

Análisis Integral de la Calidad del Agua Superficial, Métodos de Tratamiento y Usos Potenciales en México

1. Introducción

México, al igual que numerosas naciones, se enfrenta a desafíos considerables en la gestión de sus recursos hídricos superficiales. La creciente demanda de agua, la variabilidad climática y la persistente contaminación antropogénica ejercen una presión significativa sobre estos ecosistemas acuáticos. En este contexto, la calidad del agua superficial se convierte en un factor determinante para su idoneidad en una amplia gama de usos, que abarcan desde el consumo humano directo hasta las actividades agrícolas y la preservación de la biodiversidad acuática. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través de sus programas de monitoreo y su marco normativo, proporciona información esencial que subraya la necesidad de un enfoque integral para la evaluación, el tratamiento y la gestión sostenible de este recurso vital.¹

El presente reporte tiene como objetivo principal investigar y analizar los métodos disponibles para el tratamiento del agua de cuerpos de agua superficiales. Se explorará la viabilidad de su purificación y potabilización, y se establecerán los usos permisibles en función de los parámetros de calidad del agua. Toda la información presentada se fundamenta en investigaciones científicas rigurosas, publicaciones académicas y la normativa mexicana vigente, incluyendo datos proporcionados por CONAGUA. La estructura del reporte se ha diseñado para abordar sistemáticamente estos puntos, comenzando con una caracterización detallada de la calidad del agua, para luego explorar las tecnologías de tratamiento aplicables y, finalmente, correlacionar la calidad del agua tratada con sus diversas aplicaciones potenciales.

La gestión de la calidad del agua en México se rige por un robusto marco normativo. Entre las disposiciones más relevantes se encuentra la Ley de Aguas Nacionales y diversas Normas Oficiales Mexicanas (NOMs). Para el agua destinada a uso y consumo humano, la NOM-127-SSA1-2021 establece los límites permisibles de calidad que deben cumplirse.³ En cuanto a las descargas de aguas residuales que inciden en

los cuerpos de agua superficiales, la NOM-001-SEMARNAT-2021 define los límites máximos permisibles de contaminantes para proteger los cuerpos receptores propiedad de la nación.⁴ Adicionalmente, la NOM-011-CONAGUA-2015 se centra en la conservación del recurso hídrico y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.¹ Estos documentos, junto con los criterios de calidad específicos de CONAGUA detallados en las "Escalas Superficial" ⁵, constituyen la base fundamental para el análisis expuesto en este informe.

2. Parámetros de Calidad del Agua Superficial y sus Criterios (Según CONAGUA - Escalas Superficial)

La evaluación de la calidad del agua superficial es un proceso complejo que se sustenta en el análisis de una serie de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Cada uno de estos parámetros posee criterios específicos que permiten determinar el grado de contaminación del agua y, por ende, su aptitud para diferentes usos. Los datos proporcionados por CONAGUA en el documento "Escalas Superficial" ⁵ y las descripciones detalladas de los criterios de calidad ⁵ son fundamentales para esta caracterización.

Toxicidad (TOX)

La toxicidad es un parámetro crucial que mide el efecto adverso de sustancias o mezclas presentes en el agua sobre los organismos acuáticos. Sirve como un indicador integral de la presencia de contaminantes potencialmente dañinos. Los criterios de calidad para la toxicidad se clasifican de la siguiente manera: "No tóxico" para valores de TOX menores a 1; "Toxicidad baja" para valores entre 1 y 1.33 (inclusive); "Toxicidad moderada" para valores mayores a 1.33 y menores a 5; y "Toxicidad alta" para valores iguales o mayores a 5.⁵

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) representan la cantidad de material sólido que se encuentra en suspensión en el agua, incluyendo partículas como polvo, limo, materia orgánica y diversos microorganismos. La presencia elevada de SST puede impactar negativamente la turbidez del agua, afectar la vida acuática al reducir la penetración de luz y la calidad del hábitat, y disminuir la eficiencia de los procesos de tratamiento posteriores. Los criterios de calidad son: "Excelente" ($SST \leq 25$), "Buena calidad" ($25 < SST \leq 75$), "Aceptable" ($75 < SST \leq 150$), "Contaminada" ($150 < SST \leq 400$) y "Fuertemente contaminada" ($SST > 400$).⁵

Enterococos Fecales (ENTEROC)

Los Enterococos Fecales son microorganismos utilizados como indicadores de contaminación fecal, lo que sugiere la posible presencia de patógenos causantes de enfermedades en el agua. Su relevancia es particularmente alta para evaluar la seguridad del agua destinada a uso recreativo con contacto primario y como fuente de agua potable. La clasificación de la calidad del agua según este parámetro es: "Excelente" ($ENTEROC \leq 100$), "Buena calidad" ($100 < ENTEROC \leq 200$), "Contaminada" ($200 < ENTEROC \leq 500$) y "Fuertemente contaminada" ($ENTEROC > 500$).⁵

Escherichia coli (E_COLI)

Escherichia coli (E. coli) es un indicador aún más específico de contaminación fecal reciente, y su presencia se correlaciona directamente con riesgos para la salud humana.⁶ Es un parámetro crítico para determinar la potabilidad del agua y su seguridad para actividades de contacto primario. Los criterios de calidad para E. coli son: "Excelente" ($E_COLI \leq 126$), "Buena calidad" ($126 < E_COLI \leq 576$), "Aceptable" ($576 < E_COLI \leq 850$), "Contaminada" ($850 < E_COLI \leq 1000$) y "Fuertemente contaminada" ($E_COLI > 1000$).⁵

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presente en una muestra de agua. Este parámetro es un indicador de la carga total de contaminantes que pueden consumir oxígeno en el cuerpo de agua, afectando la vida acuática. La clasificación de la calidad del agua por DQO es: "Excelente" ($DQO \leq 10$), "Buena calidad" ($10 < DQO \leq 20$), "Aceptable" ($20 < DQO \leq 40$), "Contaminada" ($40 < DQO \leq 200$) y "Fuertemente contaminada" ($DQO > 200$).⁵

Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO5)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO5) cuantifica la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos durante la descomposición de la materia orgánica biodegradable en un período de cinco días. Es un indicador clave de la contaminación orgánica y su impacto directo en los niveles de oxígeno disuelto en el agua. Los criterios de calidad para DBO5 son: "Excelente" ($DBO \leq 3$), "Buena calidad" ($3 < DBO \leq 6$), "Aceptable" ($6 < DBO \leq 30$), "Contaminada" ($30 < DBO \leq 120$) y "Fuertemente contaminada" ($DBO > 120$).⁵

Coliformes Fecales Superficiales (COLI_FEC_superficiales)

Los Coliformes Fecales Superficiales, al igual que E. coli y Enterococos, son indicadores de contaminación fecal. Aunque la investigación reciente sugiere que E. coli y Enterococos pueden ser indicadores más fiables del riesgo para la salud humana ⁶, los coliformes fecales siguen siendo un parámetro regulatorio importante en la evaluación de la calidad del agua. Los criterios son: "Excelente" ($COLI_FEC \leq 100$), "Buena calidad" ($100 < COLI_FEC \leq 200$), "Aceptable" ($200 < COLI_FEC \leq 1000$), "Contaminada" ($1000 < COLI_FEC \leq 10000$) y "Fuertemente contaminada" ($COLI_FEC > 10000$).⁵

Porcentaje de Oxígeno Disuelto (OD_PORC)

El porcentaje de Oxígeno Disuelto (OD_PORC) es un parámetro fundamental para la salud de los ecosistemas acuáticos, ya que el oxígeno es vital para la supervivencia de la mayoría de las especies acuáticas. Valores bajos de oxígeno disuelto indican una alta contaminación orgánica y un consumo excesivo de oxígeno por procesos de descomposición, mientras que valores muy altos (sobresaturación) pueden ser indicativos de proliferación de algas. Los criterios de calidad son: "Excelente" ($70 < OD \leq 110$), "Buena calidad" ($50 < OD \leq 70$ o $110 < OD \leq 120$), "Aceptable" ($30 < OD \leq 50$ o $120 < OD \leq 130$), "Contaminada" ($10 < OD \leq 30$ o $130 < OD \leq 150$) y "Fuertemente contaminada" ($OD \leq 10$ o $OD > 150$).⁵

A continuación, se presenta una tabla que resume los criterios de calidad del agua para cada uno de los parámetros discutidos, consolidando la información de las "Escalas Superficial" de CONAGUA.⁵ Esta tabla es una herramienta esencial para una rápida referencia y comprensión de las clasificaciones de calidad del agua.

Tabla 1: Resumen de Criterios de Calidad del Agua por Parámetro (Según CONAGUA - Escalas Superficial)

Parámetro	Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente Contaminada
Toxicidad (TOX)	TOX < 1 (No tóxico)	$1 \leq TOX \leq 1.33$ (Toxicidad baja)	$1.33 < TOX < 5$ (Toxicidad moderada)	TOX ≥ 5 (Toxicidad alta)	N/A
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	SST ≤ 25	$25 < SST \leq 75$	$75 < SST \leq 150$	$150 < SST \leq 400$	SST > 400
Enterococos Fecales (ENTEROC)	ENTEROC ≤ 100	$100 < ENTEROC \leq 200$	N/A	$200 < ENTEROC \leq 500$	ENTEROC > 500
Escherichia coli	E_COLI ≤ 126	$126 < E_COLI \leq 576$	$576 < E_COLI \leq 850$	$850 < E_COLI \leq$	E_COLI > 1000

(E_COLI)				1000	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	$DQO \leq 10$	$10 < DQO \leq 20$	$20 < DQO \leq 40$	$40 < DQO \leq 200$	$DQO > 200$
Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO5)	$DBO \leq 3$	$3 < DBO \leq 6$	$6 < DBO \leq 30$	$30 < DBO \leq 120$	$DBO > 120$
Coliformes Fecales Superficiales (COLI_FEC)	$COLI_FEC \leq 100$	$100 < COLI_FEC \leq 200$	$200 < COLI_FEC \leq 1000$	$1000 < COLI_FEC \leq 10000$	$COLI_FEC > 10000$
Oxígeno Disuelto (OD_PORC)	$70 < OD \leq 110$	$50 < OD \leq 70$ o $110 < OD \leq 120$	$30 < OD \leq 50$ o $120 < OD \leq 130$	$10 < OD \leq 30$ o $130 < OD \leq 150$	$OD \leq 10$ o $OD > 150$

El análisis de los datos de monitoreo de CONAGUA (CASUP_12-23.csv) revela una situación preocupante en la calidad del agua superficial en México.⁵ Una parte considerable de los cuerpos de agua monitoreados se clasifica como "Contaminada" o "Fuertemente contaminada" para múltiples parámetros. Por ejemplo, sitios como "DESARROLLOS INDUSTRIALES DE AGUASCALIENTES (AGUAS ABAJO)" (DLAGU20) y "RIO SAN PEDRO AGUAS ARRIBA DE LA CD DE AGUASCALIENTES" (DLAGU22) en Aguascalientes, o "RA-19 RIO SAN FRANCISCO, ANTES DE LA CONFLUENCIA CON EL RIO ATOYAC" (DLPUE1975) en Puebla, muestran consistentemente niveles elevados de DBO, DQO, SST, Coliformes Fecales, E. coli y toxicidad, ubicándose en las categorías de mayor impacto. Esta condición no es un fenómeno aislado, sino una tendencia generalizada observada en diversas regiones del país. La prevalencia de esta alta contaminación indica que la mayoría de los cuerpos de agua superficiales en México requerirán tratamientos extensivos y avanzados para ser aptos para usos sensibles, como el consumo humano o la recreación de contacto primario. La escala del problema implica que no basta con ajustar un único parámetro, sino que se requiere una remediación integral, lo que aumenta la complejidad técnica y los costos asociados a la potabilización y purificación del agua a gran escala.

Además, existe una fuerte interdependencia entre los parámetros de contaminación orgánica y los indicadores microbiológicos, así como el oxígeno disuelto. La DBO5 y la DQO miden la cantidad de materia orgánica biodegradable y total, respectivamente, presente en el agua.⁵ Los coliformes fecales, E. coli y Enterococos son indicadores de contaminación fecal, la cual es predominantemente orgánica.⁵ La actividad metabólica de los microorganismos, al descomponer esta materia orgánica, consume el oxígeno disuelto en el agua.⁵ Al examinar los datos de sitios con alta DBO y DQO, se observa sistemáticamente que los niveles de coliformes fecales y E. coli también son elevados, y el porcentaje de oxígeno disuelto tiende a ser bajo. Esta relación causal significa que la presencia de materia orgánica en el agua proporciona un sustrato para el crecimiento de microorganismos, incluyendo patógenos. A medida que estos microorganismos se multiplican y metabolizan la materia orgánica, agotan el oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, lo que a su vez afecta negativamente la vida acuática y reduce la capacidad natural de autodepuración del ecosistema. Por lo tanto, un tratamiento eficaz no puede abordar estos parámetros de forma aislada; la eliminación de la materia orgánica es un paso fundamental que, simultáneamente, contribuirá a la mejora de los niveles de oxígeno disuelto y a la reducción de la carga microbiana, facilitando así la desinfección final. Esto subraya la necesidad de procesos de tratamiento secuenciales y complementarios para lograr una purificación integral del agua.

3. Viabilidad de Purificación y Potabilización del Agua Superficial

La purificación del agua superficial es un proceso esencial que implica la eliminación de impurezas físicas, químicas y biológicas con el fin de hacerla segura para un uso específico. Cuando el objetivo es el consumo humano, el proceso se denomina potabilización y exige el cumplimiento de los más altos estándares de calidad, como los establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 en México.³ Los procesos de tratamiento buscan transformar el agua cruda, cuya calidad puede variar significativamente (como se evidencia en los datos de CONAGUA⁵), en agua que cumpla con los límites permisibles para los parámetros de calidad.⁵

Factores que Influyen en la Selección del Tratamiento

La elección y el diseño del sistema de tratamiento de agua son influenciados por varios factores críticos:

- **Calidad del Agua Cruda:** La composición del agua superficial en su estado original es el factor más determinante para seleccionar y configurar el tren de tratamiento.⁷ Aguas clasificadas como "Fuertemente contaminadas" según los parámetros de CONAGUA ⁵ requerirán procesos de tratamiento significativamente más complejos y robustos que aquellas de "Buena calidad". Por ejemplo, un agua con alta DBO5 y DQO necesitará tratamientos para la materia orgánica, mientras que una con altos coliformes fecales demandará una desinfección más intensiva.
- **Uso Final Deseado:** Los requisitos de calidad del agua varían drásticamente en función de su aplicación final. El agua para consumo humano (potable) tiene los estándares más estrictos, seguida por el agua para riego agrícola, uso industrial o recreativo.⁷ El tratamiento se ajusta para cumplir con estos estándares específicos, optimizando así la inversión y los recursos. No sería eficiente aplicar un tratamiento de potabilización completo a agua destinada únicamente para riego, a menos que la contaminación inicial lo requiera para proteger los cultivos o el suelo.
- **Costo y Sostenibilidad:** La selección de tecnologías de tratamiento también debe considerar la viabilidad económica, el consumo energético asociado, la generación de subproductos (como lodos) y la huella ambiental general del proceso. Existe una búsqueda constante de soluciones innovadoras que sean más económicas, eficientes y con menor impacto ambiental, especialmente para la recuperación de recursos como nutrientes y el agua misma.¹² Esto incluye la consideración de tecnologías que minimicen el uso de productos químicos o que permitan la reutilización del agua tratada.

4. Métodos de Tratamiento y Purificación de Aguas Superficiales

El tratamiento de aguas superficiales es un proceso multifásico que integra métodos físicos, químicos y biológicos para eliminar una amplia gama de contaminantes. La configuración específica de un sistema de tratamiento, o "tren de tratamiento", depende en gran medida de la calidad del agua cruda y del uso final previsto.

4.1. Métodos Físicos

Los métodos físicos son a menudo los primeros pasos en las plantas de tratamiento de agua y se centran en la eliminación de sólidos y partículas.

Clarificación (Coagulación, Floculación, Sedimentación)

Estos procesos son fundamentales en la mayoría de las plantas potabilizadoras.⁷ Su objetivo es remover los sólidos suspendidos y coloidales que causan turbidez en el agua.

- **Coagulación:** En esta etapa inicial, se añaden reactivos químicos, conocidos como coagulantes (frecuentemente sales de aluminio o hierro), al agua. Estas sustancias tienen una carga positiva que neutraliza las cargas negativas de las partículas suspendidas y coloidales, desestabilizándolas y permitiendo que comiencen a aglomerarse en pequeños grupos.¹⁴ Este proceso es crucial para la posterior formación de flóculos más grandes.
- **Floculación:** Después de la coagulación, se introduce un polímero en el agua. Este polímero actúa como un puente entre las partículas desestabilizadas, haciendo que los pequeños grupos formados durante la coagulación crezcan en tamaño y resistencia. Estos agregados más grandes se denominan flóculos.¹⁴ Durante la floculación, también se logra la eliminación de algas y plancton presentes en el agua.¹³
- **Sedimentación:** Una vez formados los flóculos de mayor tamaño y peso, el agua pasa a tanques de sedimentación. Aquí, debido a la fuerza de la gravedad, los flóculos se asientan lentamente en el fondo del tanque, separándose del agua más clara en la superficie.⁹ Este paso es vital para reducir la carga de sólidos suspendidos antes de que el agua avance a la siguiente etapa de filtración.⁹ Los lodos resultantes de la sedimentación deben ser gestionados adecuadamente.⁹

Filtración (Medios Granulares, Membranas)

La filtración es un proceso de purificación que remueve los sólidos suspendidos restantes que no fueron eliminados en la sedimentación.¹⁷ El agua limpia atraviesa diversos filtros que tamizan partículas disueltas, gérmenes, polvo, agentes químicos, parásitos, bacterias y virus.¹⁴

- **Filtros de Medios Granulares:** Estos filtros utilizan materiales porosos como arena, grava o carbón activado para atrapar impurezas.⁷ Pueden ser de flujo lento o rápido.¹⁴ Los filtros Natzeo, por ejemplo, son eficaces para eliminar impurezas físicas como sedimentos y trazas de metales pesados debido a sus características iónicas.¹⁹ Sin embargo, no son tan efectivos para eliminar microbios o sustancias químicas dañinas.¹⁹ Estos filtros requieren retrolavado periódico para eliminar los desechos acumulados y restaurar su capacidad de filtrado.¹⁹
- **Filtración por Membranas (Ultrafiltración y Ósmosis Inversa):** Estas son tecnologías avanzadas que ofrecen una purificación más fina del agua.¹⁹
 - **Ultrafiltración (UF):** Es una tecnología eficaz para asegurar un suministro consistente de agua ultrapura en términos de partículas, bacterias y pirógenos.²¹ Las membranas de UF tienen poros más pequeños que los filtros de medios granulares, lo que les permite retener partículas, microorganismos y macromoléculas.
 - **Ósmosis Inversa (OI):** Es un método altamente efectivo y rentable para eliminar impurezas del agua, incluyendo sales disueltas, iones, partículas, bacterias y biomoléculas, mediante el uso de una membrana semipermeable.¹⁷ En este proceso, el agua residual atraviesa la membrana desde una zona más concentrada a una más diluida, bajo una presión diferencial que invierte el flujo osmótico natural.²² Más del 90% de las impurezas iónicas y la mayoría de las orgánicas son eliminadas.²⁰ La OI es especialmente útil cuando se busca disminuir la concentración de sales en el agua.¹⁷ Antes de la OI, se suele colocar un filtro de cartucho para retener partículas mayores a 1 micra, protegiendo así las membranas.¹⁷

4.2. Métodos Químicos

Los métodos químicos implican la adición de sustancias para tratar el agua, siendo esenciales para la desinfección y la eliminación de contaminantes específicos.

- **Adsorción (Carbón Activado Granular - CAG):** El carbón activado es un excelente adsorbente de compuestos orgánicos que pueden ser tóxicos o

impartir color, olor o sabor al agua.¹⁷ También puede actuar como agente reductor del cloro libre, convirtiéndolo en ion cloruro.¹⁷ Este método es parte del tratamiento terciario para remover fosfatos y nitratos.²² Sin embargo, los lechos de carbón activado requieren sanitización periódica para mitigar el riesgo de crecimiento biológico.²⁰

- **Coagulación y Floculación:** Aunque ya se mencionó como un proceso físico-químico, la adición de reactivos químicos (sales de aluminio o hierro) es la base de la coagulación, desestabilizando partículas suspendidas para su aglomeración.¹⁵
- **Ajuste de pH:** El control del pH es fundamental para optimizar la eficacia de muchos reactivos químicos y para proteger los equipos industriales de la corrosión o incrustación. Se utilizan ácidos o álcalis para mantener el pH dentro de los rangos deseados.¹⁵
- **Desinfección (Cloro, Ozono, UV):** La desinfección es una etapa crítica para eliminar o inactivar microorganismos patógenos.
 - **Cloración:** Es un método común y rentable para desinfectar el agua potable, eliminar olores y oxidar hierro y manganeso.¹⁵ El cloro inactiva los microorganismos dañando su membrana celular.¹⁸ La normativa mexicana establece una concentración de cloro libre residual de 0.5 a 1.5 mg/L para el agua potable.¹⁷ La cloración puede aplicarse en varias etapas: precloración, después de la sedimentación o como desinfectante final.¹⁸
 - **Ozonización:** El ozono (O₃) es un potente oxidante y desinfectante. Es eficaz en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas, eliminando una gran proporción de compuestos orgánicos, incluyendo antiinflamatorios, antibióticos y estrógenos.¹⁵ La ozonización deja un residual que es útil para proteger el agua contra la recontaminación bacteriana, especialmente en el envasado.¹⁷
 - **Luz Ultravioleta (UV):** La radiación UV se utiliza para fotooxidar compuestos orgánicos y, más importantemente, para destruir e inactivar bacterias y virus al dañar su ADN, impidiendo su reproducción.¹⁵ La ventaja principal es que desinfecta el agua sin añadir productos químicos, sin alterar su sabor u olor, y sin eliminar minerales beneficiosos.¹⁸
- **Eliminación de Dureza y Metales:**
 - **Suavización/Descalcificación:** Se recomienda suavizar el agua cuando la dureza total es superior a 170 mg/L (como CaCO₃) para evitar incrustaciones, especialmente antes de la ósmosis inversa.¹⁷ Este proceso reduce la dureza del agua mediante el intercambio de iones, generalmente utilizando resinas de intercambio iónico que intercambian iones de calcio y magnesio por iones de sodio.¹⁷ Las resinas deben regenerarse periódicamente con una solución

de cloruro de sodio.¹⁷

- **Precipitación Química:** En aguas con alta concentración de metales pesados, se utilizan reactivos químicos específicos para precipitar o intercambiar iones no deseados.¹⁵

4.3. Métodos Biológicos

Los tratamientos biológicos utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica y otros contaminantes en el agua residual. Son una opción efectiva y de bajo costo para la eliminación de materia orgánica disuelta y en suspensión, aunque requieren grandes superficies y son sensibles a factores como el pH y la temperatura.²⁶

- **Sistemas Aerobios:** En estos sistemas, el oxígeno es el aceptor final de electrones para los microorganismos. La materia orgánica es oxidada a dióxido de carbono y agua.²⁶ Ejemplos incluyen la aireación y los estanques de oxidación.²²
- **Sistemas Anaerobios:** En ausencia de oxígeno, la propia materia orgánica actúa como aceptor final de electrones. Este proceso puede generar biogás (metano) como subproducto.¹²
- **Biofiltración:** Utiliza un medio filtrante con biopelículas de microorganismos que degradan los contaminantes.²²
- **Remoción Biológica de Nitrógeno y Fósforo:** Procesos como la desnitrificación (conversión de nitrato a nitrógeno gas) y la oxidación anaerobia de amonio permiten la eliminación biológica de nutrientes.¹² Algunas investigaciones también exploran el uso de plantas acuáticas, como *Salvinia auriculata* y *Azolla caroliniana*, que han demostrado una capacidad del 100% para remover coliformes y *E. coli* en aguas residuales, además de acumular metales pesados y eliminar nitratos y fosfatos.²⁸

4.4. Tratamientos Avanzados y Tecnologías Innovadoras

Los tratamientos avanzados se aplican después de los procesos primarios y secundarios para reducir aún más la carga orgánica, la presencia de metales y

patógenos, o para abordar contaminantes emergentes.²²

- **Oxidación Avanzada (AOPs):** Incluyen técnicas como la oxidación húmeda (catalítica o no catalítica), la oxidación electroquímica, la fotocatálisis heterogénea y la irradiación gamma.²² Estos métodos generan especies oxidantes altamente reactivas (como radicales hidroxilo) que degradan compuestos orgánicos e inorgánicos complejos, incluso aquellos diluidos o resistentes a tratamientos convencionales.²² Por ejemplo, la oxidación húmeda catalítica con peróxido de hidrógeno y sales de hierro puede remover el 73% de colorantes y reducir la DBO y DQO significativamente.²²
- **Biorreactores de Membrana (MBR):** Combinan el tratamiento biológico con la filtración por membrana (generalmente ultrafiltración). Los sistemas MBR son altamente eficientes, eliminando hasta el 99% de la DBO y requiriendo menos espacio que los sistemas convencionales al no necesitar clarificadores.¹² Son robustos y pueden manejar variaciones en la calidad del agua afluente.²⁷
- **Electrodesionización (EDI):** Esta tecnología elimina especies ionizadas del agua combinando resinas de intercambio iónico y membranas selectivas de iones con corriente continua.²¹
- **Desmineralización:** Proceso que consiste en la remoción de los sólidos disueltos mediante intercambio iónico, dividiendo los iones en ácidos fuertes y débiles.²²

5. Usos del Agua Según Parámetros de Calidad

La calidad del agua es el factor primordial que determina su aptitud para diversos usos. La normativa mexicana, a través de CONAGUA y las NOMs, establece los criterios específicos para cada aplicación.

5.1. Agua para Uso y Consumo Humano (Potabilización)

El agua para uso y consumo humano debe ser segura, libre de contaminantes y microorganismos nocivos, y cumplir con la NOM-127-SSA1-2021.³ Los límites permisibles para esta categoría son los más estrictos.

- **Parámetros Críticos:**

- **Microbiológicos:** Ausencia o niveles muy bajos de E. coli, Coliformes Fecales y Enterococos. Un agua "Excelente" o "Buena calidad" en estos parámetros es fundamental.⁵ La presencia de estos indicadores se correlaciona con riesgos para la salud humana.⁶
- **Fisicoquímicos:** Bajos niveles de DBO5, DQO y SST (idealmente "Excelente" o "Buena calidad") para asegurar la ausencia de materia orgánica y turbidez.⁵ La toxicidad debe ser "No tóxica".⁵
- **Oxígeno Disuelto:** Aunque no es un parámetro directo de potabilidad, un OD "Excelente" o "Buena calidad" indica un ecosistema más saludable y menos carga orgánica inicial.⁵
- **Proceso de Potabilización Típico:** Para alcanzar estos estándares, el agua superficial generalmente pasa por un proceso que incluye: captación y cribado, coagulación-floculación, sedimentación, filtración (arena, carbón, o membranas avanzadas como UF/OI si es necesario), y desinfección (cloración, ozono, UV).⁷ La ósmosis inversa es necesaria cuando se busca disminuir la concentración de sales.¹⁷

5.2. Agua para Uso Agrícola (Riego)

El agua para riego agrícola debe cumplir con estándares que protejan los cultivos, el suelo y la salud de los consumidores. La NOM-001-SEMARNAT-1996 (ahora NOM-001-SEMARNAT-2021) establece límites para las descargas de aguas residuales, incluyendo las destinadas a riego.⁴

- **Parámetros Relevantes:**
 - **SST:** Niveles de SST "Buena calidad" o "Aceptable" son generalmente adecuados para riego, aunque niveles altos pueden causar obstrucción de sistemas de riego y afectar el suelo.⁵
 - **DBO5 y DQO:** Niveles "Aceptables" o "Contaminados" pueden ser tolerables si la materia orgánica es biodegradable y no contiene sustancias tóxicas que afecten los cultivos. Sin embargo, una alta carga orgánica puede promover el crecimiento de algas y consumir oxígeno en el suelo.⁵
 - **Microbiológicos:** Aunque los estándares son menos estrictos que para el agua potable, la presencia de E. coli y Coliformes Fecales debe ser controlada, especialmente para cultivos que se consumen crudos.⁵ Un agua con calidad "Aceptable" puede ser admisible como fuente de riego agrícola.⁵
 - **Toxicidad:** La toxicidad debe ser baja o nula para evitar daños a los cultivos y

la acumulación de sustancias nocivas en la cadena alimentaria.⁵

- **Tratamiento Común:** Para este uso, a menudo se aplican tratamientos primarios y secundarios, que reducen la DBO, DQO y sólidos suspendidos. Los procesos biológicos son comunes para reducir la materia orgánica.²²

5.3. Agua para Uso Recreativo (Contacto Primario y Secundario)

El agua para uso recreativo, especialmente de contacto primario (natación), requiere baja presencia de patógenos para proteger la salud humana.

- **Parámetros Críticos:**
 - **Enterococos Fecales y E. coli:** Estos son los indicadores más importantes para la seguridad en el contacto primario. Se busca una calidad "Excelente" o "Buena calidad" para minimizar el riesgo de enfermedades gastrointestinales.⁵
 - **SST y Turbidez:** Deben ser bajos para garantizar la visibilidad y una experiencia recreativa agradable.
- **Tratamiento Sugerido:** Desinfección efectiva mediante cloración o UV, y eliminación de sólidos suspendidos.

5.4. Agua para Uso Industrial

Los requisitos de calidad del agua industrial varían ampliamente según el proceso específico (ej., agua de enfriamiento, agua de proceso, agua de caldera).

- **Parámetros Variables:**
 - **Dureza:** La eliminación de dureza es crucial para evitar incrustaciones en equipos y tuberías, prolongando su vida útil y reduciendo costos operativos.¹⁵
 - **SST:** Niveles bajos de SST son importantes para prevenir obstrucciones y abrasión en equipos.⁵
 - **DQO/DBO:** Dependiendo del proceso, pueden requerirse niveles bajos de materia orgánica para evitar la formación de biopelículas o interferencias químicas.
 - **Metales Pesados:** La eliminación de metales pesados es fundamental para proteger los equipos y evitar la contaminación del producto final.¹⁵
- **Tratamiento Común:** Coagulación/floculación, filtración, suavización por

intercambio iónico, y tratamientos químicos específicos (agentes quelantes, inhibidores de corrosión).¹⁵

5.5. Agua para Uso Ecológico (Conservación de Ecosistemas Acuáticos)

Para la conservación de ecosistemas, el objetivo es mantener las condiciones naturales que permitan el florecimiento de la vida acuática.

- **Parámetros Clave:**
 - **Oxígeno Disuelto (OD_PORC):** Es el parámetro más crítico, ya que la mayoría de la vida acuática depende de niveles adecuados de oxígeno. Un OD "Excelente" o "Buena calidad" es ideal.⁵
 - **DBO5 y DQO:** Niveles bajos son esenciales para evitar la eutrofización y el agotamiento del oxígeno.⁵
 - **Toxicidad:** Debe ser "No tóxica" para proteger la flora y fauna acuática de efectos adversos.⁵
 - **SST:** Niveles bajos para permitir la penetración de luz y evitar la sedimentación excesiva que altera los hábitats.⁵
- **Tratamiento y Gestión:** La gestión de descargas de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-2021) es fundamental para proteger estos cuerpos de agua.⁴ Se busca la reducción de contaminantes orgánicos y tóxicos para permitir la autodepuración natural del ecosistema.

6. Conclusiones

El análisis exhaustivo de la calidad del agua superficial en México, basado en los criterios de CONAGUA y los datos de monitoreo, revela una realidad compleja y desafiante. Una proporción considerable de los cuerpos de agua se encuentra en estados de "Contaminada" o "Fuertemente contaminada" para múltiples parámetros clave, incluyendo DBO5, DQO, SST, Coliformes Fecales, E. coli y Toxicidad.⁵ Esta situación subraya la necesidad imperante de tratamientos de agua robustos y multifacéticos para hacer que estos recursos sean aptos para diversos usos.

La interconexión de los parámetros de contaminación es evidente: altas cargas

orgánicas (DBO5, DQO) se correlacionan directamente con bajos niveles de oxígeno disuelto y una elevada presencia de indicadores microbiológicos de contaminación fecal (Coliformes Fecales, E. coli, Enterococos).⁵ Esto significa que la materia orgánica no solo consume oxígeno vital para la vida acuática, sino que también sirve de sustrato para el crecimiento de microorganismos patógenos. Por lo tanto, un enfoque de tratamiento integral que aborde la eliminación de la materia orgánica es fundamental, ya que esto tendrá un efecto cascada positivo en la mejora de los niveles de oxígeno y la reducción de la carga microbiana, facilitando la desinfección final.

La viabilidad de purificar y potabilizar el agua superficial en México es técnicamente posible, pero su complejidad y costo dependen directamente de la calidad del agua cruda y del uso final deseado. Aguas con alta contaminación inicial requerirán una combinación de tratamientos físicos (coagulación, floculación, sedimentación, filtración granular o por membranas), químicos (adsorción con carbón activado, ajuste de pH, desinfección con cloro, ozono o UV) y biológicos (sistemas aerobios, anaerobios, MBR).⁷ Tecnologías avanzadas como la ósmosis inversa y los procesos de oxidación avanzada son indispensables para la eliminación de sales, contaminantes emergentes y toxicidad residual, especialmente cuando el objetivo es la potabilización o usos industriales de alta pureza.¹⁷

La normativa mexicana, a través de la NOM-127-SSA1-2021 para agua potable y la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas, proporciona el marco legal necesario para la gestión de la calidad del agua.³ Sin embargo, la persistencia de altos niveles de contaminación en muchos cuerpos de agua superficiales indica que la implementación y el cumplimiento de estas normativas, así como la inversión en infraestructura de tratamiento, siguen siendo desafíos críticos. Es esencial que las decisiones sobre el tratamiento del agua se basen en una evaluación rigurosa de los parámetros de calidad específicos del sitio, considerando no solo los límites permisibles para el uso deseado, sino también la eficiencia y sostenibilidad de las tecnologías aplicadas.

Para avanzar en la gestión del agua superficial en México, se recomienda:

1. **Fortalecer el Monitoreo y la Caracterización:** Continuar y expandir los programas de monitoreo de CONAGUA para obtener una caracterización más precisa y en tiempo real de la calidad del agua, lo que permitirá una toma de decisiones más informada sobre los tratamientos necesarios.
2. **Inversión en Infraestructura de Tratamiento Avanzado:** Priorizar la inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales con tecnologías avanzadas (como

MBR, OI y AOPs) en áreas donde los cuerpos de agua superficiales están fuertemente contaminados, especialmente si se consideran como fuentes de agua potable o para usos sensibles.

3. **Promover la Reutilización del Agua Tratada:** Fomentar la reutilización del agua tratada para usos no potables, como el riego agrícola o industrial, lo que reduciría la presión sobre los recursos hídricos frescos y minimizaría la descarga de contaminantes en los cuerpos de agua naturales.¹⁴
4. **Investigación y Desarrollo de Soluciones Sostenibles:** Apoyar la investigación en tecnologías de tratamiento de bajo costo, alta eficiencia y menor impacto ambiental, incluyendo soluciones biológicas innovadoras como el uso de plantas acuáticas para la remoción de contaminantes.²⁸
5. **Educación y Conciencia Pública:** Aumentar la conciencia pública sobre la importancia de la calidad del agua y las prácticas de gestión sostenible para reducir la contaminación en la fuente.

Fuentes citadas

1. NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. - DOF, acceso: agosto 13, 2025, https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5633/semarnat11_C/semarnat11_C.html
2. Normas del sector agua - Comisión Técnica del Agua del Estado de México, acceso: agosto 13, 2025, http://ctaem.edomex.gob.mx/normas_sector_agua
3. NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua - DOF, acceso: agosto 13, 2025, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705
4. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes - PAOT, acceso: agosto 13, 2025, https://paot.org.mx/centro/normas_a/2022/2022_03_11_MAT_semarnat.pdf
5. Calidad_del_Agua_Superficial_p.xlsx
6. Evaluación de coliformes termotolerantes y Enterococcus como indicadores de calidad de agua en la cuenca del Arroyo Maldonado - Colibri, acceso: agosto 13, 2025, <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/33088/1/Evaluaci%C3%B3n%20de%20coliformes%20termotolerantes%20y%20enterococcus%20como%20indicadores%20de%20calidad%20de%20agua%20en%20la%20cuenca%20del%20Arroyo%20Maldonado.%20Gonz%C3%A1lez%20P%C3%A9rez%20C%C3%ADn.%202022.pdf>
7. Conoce el tratamiento del agua para consumo humano, acceso: agosto 13, 2025, <https://marketb2b.mx/Portal/Blog/129/tratamiento-del-agua-para-consumo-humano>
8. NOM-127-SSA1-1994 - Secretaría de Salud, acceso: agosto 13, 2025,

- <https://salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
9. Tratamiento de aguas superficiales | Agua potable limpia - NEWater, acceso: agosto 13, 2025,
<https://www.newater.com/es/hacer-que-el-agua-superficial-sea-segura-para-beber/>
 10. Capítulo 3. Usos del Agua, acceso: agosto 13, 2025,
https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Capitulo_3.pdf
 11. Informe del Medio Ambiente - SEMARNAT, acceso: agosto 13, 2025,
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
 12. Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño - OAPEN Library, acceso: agosto 13, 2025,
<https://library.oapen.org/bitstream/20.500.12657/30973/1/640701.pdf>
 13. Fases del agua en una planta potabilizadora - EADIC, acceso: agosto 13, 2025,
<https://eadic.com/blog/entrada/fases-del-agua-en-una-planta-potabilizadora/>
 14. Las 4 etapas del proceso de potabilización del agua - Inesem, acceso: agosto 13, 2025,
<https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/potabilizacion-aguas-residuales/>
 15. Tratamiento químico del agua: ¿cómo funciona y cuándo se utiliza? - Contyquim, acceso: agosto 13, 2025,
<https://contyquim.com/blog/tratamiento-quimico-del-agua-como-funciona-y-cuando-se-utiliza>
 16. ¿Qué es una planta potabilizadora? | Comisión Nacional del Agua - Gob MX, acceso: agosto 13, 2025,
<https://www.gob.mx/conagua/articulos/que-es-una-planta-potabilizadora?idiom=es>
 17. 7 pasos del proceso de Purificación de agua - Carbotecnia, acceso: agosto 13, 2025,
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/proceso-de-purificacion-de-agua/>
 18. ▷ 10 Métodos de Purificación de agua altamente efectivos - Filtrashop, acceso: agosto 13, 2025,
<https://filtrashop.com/10-metodos-de-purificacion-de-agua-mas-usados-y-efectivos/>
 19. Comprensión de los métodos de tratamiento de agua más comunes, acceso: agosto 13, 2025,
<https://es.genesiswatertech.com/entrada-en-el-blog/m%C3%A9todos-de-tratamiento-de-agua-m%C3%A1s-comunes/>
 20. Top 5 Tecnologías Innovadoras para Purificar el agua - Tramex Ambiental, acceso: agosto 13, 2025,
<https://tramexambiental.com/2024/03/25/tecnologias-de-purificacion-de-agua/>
 21. Tecnologías de purificación de agua - ELGA LabWater, acceso: agosto 13, 2025,
<https://es.elgalabwater.com/technologies>
 22. Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales* - Redalyc,

- acceso: agosto 13, 2025, <https://www.redalyc.org/journal/911/91170297009/html/>
23. Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales* - Dialnet, acceso: agosto 13, 2025, <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10103224.pdf>
24. Tres Métodos de Tratamiento del Agua, acceso: agosto 13, 2025, <https://es.irowater.com/tres-metodos-de-tratamiento-del-agua/>
25. Productos Químicos utilizados en diversos procesos de tratamiento de agua, acceso: agosto 13, 2025, <https://espanol.noahchemicals.com/blog/productos-quimicos-utilizados-en-diversos-procesos-de-tratamiento-de-agua/>
26. Tratamiento biológico de aguas residuales - Condorchem Enviro Solutions, acceso: agosto 13, 2025, <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>
27. Reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) en las aguas residuales - Sigmadaf, acceso: agosto 13, 2025, <https://sigmadafclarifiers.com/reduccion-de-la-demanda-biologica-de-oxigeno-dbo-en-las-aguas-residuales/>
28. Potencial de plantas acuáticas para la remoción de coliformes totales y Escherichia coli en aguas servidas - Redalyc, acceso: agosto 13, 2025, <https://www.redalyc.org/journal/5722/572262097013/html/>
29. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-ECOL-1996, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS, acceso: agosto 13, 2025, <http://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nom001semarnat1996.htm>
30. Calidad de aguas superficiales: estudio de la quebrada Estero, ubicada en el cantón de San Ramón, Costa Rica - Dialnet, acceso: agosto 13, 2025, <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5821477.pdf>
31. Sólidos totales y disueltos (TSS y TDS) - Parámetros de calidad del agua | Hach, acceso: agosto 13, 2025, <https://es.hach.com/parameters/solids>