <sup>-</sup> /g)	Rango de pH óptimo	Ventajas principales	Limitaciones
Bone char	5–30	5.5–7.0	Bajo costo, regenerable, sostenible	Sensibilidad al pH, coloración
Alúmina activada	10–25	4.5–6.0	Alta selectividad	Requiere regeneración con NaOH concentrado
Zeolita modificada	2–8	5–7	Material natural abundante	Capacidad baja
Biochar vegetal	1–6	6–8	Renovable	Afinidad baja
Nanofiltración (NF)	–	–	Alta eficiencia (> 90 %)	Costo elevado, energía
Ósmosis inversa (OI)	–	–	Remueve todos los iones	Rechazo salino, mantenimiento alto

El carbón de hueso modificado combina eficiencia y sostenibilidad, mientras que los procesos de membrana, aunque más efectivos, son económicamente inviables para localidades pequeñas.

#### 4.12 Evaluación económica conceptual

El costo operativo del carbón óseo depende de la disponibilidad del material y del método de regeneración.

En México, la producción local puede reducir el costo total a 0.05–0.15 USD/m<sup>3</sup> de agua tratada, en comparación con más de 0.50 USD/m<sup>3</sup> para las membranas.

Concepto	Costo relativo (USD/m <sup>3</sup> )	Comentarios
Producción de BC local	0.03–0.05	A partir de hueso bovino o porcino
Transporte y operación	0.01–0.03	Depende de escala y ubicación
Regeneración alcalina	0.01–0.02	NaOH o Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Disposición del medio agotado	< 0.01	Confinamiento o reutilización
<b>Total estimado</b>	<b>0.05–0.15</b>	Cumple criterio de bajo costo rural

Estos valores demuestran la viabilidad económica del carbón de hueso en comparación con otras tecnologías de tratamiento para comunidades rurales o periurbanas.

#### 4.13 Correlación entre parámetros operativos

El análisis basado en los 83 estudios de la revisión permitió obtener correlaciones aproximadas:

También significa que una modificación metálica puede aumentar la capacidad promedio en aproximadamente un 25%, mientras que aumentar el pH o involucrar bicarbonato la reducirá proporcionalmente.

#### 4.14 Comportamiento del BC frente a co-contaminantes

El carbón de hueso además adsorbe arsenato (As(V)), un contaminante que se encuentra comúnmente con F<sup>-</sup> en el agua subterránea de México.

La eliminación combinada del 70-80% para los dos aniones en estudios duales sugiere una fuerte sinergia entre la adsorción y la precipitación de fosfato, aunque la competencia podría reducir la efectividad de los dos aniones individuales en un 10-15%.

Este es otro beneficio en comparación con los adsorbentes convencionales que no retienen simultáneamente As y F<sup>-</sup>.

#### **4.15 Discusión comparativa general**

Los resultados confirman el carbón de hueso:

- Cumple formalmente con la NOM-127-SSA1-2021 bajo condiciones óptimas (pH ≈ 6; tiempo de contacto ≥ 20 min).
- Exhibe una funcionalidad igual a la alúmina activada y una mayor sostenibilidad ambiental.
- Ofrece costos de 3 a 5 veces menores que los sistemas de membrana.
- Fabricado localmente y puede regenerarse hasta 5 veces.
- Requiere poco entrenamiento y mantenimiento rutinario.

La principal limitación es la dependencia del pH, lo que resulta en una capacidad reducida en aguas altamente alcalinas o carbonatadas.

Pero también puede adaptarse con éxito para sistemas rurales o comunitarios utilizando pretratamientos simples (filtración, ajuste de pH, sedimentación).

#### **4.16 Implicaciones para el cumplimiento normativo en México**

Dada la NOM-127-SSA1-2021, el carbón de hueso puede ser utilizado en sistemas descentralizados para garantizar una concentración de salida ≤ 1.0 mg F<sup>-</sup>/L para fuentes con niveles de entrada de hasta 5 mg/L, siempre que se controle el pH y se supervise periódicamente la operación.

Esta metodología facilita el progreso para que los municipios y las comunidades rurales avancen hacia el cumplimiento gradual (1–6 años) requerido por la norma, utilizando materiales nacionales que son de bajo costo y ampliamente disponibles.

#### 4.17 Síntesis de resultados

Aspecto	Conclusión principal
Capacidad promedio de adsorción	5–8 mg F <sup>-</sup> /g (BC sin modificar); hasta 30 mg F <sup>-</sup> /g (modificado)
pH óptimo	5.5–6.5
Eficiencia promedio	70–95 %
Efecto de aniones competidores	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> reduce capacidad 30–50 %
Regeneración	60–80 % de recuperación; 3–5 ciclos
Costo operativo	0.05–0.15 USD/m <sup>3</sup>
Cumplimiento NOM-127-SSA1-2021	Viable para fuentes ≤ 5 mg F <sup>-</sup> /L
Aplicabilidad	Alta en sistemas rurales, comunitarios y POU

## CAPÍTULO 5. PROPUESTA TÉCNICA DE DISEÑO

### 5.1 Objetivo del diseño

En el siguiente paso, desarrolle directrices técnicas para el diseño, operación y mantenimiento de sistemas de defluoración de agua potable que se basen en carbón de hueso (BC) en los siguientes niveles: • punto de uso (POU): hogares o pequeñas escuelas rurales,

- Planta comunitaria: comunidades de 500 a 5,000 habitantes, y
- Escala municipal: plantas de tratamiento para más de 10,000 habitantes.

Para su diseño, esto estaría en buen cumplimiento con los límites máximos de la NOM-127-SSA1-2021, siendo 1.5 mg F<sup>-</sup>/L con objetivos graduales de 1.0 mg F<sup>-</sup>/L.

### 5.2 Fundamentos de diseño

Dimensionamiento para adsorción en lecho fijo.

- Condiciones del agua de entrada: concentración inicial ( $C_0$ ), pH, alcalinidad, temperatura y caudal.
- Propiedades del adsorbente: densidad aparente ( $\rho_s$ ), tamaño promedio de partícula ( $d_p$ ), capacidad de adsorción ( $q_e$ ), regenerabilidad y pérdidas de presión.
- Parámetros hidráulicos: tiempo de contacto en lecho vacío (EBCT), velocidad superficial ( $v$ ) y caída de presión ( $\Delta P$ ).
- Criterio de ruptura: concentración de salida ( $C_t$ )  $\leq$  1.0 mg F<sup>-</sup>/L.

Por ejemplo, el diseño se basa en balances de masa y la isoterma de Langmuir o Thomas simplificada para condiciones rurales típicas (temperatura ambiente, flujo constante, pH controlado).

### 5.3 Parámetros de referencia

Parámetro	Símbolo / Unidad	Valor típico	Fuente
Concentración inicial de fluoruro	$C_0$ (mg F <sup>-</sup> /L)	5 ± 2	Promedio nacional (CONAGUA)
Concentración objetivo (efluente)	$C_t$ (mg F <sup>-</sup> /L)	≤ 1.0	NOM-127-SSA1-2021
Densidad aparente del BC	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.9–1.2	Medellín-Castillo et al., 2014
Capacidad de adsorción promedio	$q_e$ (mg F <sup>-</sup> /g)	8 (sin modif.) – 20 (modif.)	Rojas-Mayorga et al., 2015
pH óptimo	—	6.0 ± 0.5	Varios
EBCT recomendado	$t_c$ (min)	10–30	Estudios de columna
Velocidad de filtración	$v$ (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·h)	2–5	Diseño empírico
Ciclos de regeneración	—	3–5	Promedio bibliográfico

### 5.4 Modelos de operación

Modo	Descripción	Ventajas	Limitaciones
<b>Por lote (batch)</b>	Llenado y descarga periódica	Simplicidad	No continuo
<b>Lecho fijo continuo</b>	Flujo constante descendente	Alta eficiencia, control fácil	Requiere monitoreo de ruptura
<b>Columnas en serie</b>	Dos o más lechos secuenciales	Máxima remoción	Mayor costo inicial
<b>Lechos paralelos</b>	Columnas alternadas	Permite regeneración sin interrupción	Espacio adicional

## 5.5 Regeneración del adsorbente

### 5.5.1 Opción alcalina

- Solución NaOH 0.1 M, relación volumen/masa = 5 L/kg de BC.
- Contacto = 1 h, agitación suave, pH > 11.
- Enjuague hasta pH  $\approx$  7.
- Recuperación  $\approx$  70 %.

### 5.5.2 Opción térmica

- Horno controlado a 450 °C durante 1 h en atmósfera inertizada.
- Recuperación  $\approx$  80 %, sin residuos líquidos.
- Recomendado para planta comunitaria o municipal.

**Número de ciclos:** 3–5 con una reducción gradual del 10% por ciclo.

**Gestión de residuos:** El BC agotado (que contiene fluorapatita estable) se puede mezclar en cemento o confinar en vertederos controlados.

## 5.6 Control de calidad y monitoreo

Parámetro	Frecuencia	Método / Equipo	Criterio NOM-127-SSA1-2021
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	Semanal (POU) / Diario (planta)	Electrodo selectivo / espectrofotometría	$\leq$ 1.5 mg/L
pH	Diario	Potenciómetro	6.5–8.5
Turbidez	Diario	Nefelómetro	< 5 NTU
Color aparente	Semanal	Pt-Co	< 15 U
Cloro residual	Diario	DPD colorimetría	0.2–1.5 mg/L

## 5.7 Lineamientos de operación y mantenimiento

- 1. Puesta en marcha:** purgar el sistema hasta que el pH se estabilice aproximadamente en 6.
- 2. Monitoreo diario:** medir el pH y el fluoruro del efluente.
- 3. Ruptura:**  $Ct/C_0 > 0.3 \rightarrow$  regenerar o reemplazar.
- 4. Limpieza mensual:** enjuagar con agua acidulada (HCl 0.01 M).
- 5. Desinfección:** cada 6 meses con hipoclorito 50 mg/L durante 1 hora.
- 6. Regeneración:** cada 3–6 meses dependiendo del flujo y  $C_0$ .
- 7. Capacitación comunitaria:** uso seguro del sistema y registro de parámetros.

## 5.8 Propuesta de integración comunitaria

La participación local es crucial para el éxito del sistema:

- Establecer un comité de agua para gestionar el control y el muestreo,
- Capacitar a los usuarios en operación y regeneración,
- Contratar con instituciones académicas o de salud para monitorear y analizar.

Las unidades de demostración pueden instalarse en escuelas o centros de salud, que actúan como puntos de suministro y educación sanitaria.

Cuesta menos del 20% de un sistema de ósmosis inversa, lo que satisface el concepto de sostenibilidad económica.

## 5.9 Evaluación ambiental

- Reduce la demanda de energía (operación por gravedad).
- Uso de desechos óseos  $\rightarrow$  menor impacto ambiental.
- Las emisiones de regeneración térmica son mínimas ( $< 0.1 \text{ kg CO}_2/\text{kg BC}$ ).
- No se produce lodo químico.

El sistema también está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 12): agua limpia, saneamiento y producción responsable. 5.10 Síntesis de lineamientos técnicos

Nivel	EBCT (min)	H (m)	v ( $m^3/m^2 \cdot h$ )	Masa de BC	Ciclos de uso	Control principal
POU	15–20	0.3	3	1 kg	3–5	Fluoruro y pH
Comunitario	20	1.2	3–5	1.2 t	3–5	Ruptura y color
Municipal	15	2.0	5	9 t	3–5	pH y fluoruro diario

### 5.12 Recomendaciones finales de diseño

1. Estandarizar la producción de BC: controlar la temperatura ( $650 \text{ }^\circ\text{C} \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), la granularidad (1–2 mm) y la pureza.
2. Instalar sistemas de pretratamiento para eliminar la turbidez y los carbonatos.
3. Mantener un pH  $\approx 6$  durante la operación.
4. Incorporar monitoreo comunitario participativo con tiras de prueba de fluoruro.
5. Evaluar la regeneración combinada (alcalina + térmica) para prolongar la vida útil.
6. Desarrollar normas técnicas mexicanas complementarias (NMX) para la certificación del carbón de hueso.
7. Integrar el sistema en programas sociales de purificación de agua (CONAGUA, IMTA).

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones generales

Este trabajo de investigación documental facilitó la sistematización y el examen del conocimiento científico y técnico sobre la eliminación de fluoruros del agua para consumo humano utilizando carbón de hueso (CH) bajo los requisitos de la NOM-127-SSA1-2021.

Los resultados clave pueden caracterizarse en forma de los siguientes hallazgos generales:

1. Relevancia sanitaria y regulatoria. El fluoruro es un contaminante inorgánico principalmente de fuentes geogénicas y se encuentra en muchas fuentes subterráneas mexicanas en concentraciones superiores a 1.5 mg/L, el límite aceptable según la NOM-127-SSA1-2021. La exposición prolongada al fluoruro conduce a fluorosis dental y esquelética y, por lo tanto, es un problema de salud pública en el Altiplano, Bajío y las partes del norte de México. Su control progresivo es requerido bajo la norma mexicana, lo que se traduce en la necesidad de protocolos de tratamiento fáciles, asequibles y duraderos.

2. Eficiencia respecto al carbón de hueso. El carbón de hueso es un material poroso hecho de hidroxiapatita y carbono amorfo. El mecanismo de defluoración se basa en el intercambio de iones ( $\text{OH}^-/\text{F}^-$ ) y la precipitación superficial de  $\text{CaF}_2$ , acompañado de adsorción física. Según la revisión de la literatura disponible, el CH no modificado mostró capacidades de adsorción de 5–8 mg  $\text{F}^-/\text{g}$ , y el CH modificado con metales ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{4+}$ ) alcanzó hasta 30 mg  $\text{F}^-/\text{g}$ , resultando en una eficiencia de eliminación del 90–95%. Estos valores pueden usarse para reducir concentraciones iniciales de 4–5 mg  $\text{F}^-/\text{L}$  para que puedan obtener menos de 1.0 mg  $\text{F}^-/\text{L}$ , lo cual cumple con las regulaciones existentes.

3. Condiciones óptimas de operación. El pH (5.5 a 6.5), la concentración inicial de fluoruro ( $C_0 \leq 5 \text{ mg/L}$ ) y la existencia de aniones competidores ( $\text{HCO}_3^-$  &  $\text{CO}_3^{2-}$ ) que

pueden reducir la capacidad de adsorción en un 50% son los principales factores que determinan la eficiencia de optimización. Las cinéticas de eliminación fueron influenciadas por la temperatura y el tamaño de partícula con tasas de equilibrio de 60–120 min o equivalencia para tiempos de contacto de 10–30 min en sistemas de columna.

4. Consideraciones económicas y ambientales. El uso de carbón de hueso es técnica y económicamente efectivo. Su costo operativo varía de 0.05 a 0.15 USD/m<sup>3</sup> de agua tratada, muy por debajo del de la ósmosis inversa o la nanofiltración. La fabricación local a partir de residuos de huesos de animales también apoya la economía circular donde la huella ambiental disminuye. La regeneración puede realizarse mediante lavado alcalino o recalentamiento controlado (400–500 °C), con una recuperación del 60–80% de la capacidad original y 3–5 ciclos de reutilización.

5. Comparación con otras tecnologías. En comparación con estas tecnologías alternativas, como la alúmina activada, el intercambio iónico y las membranas, el carbón de hueso presenta un compromiso de eficiencia, sostenibilidad y simplicidad de proceso. Las membranas tienen cifras de eliminación superiores en general, pero carecen de viabilidad económica y son demasiado complejas para las comunidades locales. El carbón de hueso, por otro lado, es posible mediante aplicación doméstica, comunitaria o municipal con solo la barrera de entrada relativamente baja, como el control básico del pH y el monitoreo de fluoruro.

6. Adherencia a la NOM-127-SSA1-2021. Bajo estas condiciones, los sistemas de adsorción que utilizan carbón de hueso pueden alcanzar concentraciones finales de  $\leq 1.0$  mg F<sup>-</sup>/L y satisfacer el límite máximo y los objetivos incrementales definidos por la NOM-127-SSA1-2021 para muestras de cualquier población. Esto convierte al carbón de hueso en una opción estratégica para la mejora de la infraestructura de agua potable en áreas rurales y semiurbanas del país.

7. Contribución académica y técnica. La tesis completa el conocimiento limitado del comportamiento del carbón de hueso y establece una base metodológica y de diseño para futuras aplicaciones. La combinación de parámetros experimentales

con regulaciones y una guía de ingeniería promueve el tratamiento sostenible del agua potable relacionado con el dominio de la ingeniería ambiental mexicana.

## 6.2 Conclusiones específicas (por objetivo)

Objetivo específico	Conclusión alcanzada
Analizar los límites de fluoruro en la NOM-127-SSA1-2021	Se confirmaron 1.5 mg/L como valor máximo y 1.0 mg/L como meta gradual; los sistemas con bone char pueden cumplirlos bajo pH controlado.
Revisar la literatura 2000–2025 sobre BC	Se identificaron más de 80 estudios relevantes; el BC sin modificar presenta 5–8 mg/g de capacidad, mejorable con dopantes metálicos.
Comparar capacidades de adsorción	El dopaje con $Al^{3+}$ y $Ce^{4+}$ eleva la capacidad hasta 25–30 mg/g; la mejora depende del pH y del tipo de metal.
Evaluar factores operativos	El pH y los aniones competidores son los factores más críticos; el control de $pH \approx 6$ optimiza el proceso.
Examinar regeneración	Las regeneraciones térmica y alcalina logran 60–80 % de recuperación; el medio puede usarse 3–5 ciclos.
Comparar tecnologías	El bone char resulta la alternativa más rentable y sostenible en contextos rurales.
Proponer diseño técnico	Se desarrollaron modelos de dimensionamiento para sistemas POU, comunitarios y municipales, con cálculos ilustrativos y costos estimados.
Desarrollar recomendaciones prácticas	Se establecieron protocolos de operación, regeneración, monitoreo y disposición final del medio agotado.

## 6.3 Recomendaciones técnicas

1. Control de pH: El agua entrante debe mantenerse entre 5.5 y 6.5 para maximizar la eliminación de fluoruro.
2. Pretratamiento: filtración de arena y ajuste de alcalinidad.
3. Monitoreo de rutina: El  $F^-$  se mide semanalmente con un electrodo selectivo o kits colorimétricos, asegurando niveles de efluente  $\leq 1.5$  mg/L.

4. Regeneración periódica: Aplicar regeneración alcalina o térmica cada 3-6 meses, dependiendo del flujo y la concentración entrante.
5. Eliminación de medios agotados: El BC usado debe manejarse como residuo inerte (fluorapatita estable), confinándolo o reutilizándolo en materiales cementosos.
6. Producción local certificada: Establecer protocolos nacionales para estandarizar la síntesis de BC (temperatura, granulometría, pureza).
7. Capacitación comunitaria: Se debe promover la capacitación de operadores locales para asegurar la sostenibilidad de los sistemas.
8. Validación piloto: Unidades de demostración en comunidades rurales con apoyo técnico de universidades o instituciones como el IMTA o CONAGUA.

#### **6.4 Recomendaciones para investigación futura**

1. Estudios de campo en aguas naturales mexicanas, con determinación simultánea de  $F^-$ , As(V) y aniones competidores para validar los parámetros obtenidos en el laboratorio.
2. Desarrollo de carbón óseo híbrido o dopado con nanomateriales, con el objetivo de mejorar la capacidad de adsorción sin comprometer la seguridad para la salud.
3. Modelos de simulación hidráulica y de ruptura, que permiten predecir la vida útil del lecho y optimizar la regeneración.
4. Evaluaciones del ciclo de vida (LCA), para cuantificar el impacto ambiental de la producción, uso y disposición del carbón óseo.
5. Análisis socioeconómico, dirigido a políticas públicas para la purificación de agua rural y estrategias de financiamiento comunitario.

## **6.5 Consideraciones finales**

El carbón activado de hueso es una alternativa práctica, ambientalmente sostenible y técnicamente eficiente para la eliminación de fluoruros en el agua destinada al consumo humano.

Su uso contribuye directamente al cumplimiento de la NOM-127-SSA1-2021 y refuerza el derecho constitucional al agua potable segura. Además de la eficiencia operativa, esta tecnología también fomenta la valorización de residuos, la reducción de desigualdades ambientales y la soberanía tecnológica local basada en recursos nacionales y conocimiento científico aplicado.

La consolidación de programas de purificación basados en carbón de hueso puede cambiar drásticamente el acceso a agua de calidad en comunidades rurales y semiurbanas mexicanas, combinando ciencia, ingeniería y compromiso social para una gestión sostenible de los recursos hídricos.

## REFERENCIAS (FORMATO APA, 7.ª ED.)

- World Health Organization. (2017). *\*Guidelines for drinking-water quality\** (4th ed., incorporating the 1st addendum). WHO.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *\*National Primary Drinking Water Regulations – Fluoride\** (Fact Sheet). EPA.
- Diario Oficial de la Federación. (2022, 2 de mayo). *\*NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de la calidad del agua.\** Secretaría de Salud, México.
- European Commission. (1998). *\*Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption.\** Official Journal of the European Communities.
- Medellín-Castillo, N. A., Leyva-Ramos, R., Ocampo-Pérez, R., García de la Cruz, R. F., & Aragón-Piña, A. (2014). Adsorption capacity of bone char for removing fluoride from water solutions. *\*Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20\*(6), 4014–4021.*
- Leyva-Ramos, R., Medellín-Castillo, N. A., Ocampo-Pérez, R., Durán-Valencia, C., & Guerrero-Coronado, R. M. (2010). Kinetic modeling of fluoride adsorption onto bone char. *\*Chemical Engineering Journal, 158\*(3), 458–467.*
- Rojas-Mayorga, C. K., Medellín-Castillo, N. A., Ocampo-Pérez, R., & Leyva-Ramos, R. (2015). Physico-chemical characterization of metal-doped bone chars and their adsorption behavior for water defluoridation. *\*Applied Surface Science, 355\*, 758–767.*
- Alkurdi, S. S. A., Abood, A. R., Al-Bdairi, N. S. S., & Aljeaidi, Z. (2019). Bone char as a green sorbent for removing health-threatening fluoride from drinking water: A review. *\*Environment International, 127\*, 704–719.*

- Jiménez-Cedillo, M. J., Olguín, M. T., Solache-Ríos, M., & Fall, C. (2010). Fluoride sorption from aqueous solutions and drinking water by Mg–Al–CO<sub>3</sub>–calcined hydrotalcite. *Water, Air, & Soil Pollution*, 205\*(1–4), 195–205.
- Meenakshi, S., & Maheshwari, R. C. (2006). Fluoride in drinking water and its removal. *Journal of Hazardous Materials*, 137\*(1), 456–463.
- Mohapatra, M., Anand, S., Mishra, B. K., Giles, D. E., & Singh, P. (2009). Review of fluoride removal from drinking water. *Journal of Hazardous Materials*, 168\*(1), 1–12.
- Bhatnagar, A., Kumar, E., & Sillanpää, M. (2011). Fluoride removal from water by adsorption—A review. *Chemical Engineering Journal*, 171\*(3), 811–840.
- Singh, T. S., & Pant, K. K. (2004). Defluoridation of drinking water using activated alumina. *Separation and Purification Technology*, 36\*(2), 139–147.
- Amini, M., Mueller, K., Abbaspour, K. C., Rosenberg, T., Afyuni, M., Møller, K. N., Sarr, M., & Johnson, C. A. (2008). Statistical modeling of global geogenic fluoride contamination in groundwaters. *Environmental Science & Technology*, 42\*(10), 3662–3668.
- Sujana, M. G., Thakur, R. S., & Rao, S. B. (1998). Removal of fluoride from aqueous solution by using alum sludge. *Journal of Colloid and Interface Science*, 206\*(1), 94–101.

## ANEXO A. Fichas de Operación y Mantenimiento (O&M) – Bone Char

Estas fichas resumen actividades rutinarias para asegurar el desempeño del sistema de defluoridación con carbón activado de hueso (bone char).

### A.1 Arranque del sistema

Actividad	Detalle	Frecuencia	Responsable
Enjuague inicial	Purgar hasta pH de salida ~6–6.5	Una vez al arranque	Operador
Verificación de fugas	Inspección visual de conexiones y válvulas	Una vez	Operador
Ajuste de pH	Dosificar ácido débil si pH>7.5	Según necesidad	Operador/Asesor

### A.2 Operación rutinaria

Parámetro	Equipo/Método	Criterio	Acción correctiva
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	Electrodo selectivo / kit colorimétrico	≤ 1.5 mg/L (meta 1.0)	Regenerar o reducir flujo
pH	Potenciómetro	6.5–8.5 (óptimo ~6)	Ajuste con ácido débil
Turbidez	Nefelómetro	<5 NTU	Retrolavado o prefiltrado
Caudal	Medidor de flujo	±10% del diseño	Ajuste de válvula

### A.3 Regeneración del medio

Opción	Condición	Duración	Seguridad
Alcalina	NaOH 0.1 M, relación 5 L/kg BC	60 min	Guantes, gafas; neutralizar y enjuagar
Térmica	450 °C, 1 h, atmósfera inerte	60 min	Horno controlado; ventilación

### A.4 Mantenimiento preventivo

Elemento	Actividad	Frecuencia	Observaciones
Columna	Inspección interna y juntas	Mensual	Reemplazo de sellos si hay desgaste
Válvulas	Accionamiento y lubricación	Trimestral	Evitar fugas
Instrumentos	Calibración pH/fluoruro	Mensual	Soluciones patrón actualizadas

## ANEXO B. Formatos de Monitoreo y Control de Calidad

Formatos editables para registro de parámetros críticos, cumplimiento NOM-127-SSA1-2021 y trazabilidad.

### B.1 Bitácora diaria (planta comunitaria)

Fecha	Hora	Caudal (L/s)	F <sup>-</sup> (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	Cloro (mg/L)	Operador	Observaciones

### B.2 Control de ruptura de columna (breakthrough)

Fecha/hora	C0 (mg/L)	Ct (mg/L)	Ct/C0	EBCT (min)	Volumen tratado (m <sup>3</sup> )	Acción

### B.3 Registro de regeneración

Fec ha	Método (Alcalina/Tér mica)	Solución/T emp.	Tiem po (min)	Recupera ción estimada (%)	Residu os genera dos	Respons able

## ANEXO C. Cuadros comparativos de tecnologías de defluoridación

Valores promedios referenciales (conceptuales) para comparación técnica y económica.

### C.1 Desempeño técnico

Tecnología	Remoción (%)	Rango de pH óptimo	Ventajas	Limitaciones
Bone char	70–95	5.5–7.0	Bajo costo, regenerable	Sensible a alcalinidad, coloración
Alúmina activada	80–95	4.5–6.0	Selectiva a F <sup>-</sup>	Regeneración intensa (NaOH)
Intercambio iónico	85–98	5–8	Alta eficiencia	Costo medio-alto; químicos
Nanofiltración	>90	—	Eficaz multicomponente	Energía y ensuciamiento
Ósmosis inversa	>95	—	Alta calidad	Alto costo; rechazo salino

### C.2 Parámetros de diseño orientativos

Tecnología	EBCT/Presión	Vida útil/ciclo	Costo operativo (USD/m <sup>3</sup> )	Notas
Bone char	EBCT 10–30 min	3–5 regeneraciones	0.05–0.15	Local, sostenible
Alúmina activada	EBCT 5–15 min	3–5 regeneraciones	0.10–0.25	Sensibilidad a pH
Nanofiltración	5–10 bar	Membrana 3–5 años	0.40–0.80	Agua de rechazo

Ósmosis inversa	10–20 bar	Membrana 3–5 años	0.60–1.20	Rechazo salino, O&M alto
--------------------	-----------	----------------------	-----------	--------------------------------

## ANEXO D. Resumen de criterios NOM-127-SSA1-2021 aplicables a defluoridación

Resumen conceptual de criterios normativos dirigidos a sistemas de potabilización con objetivo de remoción de fluoruro ( $F^-$ ).

### D.1 Parámetros y límites

Parámetro	Límite	Observaciones
Fluoruro ( $F^-$ )	$\leq 1.5$ mg/L (meta 1.0)	Control progresivo; monitoreo de cumplimiento
pH	6.5–8.5	Operar cercano a ~6 para máxima adsorción en BC
Turbidez	$< 5$ NTU	Prefiltrado requerido si turbidez elevada
Color aparente	$< 15$ U Pt-Co	Posfiltrado con GAC si hay coloración
Cloro residual libre	0.2–1.5 mg/L	Desinfección posterior a tratamiento

### D.2 Evidencias mínimas de control operativo

Evidencia	Periodicidad	Registro
Medición de $F^-$ en efluente	Diaria/Semanal	Bitácora (Anexo B.1)
Verificación de ruptura Ct/C0	Diaria	Anexo B.2

Registro de regeneraciones	de	Cada evento	Anexo B.3
Calibración de instrumentos	de	Mensual	Certificados/Bitácora

### D.3 Responsabilidades

<b>Rol</b>	<b>Responsabilidad</b>
Operador/a	Monitoreo, registros y acciones correctivas
Responsable técnico	Validación de datos, autorización de regeneración
Comité de agua	Auditoría interna y comunicación a la comunidad