



INSTITUTO COSTARRICENSE DE  
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

UEN Investigación y Desarrollo  
Área Funcional Investigación Aplicada

# Catálogo de Plantas Potabilizadoras tipo “Plug and Play”

Fase IV y V: Tecnologías convencionales y  
no convencionales

Fecha de entrega: 23 de junio de 2021

CONSECUTIVO DEL DOCUMENTO: **2021-106-113**

Elaborado por:  
Rodolfo Araya Álvarez

Revisado por:  
Andrés Lazo Páez

Aprobado por:  
German Mora Rodríguez

**AUTORIZACIÓN DE CESIÓN DE DERECHOS PARA PUBLICACIÓN EN EL  
CATÁLOGO DE ACCESO PÚBLICO EN LÍNEA (OPAC) y REPOSITORIO DIGITAL  
DEL CEDI**

Se autoriza al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio digital y Catálogo en línea (OPAC) del presente documento de interés bibliográfico.

<b>Nombre y apellidos de cada autor (a)</b>	<b>N° de cédula de identidad</b>	<b>Correo electrónico o teléfono institucional</b>	<b>Firma</b>
Rodolfo Araya Álvarez	1-1048-0955	rodaraya@aya.go.cr	



## RESUMEN EJECUTIVO


En este documento, se presentan los resultados obtenidos en la Fase IV del proyecto de investigación denominado Catálogo de Plantas Potabilizadoras tipo “Plug and Play”. Consiste en un análisis de fuentes bibliográficas, complementado por la experiencia profesional adquirida y el estudio de mercado realizado en la Fase III. De la información mencionada y basado en las afectaciones a la calidad del agua definidas en fases anteriores, se realiza un documento que identifica y caracteriza brevemente las tecnologías existentes para remover los contaminantes seleccionados.

Como parte de los objetivos específicos se identifica, referencia y recomienda consultar algunas fuentes bibliográficas que presentan mayor detalle sobre las tecnologías en estudio. Adicionalmente, se presentan las tecnologías convencionales y no convencionales existentes en el mercado y se señalan algunos aspectos clave a considerar a la hora de evaluar alternativas para los proyectos de abastecimiento de agua que requieren procesos de potabilización. Finalmente, la información mencionada para cada uno de los contaminantes en estudio se resume en un documento en formato pdf con el fin de hacer más sencillo y atractivo el análisis de estas.



## TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Antecedentes.....	6
1.2. Justificación.....	7
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo General.....	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
1.3.3. Alcance.....	8
1.3.4. Limitaciones.....	9
2. METODOLOGÍA.....	9
2.1. Marco metodológico.....	9
2.2. Conformación del equipo.....	10
2.3. Actividades realizadas.....	10
3. RESULTADOS.....	11
3.1. Fuentes de información.....	12
3.2. Remoción de color y turbiedad.....	15
3.2.1. Tecnología convencional.....	15
3.2.2. Tecnología no convencional.....	16
3.3. Calcio y sulfatos.....	17
3.3.1. Tecnología convencional.....	17
3.3.2. Tecnología no convencional.....	17
3.4. Aluminio.....	18
3.4.1. Tecnología convencional.....	18
3.4.2. Tecnología no convencional.....	19
3.5. Nitratos.....	20

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 5 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	N° de Versión: 01

3.5.1. Tecnologías no convencionales.....	20
3.6. Plaguicidas.....	21
3.6.1. Tecnologías no convencionales.....	21
3.7. Hierro y manganeso.....	22
3.7.1. Tecnologías convencionales.....	22
3.7.2. Tecnologías no convencionales.....	23
3.8. Arsénico.....	24
3.8.1. Tecnologías no convencionales.....	24
3.9. Costos de capital de proyectos de potabilización.....	25
3.10. Selección de tecnologías o alternativas.....	27
4. CONCLUSIONES.....	29
5. RECOMENDACIONES.....	32
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
7. CONTROL DE CAMBIOS DEL DOCUMENTO.....	36
8. APÉNDICES.....	37
9. ANEXOS.....	38

### **TABLA DE CUADROS**

Cuadro 1. Funcionarios que participaron del desarrollo de este informe.....	10
Cuadro 2. Fuentes de información para los contaminantes en estudio.....	14



## 1. INTRODUCCIÓN

En la [Fase I](#) de este proyecto se identificaron las principales afectaciones fisicoquímicas del agua para consumo humano en los sistemas operados por el AyA y por los Sistemas Delegados. En la [Fase II](#) se establecieron los principales requerimientos de información a solicitar a los posibles proveedores respecto a alternativas de tratamiento para remover los contaminantes identificados.


Para la [Fase III](#) de la investigación y de acuerdo con la información existente en las bases de datos del Área Funcional de Investigación Aplicada, se seleccionaron los contaminantes que iban a ser objeto del estudio de mercado. Las afectaciones identificadas en la Fase I que no se incluyeron en la investigación de mercado, se complementaron con la información existente mencionada.

Cuatro empresas privadas participaron del estudio de mercado, aportando detalles sobre posibles tecnologías de potabilización tipo “plug and play”. Con los insumos obtenidos en la investigación, más todo aquello existente en las bases de datos de Investigación Aplicada, se consolidó el estudio de mercado.

En este documento se presentan las tecnologías convencionales y no convencionales utilizadas para remover los contaminantes mencionados, se incluyen consideraciones técnicas y comerciales para su implementación y algunos otros aspectos de interés. Es importante indicar que los detalles específicos de cada tecnología se encuentran en las referencias bibliográfica recomendadas y utilizadas.

### 1.1. Antecedentes

El presente informe corresponde a la cuarta etapa del proyecto denominado: *Catálogo de Plantas Potabilizadoras tipo “Plug and Play”*. Responde a los objetivos planteados en el [Perfil del Proyecto](#) y como se mencionó anteriormente, lo anteceden tres informes de fase. Este trabajo se enfoca en una descripción breve de las tecnologías convencionales

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 7 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	<b>N° de Versión: 01</b>

y no convencionales existentes para la remoción de las siguientes afectaciones a la calidad:

1. Color y turbiedad.
2. Calcio y sulfatos.
3. Aluminio.
4. Nitratos.
5. Plaguicidas.
6. Hierro y manganeso.
7. Arsénico.

## **1.2. Justificación**

Conocer las características generales de los sistemas de potabilización existentes para remover contaminantes de interés es de suma importancia para poder definir: los procesos y operaciones que los integran, su funcionamiento, parámetros base de dimensionamiento y limitaciones existentes de las tecnologías. Adicionalmente, los sistemas deben existir en el mercado, haber sido probados y utilizados con éxito y contar con representación técnica y comercial.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Caracterizar las tecnologías convencionales y no convencionales existentes en el mercado, utilizadas para remover los contaminantes en estudio.



### 1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar las tecnologías existentes en el mercado para tratar las afectaciones a la calidad del agua consideradas como prioritarias para el AyA.
- Determinar y describir brevemente los principales procesos y operaciones que componen las tecnologías identificadas.
- Realizar una caracterización básica de aspectos técnicos y comerciales que se deben de considerar para la formulación de proyectos de potabilización con tecnologías no convencionales tipo “plug and play”.

### 1.3.3. Alcance

Esta investigación sirve de insumo para todas las Áreas Funcionales a cargo de realizar diseños de sistemas de agua potable, tanto a nivel de AyA (UEN Programación y Control) como a nivel de la Subgerencia de Sistemas Delegados (UEN Administración de Proyectos). Lo anterior, al ser un documento que describe de forma general las tecnologías utilizadas para remover los contaminantes fisicoquímicos más frecuentemente encontrados en las aguas de los sistemas operados por el AyA y por los Sistemas Delegados.

Adicionalmente, es importante mencionar que, al realizar esta fase de la investigación se toma la decisión de incorporar a la misma una base de datos con los costos de capital de 36 proyectos de potabilización de AyA. Los anteriores, corresponden a obras construidas y en funcionamiento y otros son parte de estudios de mercado o cotizaciones existentes. Esto se realiza con el fin de facilitar el acceso a la documentación e información a los lectores de este documento. Esta actividad hace que los objetivos por alcanzar en la Fase V de esta investigación se incorporen en esta etapa; por lo que no se realizará un informe aparte para Fase V y esta investigación queda concluida.



### 1.3.4. Limitaciones

A pesar de todos los esfuerzos realizados por el investigador, las principales limitaciones encontradas para el desarrollo de la Fase IV de este proyecto fueron:

1. Algunas de las tecnologías en estudio no se encuentran aplicadas en el sector de agua para consumo humano en Costa Rica, lo que afecta la validación de cierta información. Por ejemplo: no se cuenta en Costa Rica con sistemas para remover nitratos; por lo anterior, se debe utilizar la información descrita en la bibliografía y por las empresas de procesos de tratamiento del agua para conocer la eficiencia y parámetro de funcionamiento de los sistemas.
2. La información que se presenta en este documento no incluye el detalle de los procesos ni los costos de los sistemas para gestión de aguas y lodos residuales. Mucha de la información proviene de estudios de mercado, la cual podría no haberse obtenido si se adicionaban esos procesos.
3. Aproximadamente la mitad de las afectaciones a la calidad del agua objeto de este estudio, no se tratan actualmente en Costa Rica en el sector de agua para consumo humano. Lo anterior provoca que de alguna manera esos contaminantes sean no convencionales para este estudio y limitan el acceso a información aplicada a nivel costarricense.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Marco metodológico

Se procedió a buscar información bibliográfica sobre tecnologías para la remoción de los contaminantes indicados en la sección 1.1. Adicionalmente, el Área Funcional de Investigación Aplicada posee una base de datos de referencias bibliográficas de muy buena calidad, las cuales fueron consultadas y referenciadas en este documento. En estas fuentes de información se encuentran detalles acerca de los procesos que



componen los sistemas de tratamiento y recomendaciones de parámetros sanitarios para su dimensionamiento.

La documentación antes descrita se complementó con la información obtenida en el estudio de mercado realizado en la Fase III. Con todas estas referencias se procede a atender el objetivo general y los objetivos específicos de esta etapa.

## 2.2. Conformación del equipo

El equipo de trabajo para el desarrollo de este informe de avance es el que se presenta en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Funcionarios que participaron del desarrollo de este informe.**

Nombre	Área funcional donde labora	Función
Florentino Fernández Venegas	Subgerencia Ambiental, Investigación y Desarrollo	Contraparte técnica
Kattia Sánchez Sánchez	UEN Programación y Control	Contraparte técnica
Ann Marie Lotz Valverde	UEN Programación y Control	Contraparte técnica
German Mora Rodríguez	UEN ID	Revisión y aprobación del proceso e informe
Andrés Lazo Páez	UEN ID	Revisor
Rodolfo Araya Álvarez	UEN ID	Revisor

*Referencia: Elaboración propia.*

## 2.3. Actividades realizadas

Las actividades ejecutadas para el desarrollo de este informe de fase son las siguientes:

1. Realizar una búsqueda dentro de la literatura especializada sobre tratamiento de agua para consumo humano, respecto a las tecnologías utilizadas para remover los contaminantes indicados en el apartado 1.1 de este documento.



2. Determinar dentro de la información recibida para el estudio de mercado (Fase III) y la experiencia adquirida en el ejercicio profesional, las tecnologías propuestas para tratar los contaminantes mencionados.
3. Documentar de forma breve los principales procesos utilizados para potabilizar el agua que presenta las afectaciones a la calidad mencionadas en apartados anteriores.
4. Consolidar en un documento sencillo, las principales características técnicas y comerciales de los sistemas convencionales y no convencionales en estudio.

### 3. RESULTADOS

Según Edzwald (2011), al seleccionar y configurar la secuencia de procesos para el tratamiento de una determinada fuente de agua, se deben considerar algunas variables generales de calidad, sin importar si es una fuente de agua superficial o subterránea. Entre ellas:

- **Potencial de hidrógeno (pH).** Esta variable tiene efectos importantes en la química de los constituyentes del agua y en el desempeño de los procesos. Por esta razón, es imperativo que el pH de la fuente de agua se monitoree de manera rutinaria y que el perfil de pH a través del proceso de tratamiento se controle.
- **Alcalinidad.** Se refiere a la medición de la capacidad de neutralizar ácidos de una solución. Se define como la cantidad de ácido requerido para reducir el pH hasta un punto definido. Es un factor importante en la coagulación y el control del pH; además, en algunos países se utiliza en la selección del método de control de corrosión a ser implementado.
- **Dureza.** El nivel de dureza del agua puede dictar los conceptos de tratamiento a ser aplicados. Puede influir en una cantidad importante de procesos de




potabilización. Al igual que la alcalinidad, puede afectar también la selección del método de control de corrosión.

- **Turbiedad.** Es una medida de la materia particulada en el agua. Afecta la selección del método de clarificación y puede ser un indicador de la necesidad de pretratamiento aguas arriba de algunos de los procesos.
- **Materia orgánica natural.** Puede representar de manera indirecta el potencial de formación de subproductos de la desinfección, además de que incrementa la demanda de coagulante y de oxidante, y puede afectar un número importante de procesos de tratamiento. Puede ser caracterizada a través de mediciones indirectas, entre las que se incluye el carbono orgánico total y la absorbancia ultravioleta (UV).
- **Sólidos disueltos totales.** Es una medición de la cantidad de minerales y sales presentes en el agua, puede afectar los requerimientos del tratamiento, así como la aceptabilidad y la potabilidad de la fuente de agua.
- **Oxígeno disuelto.** Es un importante regulador de las condiciones oxidantes o reductoras del agua, determina la especiación química de muchos constituyentes en la muestra analizada.

Adicionalmente a estos parámetros generales, las fuentes de agua pueden tener condiciones únicas de calidad del agua, que deben ser consideradas. En el apartado 1.1 se citaron los contaminantes o afectaciones a la calidad del agua a ser analizadas en este informe.

### 3.1. Fuentes de información.

Como parte de las actividades de esta fase de la investigación, se identificaron y revisaron fuentes bibliográficas que contienen información sobre los procesos y las tecnologías que pueden ser utilizadas para remover los contaminantes en estudio; y que,

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 13 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	N° de Versión: 01


además sean útiles para los formuladores de proyectos. En el [cuadro 2](#), se presenta una tabla donde se relacionan los contaminantes estudiados y la literatura específica que se recomienda consultar.

Adicionalmente, las fuentes bibliográficas se encuentran referenciadas a sitios dónde se puede descargar o solicitar el documento. Solamente en uno de los casos, no se encuentra el documento disponible de forma gratuita a los funcionarios de AyA. Si el lector requiere más detalle sobre las referencias mencionadas, se le motiva a contactar al Área Funcional de Investigación Aplicada de la UEN Investigación y Desarrollo.

**Cuadro 2. Fuentes de información para los contaminantes en estudio.**

Contaminantes	<u>MinVivienda (2010)</u>	<u>Vargas, L et al (2004)</u>	<u>Galvis, G et al (1999)</u>	<u>Crittenden et al (2012)</u>	<u>Araya, R (2020)</u>	<u>TU Delft, DWT</u>	<u>Edzwald et al (2001)</u>	<u>Investigación Aplicada</u>	<u>Postwana, A (2013)</u>	<u>EPA (2006)</u>	<u>Voutchkov, N (2013)</u>
Descripción	Filtración rápida.	Filtración rápida.	Filtración en múltiples etapas.	Potabilización y procesos.	Estudio de mercado.	Potabilización y procesos.	Potabilización y procesos.	Hojas técnicas conceptuales (HTC).	Manual: hierro y manganeso.	Manual: arsénico y hierro.	Desalinización.
Color y turbiedad	Documento completo	Documento completo	Documento completo	Cap. 9 a 13	Sección 3	Subjects: 02 a 07	Cap. 0 a 10				
Calcio y sulfatos				Cap. 20	Sección 3	Subject: 05	Cap. 11, Cap. 12, Cap. 13	Criterios técnicos para Intercambio Iónico			Cap. 8 a 16
Aluminio				Cap. 9 a 13	Sección 3	Subjects: 02 a 07	Cap. 0 a Cap. 10, Cap.12	HTC Aluminio			Cap. 8 a 16
Nitratos				Cap. 20	Sección 3	Subject: 12	Cap. 11, Cap. 12				Cap. 8 a 16
Plaguicidas				Cap. 15, Cap. 17 y Cap.18	Sección 3	Subjects: 09 y 12	Cap. 11, Cap. 14	Investigación en plaguicidas			Cap. 8 a 16
Hierro y manganeso				Cap. 20	Sección 3	Subjects: 03, 04, 09, 11 y 12	Cap. 07, Cap. 10, Cap. 13, Cap. 14	HTC Hierro y Manganeso	Documento completo	Documento completo	Cap. 8 a 16
Arsénico				Cap. 20	Sección 3	Subjects: 04, 05, 06, 07, 09 a 12	Cap. 08, Cap. 10, Cap. 11, Cap. 12	HTC Arsénico		Documento completo	Cap. 8 a 16

Referencia: *Elaboración propia.*

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 15 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	<b>N° de Versión: 01</b>

Como puede observarse del cuadro anterior, se dispone de bastante información bibliográfica; desde aspectos generales de los procesos de potabilización hasta temas puntuales sobre los procesos utilizados para remover los contaminantes mencionados. Adicionalmente, se indica que la modalidad de la documentación va desde libros digitales o impresos hasta cursos virtuales. Toda esta información le sirve de herramienta a los formuladores de proyectos, para conocer sobre las tecnologías convencionales y no convencionales para remover los contaminantes en estudio.

En los siguientes apartados, se presentan las alternativas tecnológicas existentes en el mercado, tanto convencionales como no convencionales utilizadas para tratar las afectaciones a la calidad del agua seleccionadas.

### **3.2. Remoción de color y turbiedad.**

#### **3.2.1. Tecnología convencional.**

Para la remoción de color y turbiedad de aguas superficiales, se utilizan generalmente las plantas de filtración rápida y de filtración lenta. Vargas (2004) señala que dentro de las plantas de filtración rápida se encuentran las que incluyen el tren completo de procesos y las de filtración directa. Adicionalmente indica que, por el tipo de tecnología utilizada en la región, las plantas de filtración rápida se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Sistemas de tecnología convencional clásica o antigua.
- Sistemas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS.
- Sistemas de tecnología patentada, normalmente importada de los países desarrollados.

Para el análisis que se realiza en este documento, se tomará como tecnología convencional la propuesta por CEPIS/OPS (alta tasa).



### 3.2.2. Tecnología no convencional.


Según Vargas (2004) a este tipo de tecnología se le denomina importada, de patente o plantas paquete. Diversos fabricantes de estas soluciones compactas, muchas de las cuales se pueden modular en contenedores de carga, ofrecen alternativas que se pueden tratar de ajustar a las necesidades de cada comprador. Entre las ventajas de estos sistemas se pueden mencionar las siguientes:

- Bajo requerimiento de área.
- Permite modular la operación del sistema y su crecimiento.
- Movable (transportable).
- Tiempos de entrega cortos.
- Requieren de poca obra civil.
- Rápida puesta en marcha.

Entre las principales desventajas se mencionan las siguientes:

- Requerimientos de mano de obra calificada.
- Requerimiento importante de equipos de consumo de energía eléctrica.
- Espacios reducidos para labores de operación y mantenimiento.
- Dimensiones del contenedor limitan las dimensiones de los procesos.
- Requieren de la adaptación de módulos adicionales para la gestión de residuos.

Con el fin de introducir y caracterizar las tecnologías existentes para la remoción de color y turbiedad, se elaboró una ficha técnica tal y como se muestra en el siguiente

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 17 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	<b>N° de Versión: 01</b>

enlace: [Color y Turbiedad](#). Dentro de la información contenida en este documento, se encuentra la definición de las tecnologías utilizadas en el mercado, los procesos unitarios que las componen y algunas características técnicas y comerciales sobre las mismas.

### **3.3. Calcio y sulfatos.**

#### **3.3.1. Tecnología convencional.**

El calcio y el magnesio forman parte de los iones polivalentes que componen una característica del agua denominada dureza total. La dureza puede ser carbonatada o no carbonatada; siendo la primera la asociada a iones de carbonato y la segunda a iones como el sulfato; a esta última se le denomina también permanente.

De manera convencional, la dureza es removida a través de los procesos de ablandamiento, donde se agrega cal, soda cáustica y/o carbonato de sodio para precipitar el calcio y el magnesio como  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . En esta alternativa, se genera una cantidad importante de lodos o residuos que deben ser considerados y gestionados de manera adecuada.

Es posible que una pequeña parte de los sulfatos puedan ser removidos mediante esta tecnología convencional, pero es probable que se deban adicionar procesos para removerlos hasta las concentraciones meta requeridas o establecidas. Algunas de las alternativas para remover los sulfatos se describen en la sección siguiente.

#### **3.3.2. Tecnología no convencional.**

Para la remoción de calcio y sulfatos, los cuales generalmente son iones (disueltos en el agua), las tecnologías comercialmente disponibles son:

- Intercambio iónico: Se emplea el uso de resinas donde los iones de calcio y sulfatos se intercambian por otros cationes y aniones respectivamente. En la resina quedarán retenidos los iones de calcio y sulfatos y los iones intercambiados pasarán al agua tratada. Una vez agotada la capacidad de



intercambio de la resina, se deberá realizar una regeneración de esta; teniendo presente que la calidad del líquido residuo de la regeneración, determinará la forma en que éste se gestione.


- Reactor granular. Al adicionar una base al agua que contiene calcio y/o magnesio, se genera una cristalización espontánea. Si el reactor por donde pasa el agua contiene gránulos tipo “semilla”, la cristalización ocurrirá en la superficie del grano, formando gránulos de calcita. Para el caso de los sulfatos, se requiere adicionalmente otro proceso para removerlos.
- Membranas de nanofiltración o de ósmosis inversa. Los contaminantes son separados mediante una membrana, el agua tratada queda libre (ósmosis inversa) o parcialmente (nanofiltración) con el (los) contaminante(s). Se genera un flujo de agua que contiene los contaminantes removidos del agua de forma concentrada (rechazo).

Para conocer las características principales de las tecnologías convencionales y no convencionales para remover calcio y sulfatos, se preparó el siguiente documento: [Calcio y sulfatos](#).

### **3.4. Aluminio.**

#### **3.4.1. Tecnología convencional.**

El aluminio puede encontrarse en el agua de forma natural o antrópica. De forma natural, es común encontrarlo asociado a aguas con bajo pH y en estado soluble; probablemente incorporado a la matriz agua a través de la disolución de este metal de las formaciones rocosas. Relacionado con la actividad humana, en las plantas potabilizadoras de aguas superficiales, se utilizan coagulantes como parte de los procesos de tratamiento. Uno de los coagulantes más utilizados es el sulfato de aluminio. Lo anterior es una de las causas probables por las cuales se puede encontrar este metal en el agua.

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 19 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	N° de Versión: 01

De forma convencional, puede ser removido ajustando el pH del agua entre 6.5 a 7.5 para provocar su precipitación como un óxido metálico. El valor específico de pH a utilizar puede ser determinado mediante pruebas de jarras o pruebas a escala. Una vez ajustado el pH a un valor óptimo, se debe propiciar la formación de los sólidos y proceder con los mecanismos de separación de fases. En estos sistemas, el diseñador puede seleccionar el uso de procesos de floculación, decantación y filtración rápida similares a los propuestos por Vargas (2004) o a los propuestos por Galvis (2005) a través del uso de filtros de grava ascendente y filtros lentos; o una combinación entre ambas.

### **3.4.2. Tecnología no convencional.**

Si el aluminio se encuentra de forma soluble en el agua, dos tecnologías que pueden evaluarse para su remoción son:

- Intercambio iónico: el ion aluminio ( $Al^{3+}$ ) puede ser removido pasando el agua a tratar a través de una resina, donde éste es intercambiado por otros cationes como el sodio o el hidronio y quedando retenido en la misma. Una vez se agote la capacidad de intercambio de la resina, se debe proceder con la regeneración de esta; generando un residuo que debe de gestionarse de acuerdo con su caracterización.
- Membranas: al ser el aluminio un catión con carga +3 podría ser removido con el uso de membranas de nanofiltración y/u ósmosis inversa. Utilizando estos procesos, el agua a tratar se hace pasar a presión a través de una membrana, y se genera una corriente de agua tratada (permeado) y una de agua de rechazo; la cual contiene de forma concentrada el contaminante y otras sustancias que fueron retenidas por las membranas.

Para la implementación de este tipo de tecnologías para remover aluminio, se recomienda la realización de pruebas en laboratorio y a escala piloto. Un documento con las generalidades de estas tecnologías se presenta en el siguiente enlace: [Aluminio](#).



### 3.5. Nitratos.


Según la OMS (2017), los nitratos pueden llegar a las aguas superficiales o subterráneas como consecuencia de actividades agrícolas, de la disposición de aguas residuales y por la oxidación de productos residuales que contengan nitrógeno contenidos en las excretas animales y de humanos. Se desconoce si actualmente en Costa Rica se remueve nitratos en agua para consumo humano; por esta razón, se considera que las tecnologías existentes para su tratamiento son todas no convencionales.

#### 3.5.1. Tecnologías no convencionales.

Existen comercialmente procesos físicos/químicos (FQ) y biológicos para la remoción de nitratos del agua para consumo humano. Dentro de los procesos FQ se encuentran los siguientes:

- Resinas de intercambio iónico: donde los nitratos pueden ser removidos pasando el agua a tratar a través de una resina, donde el contaminante es intercambiado por aniones como los cloruros e hidroxilos y quedando retenidos en la misma. Una vez se agote la capacidad de intercambio de la resina, se debe proceder con la regeneración de esta; generando un residuo que debe de gestionarse de acuerdo con su caracterización.
- Membranas: al ser los nitratos un anión con carga -1 podría ser removido con el uso de membranas de ósmosis inversa. Utilizando este proceso, el agua a tratar se hace pasar a presión a través de la membrana, generando una corriente de agua tratada (permeado) y una de agua de rechazo; la cual contiene de forma concentrada el contaminante y otras sustancias que fueron retenidas por la membrana.

Respecto a los procesos biológicos, el diseñador debe de propiciar las condiciones para fomentar el crecimiento de microorganismos capaces de reducir los nitratos a

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 21 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	N° de Versión: 01

nitrógeno gaseoso. Este proceso metabólico se llama desnitrificación, el nitrógeno gaseoso puede descargarse a la atmósfera.

Se preparó como parte de este trabajo un documento que presenta generalidades sobre los procesos para remoción de [nitratos](#).

### **3.6. Plaguicidas.**

Las actividades agropecuarias utilizan los plaguicidas con el fin de destruir o controlar plagas que pueden afectar los cultivos. Estas sustancias pueden llegar a las fuentes de agua por escorrentía, al percolarse en el terreno y estar en contacto con las fuentes subterráneas, por malas prácticas agrícolas y muchas otras razones. Se desconoce si actualmente en Costa Rica se remueven plaguicidas del agua para consumo humano; por lo que las tecnologías existentes para su remoción se consideran como no convencionales.

#### **3.6.1. Tecnologías no convencionales.**

Existen en el mercado varias alternativas para la remoción y el control de plaguicidas; entre ellas se pueden mencionar:

- Adsorción: proceso mediante el cual el contaminante (plaguicida) es fijado sobre un material (adsorbente) y removido del agua. El Área Funcional de Investigación Aplicada, contrató al Instituto Tecnológico de Costa Rica para que caracterizara y evaluara mediante pruebas de laboratorio, distintas presentaciones de carbón activado utilizadas para remover un plaguicida del agua. Los informes y resultados de la investigación se encuentran en el [enlace](#) que contiene los trabajos realizados por Investigación Aplicada.
- Membranas de ósmosis inversa: una corriente de agua se hace pasar a través de una membrana semipermeable; parte del flujo pasa a través de la membrana (sin el contaminante) y la otra parte es rechazada por la membrana (con un



aumento en la concentración del contaminante). Es usual que los sistemas de ósmosis inversa incluyan procesos previos de pretratamiento, con el fin de mejorar la calidad del agua de entrada a la membrana y así protegerla y optimizar la vida útil de la misma.

- Oxidación avanzada: utilizan las reacciones de productos químicos para producir radicales libres, los cuales son altamente reactivos y pueden oxidar distintos compuestos (en este caso los plaguicidas). Debido al desconocimiento sobre la toxicidad de los subproductos generados por la oxidación química, cualquier proceso de oxidación que se utilice para remover estos compuestos orgánicos sintéticos, deberá oxidarlos por completo, produciendo dióxido de carbono, agua y ácidos minerales (Crittenden, 2012).

Una breve descripción de estas tecnologías se presenta en el siguiente documento:

[Plaguicidas.](#)

### **3.7. Hierro y manganeso.**

La presencia de hierro y manganeso en agua para consumo humano es bastante común. Estos elementos se encuentran de forma abundante en la corteza terrestre y al estar en contacto con el agua tienden a solubilizarse. En presencia de oxígeno o algún otro oxidante como el cloro están propensos a precipitar y generar color y turbiedad en el agua; provocando el rechazo de los consumidores. Muchas de las tecnologías para remover estos contaminantes, aprovechan la característica de estas sustancias de ser oxidables y formar precipitados, para posteriormente ser removidos mediante procesos de separación de sólidos.

#### **3.7.1. Tecnologías convencionales.**

Se encuentran usualmente sistemas para remoción de hierro y manganeso utilizando el principio de oxidación (aumento de potencial redox del agua) y filtración. Con el paso del tiempo sobre los materiales granulares de los filtros, se acumulan y adhieren los



sólidos u óxidos de manganeso; específicamente el  $MnO_2$ . Este último posee la capacidad de adsorber el  $Mn^{+2}$  (estado soluble) y catalizar su oxidación (preferiblemente en presencia del oxidante) para formar más  $MnO_2$ . Adicionalmente, comercialmente se encuentran medios granulares a base de o recubiertos por  $MnO_2$ , que aprovechan esta característica. Respecto al hierro, este es fácilmente oxidable y filtrable.

Dentro de los sistemas convencionales, podemos encontrar los que funcionan a gravedad o a presión. La selección del tipo de funcionamiento será determinada por el diseñador a partir de las condiciones de sitio y los requerimientos operativos.

### 3.7.2. Tecnologías no convencionales.

Existen en el mercado, distintas alternativas para realizar remoción de hierro y manganeso de forma no convencional. Se pueden mencionar los siguientes procesos:

- Intercambio iónico: los iones de hierro ( $Fe^{2+}$ ) y manganeso ( $Mn^{2+}$ ) puede ser removidos pasando el agua a tratar a través de una resina, donde estos metales son intercambiados por otros cationes como el sodio o el hidronio y quedando retenidos en la misma. Una vez se agote la capacidad de intercambio de la resina, se debe proceder con la regeneración de esta; generando un residuo que debe de gestionarse de acuerdo con su caracterización.
- Ósmosis inversa: mediante el uso de productos químicos para mantener reducidos el hierro y el manganeso y el paso del agua a través de membranas semipermeables de ósmosis inversa, se pueden remover estos contaminantes. Se produce una corriente de agua tratada (permeado) sin la presencia de estos metales y una corriente de agua de rechazo que los contiene concentrados.
- Ablandamiento con cal: para aguas con elevada dureza, se utiliza frecuentemente la adición de cal para subir el pH y provocar la precipitación del calcio y magnesio como  $CaCO_3$  e  $Mg(OH)_2$ . A elevar el pH, es posible formar



óxidos de hierro y manganeso a distintos valores de potencial redox, y provocar que estos sólidos precipiten en los sedimentadores y/o sean retenidos en los filtros al igual que el  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

- Remoción biológica: consiste en tratar de promover las condiciones idóneas para el crecimiento de microorganismos capaces de catalizar la oxidación del hierro y manganeso, a través de su metabolismo. De esta manera se pueden obtener óxidos de estos metales, los cuales pueden quedar retenidos en un medio filtrante; muchas veces este material es el medio de soporte de los microorganismos y además funciona como filtro, se denomina entonces bio-filtro.

Adicionalmente, las tecnologías no convencionales y las convencionales mencionadas, pueden ser integradas dentro de un contenedor y configuradas para ser del tipo “plug and play”. Lo anterior resulta en sistemas muy versátiles, escalables y movibles. En el siguiente documento se presentan algunas características básicas de los sistemas mencionados: [Hierro y manganeso](#).

### **3.8. Arsénico.**

Se encuentra usualmente de forma natural en el agua y ocasionalmente podría estar relacionado con la actividad humana. Sus principales estados de oxidación en los que se puede encontrar son As(III) o As(V) dependiendo del potencial redox y pH del agua; generalmente es más sencillo remover este último. No es un contaminante que se remueva frecuentemente del agua en Costa Rica, por lo que se considera que las tecnologías utilizadas para hacerlo son no convencionales.

#### **3.8.1. Tecnologías no convencionales.**

Existen en el mercado distintos procesos para remover arsénico del agua, entre ellos se pueden mencionar:




- Coagulación y filtración: se utilizan como coagulantes sales de hierro (cloruro férrico, sulfato ferroso) para formar óxidos de hierro que poseen la capacidad de adsorber el arsénico del agua; para posteriormente removerlos por procesos de separación de sólidos como lo son la sedimentación y la filtración.
- Adsorción: existentes materiales que poseen una alta afinidad para remover arsénico mediante la adsorción. En este caso, el contaminante (adsorbato) es atrapado por el material adsorbente y de esta forma removido del agua.
- Intercambio iónico: el As(V) es un ion que posee carga negativa y puede ser removida al pasar el agua a tratar a través de una resina, donde este metaloide es intercambiado por un anión como los cloruros y quedando retenido en la misma. Una vez se agote la capacidad de intercambio de la resina, se debe proceder con la regeneración de esta; generando un residuo que debe de gestionarse de acuerdo con su caracterización.
- Membranas de ósmosis inversa: se hace pasar una corriente de agua a través de una membrana semipermeable y esto genera dos flujos: uno de agua sin arsénico (agua tratada, permeado) y otro de agua con concentraciones superiores de arsénico (rechazo).

Las alternativas tecnológicas descritas anteriormente, pueden ser dispuestas e integradas dentro de un contenedor; con el fin de contar con sistemas móviles, modulares y de rápida instalación y puesta en marcha. En el siguiente vínculo se presentan las principales características de los procesos mencionados: [Arsénico](#).

### **3.9. Costos de capital de proyectos de potabilización.**

Una vez conocidas las tecnologías convencionales y no convencionales utilizadas para remover los contaminantes en estudio y las ventajas, desventajas y consideraciones de cada una de ellas (que se encuentran en las referencias indicadas Cuadro 2), los


	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>		Página 26 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	N° de Versión: 01	

formuladores de proyectos se encuentran frente a la necesidad de contar con un estimado de los costos de capital de estas. En el perfil de proyecto de esta investigación, se contempló la Fase V para la estimación de los costos de capital de las plantas potabilizadoras. Con el fin de consolidar esta información de costos con la documentación de las tecnologías convencionales y no convencionales (Fase IV) se procede a incorporarla a este informe.

El Área Funcional de Investigación Aplicada ha consolidado una base de datos de proyectos de potabilización que se han cotizado como parte de estudios de mercado y en algunas ocasiones se han construido. Esta base de datos contempla 36 proyectos que datan del año 2013 hasta el 2020, presenta detalles generales sobre los mismos e incluye sistemas de remoción de color y turbiedad, hierro y manganeso, arsénico y aluminio entre otros. Se considera una herramienta útil para contar con una estimación preliminar de costos sobre sistemas de potabilización.

La base de datos presenta el caudal del sistema de potabilización, el costo total de la obra, si se refiere a un proyecto construido o sólo parte de un estudio de mercado, el costo de capital por L/s, si se incluye sistema para gestión de residuos, el tipo de tecnología y algunos otros detalles que se consideran importantes para ser considerados. Esta información se detalla en la pestaña de base de datos, la cual se encuentra protegida para no se alterada por cualquier usuario. En la pestaña llamada Portada, se presenta un resumen de la información respecto a los sistemas de potabilización de la base de datos. El usuario, solamente deberá seleccionar el o los contaminantes deseados y se desplegará una tabla resumen sobre los sistemas de potabilización existentes en la base de datos; adicionalmente, se presentan los costos máximos, promedio y mínimos por L/s para cada tecnología.

Es claro que cada proyecto de potabilización es diferente, e incluso elementos como el tamaño de la aplicación y las potenciales obras conexas afectan en gran medida la inversión requerida. Es por ello que se aclara que los datos presentados en esta sección

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 27 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	<b>N° de Versión: 01</b>

son de carácter preliminar, y únicamente se recomienda su consideración para etapas tempranas de la formulación de proyectos. De ninguna manera se propone que se tome la información citada como una estimación de un costo total de inversión. Un grupo de profesionales especializados en materia de potabilización son llamados a analizar cada caso específico.


### **3.10. Selección de tecnologías o alternativas.**

Con el fin de poder seleccionar una de las distintas alternativas existentes para atender una afectación a la calidad del agua, debe existir dentro del proceso de formulación de proyectos una etapa de conceptualización y planificación. Esta fase de los proyectos debe incluir al menos:

- Estudios de factibilidad y estudios previos.
- Generación de alternativas y optimización económica y financiera.
- Evaluación socioeconómica.

En estas actividades, el planificador debe identificar las diferentes alternativas de solución a la problemática planteada; lo anterior, utilizando los diseños obtenidos para cada tecnología. Se deberá realizar para cada una de las alternativas una evaluación socioeconómica, la cual debe estar enmarcada dentro de un proceso de optimización, cuyo objetivo sea seleccionar la alternativa que aporta los mayores beneficios al menor costo económico. Para conocer con detalle el proceso de formulación de proyectos de sistemas de agua potable, se recomienda estudiar los [documentos](#) elaborados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia; específicamente el Manual – Título C.

Se considera importante que la UEN de Programación y Control desarrolle o cuente con una herramienta multicriterio, que le permita determinar la mejor alternativa

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 28 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	N° de Versión: 01

tecnológica con base en el diseño sanitario de cada sistema a evaluar. Entre los aspectos a considerar, se recomienda incluir al menos:

1. Área requerida por los sistemas de tratamiento y obras complementarias.
2. Costo de inversión o de capital.
3. Costo de operación y mantenimiento.
4. Producción y gestión de residuos.
5. Experiencia operativa existente con el sistema potabilizador.
6. Experiencia de diseño existente con la alternativa tecnológica.
7. Requerimientos del personal operativo.
8. Personal operativo disponible.
9. Desempeño de la tecnología: que incluya la eficiencia para la remoción del contaminante y la capacidad de esta de mantenerla durante el tiempo.



#### 4. CONCLUSIONES

- 1) Existe un número considerable de fuentes bibliográficas que presentan detalles importantes sobre los procesos requeridos y las consideraciones básicas necesarias respecto a los distintos sistemas de potabilización para controlar y remover las afectaciones a la calidad del agua estudiadas en este documento. El cuadro 2 de este documento presenta un resumen de la información mencionada.
- 2) Del estudio de mercado realizado (Fase III de esta investigación) para los contaminantes evaluados, es posible encontrar dentro del mercado tecnología convencional y no convencional para tratar cada una de las afectaciones a la calidad del agua definidas.
- 3) Dentro de las tecnologías no convencionales, la más frecuentemente propuesta para remover contaminantes como los estudiados, es la del uso de membranas de ósmosis inversa. Según se indica, con los pretratamientos y tipos de membranas adecuados, es un proceso altamente versátil para ser utilizado para tratar aguas con las afectaciones indicadas en este documento.
- 4) Otras tecnologías no convencionales frecuentemente encontradas en la literatura y en el mercado son: la adsorción, el ablandamiento con cal, la remoción biológica, la oxidación avanzada y el intercambio iónico.
- 5) Para el caso de remoción de color y turbiedad, se presenta como tecnología convencional la propuesta por CEPIS para aguas superficiales; adicionalmente, se incluye la filtración en múltiples etapas como tecnología convencional. Como tecnología no convencional, se encuentra en el mercado sistemas de tratamiento con procesos similares a los utilizados para la tecnología convencional tipo CEPIS, pero integrados dentro de un contenedor para convertirlos en sistemas tipo prefabricados y “plug and play”.



- 6) Para la remoción de calcio y sulfatos se plantea como alternativa convencional la tecnología de ablandamiento con cal, la cual debe ser posteriormente complementada para la remoción de sulfatos. Este tipo de sistema genera cantidades importantes de residuos durante el proceso de tratamiento; los cuales deben ser gestionados de forma adecuada. Como alternativas no convencionales, se presentan comercialmente el uso de membranas de nanofiltración u ósmosis inversa, el reactor granular y el intercambio iónico.
- 7) El aluminio puede ser removido del agua de forma convencional a través del ajuste del pH y la formación de óxidos de aluminio (particulado), para lo que se requiere de un proceso similar a los procesos de tecnología apropiada de CEPIS. De manera no convencional la remoción de este metal puede darse mediante el uso de las membranas de ósmosis inversa o el intercambio iónico (cationes).
- 8) Con respecto a los nitratos, al ser un contaminante que actualmente no se remueve en AyA, todas las tecnologías existentes se consideran como no convencionales. Entre ellas podemos mencionar: membranas de ósmosis inversa, intercambio iónico y la desnitrificación vía proceso biológico.
- 9) Para el caso de los plaguicidas, al igual que para los nitratos, se considera que cualquier tecnología por implementar es no convencional. Entre los procesos utilizados se encuentran la adsorción en carbón activado, el uso de membranas de ósmosis inversa y la oxidación avanzada.
- 10) Para la remoción de hierro y manganeso de forma convencional se utiliza la oxidación y filtración, ya sea en sistemas presurizados o a gravedad. Para sistemas no convencionales, se utiliza el intercambio iónico, la ósmosis inversa, el ablandamiento con cal y la remoción biológica; tanto estos sistemas como los procesos de oxidación y filtración, pueden ser dispuestos dentro de un contenedor.



- 11) La presencia de arsénico en el agua para consumo humano puede ser tratada mediante distintas alternativas. Se considera que estas aplicaciones son no convencionales al ser un contaminante que no es usualmente removido. Los procesos comúnmente utilizados son: coagulación con sales de hierro, la adsorción, el intercambio iónico y las membranas.
- 12) Todas las tecnologías no convencionales y muchas de las convencionales anteriormente mencionadas, pueden ser integradas dentro de un contenedor y utilizadas como tipo “plug and play”, lo cual le brinda características interesantes para ciertos tipos de proyectos.
- 13) El uso de la base de datos de costos de capital para plantas potabilizadoras que se presenta en el apartado 3.9, puede ser de gran utilidad para los formuladores de proyectos en la etapa de evaluación de alternativas.



## 5. RECOMENDACIONES


Se propone al área de Diseño de UEN PyC valorar lo siguiente:

- 1) Tomar como referencia para sus diseños las fuentes bibliográficas referidas en el cuadro 2, sección 3.1 de este documento. Como puede observarse, existe mucha literatura general y específica sobre los procesos de potabilización convencionales y no convencionales utilizados para remover los contaminantes de interés.
- 2) Recomendar la lectura de todos los entregables del presente proyecto de investigación al personal especializado en diseño de sistemas de potabilización.
- 3) Incorporar la información y resultados obtenidos en el estudio de mercado y análisis de tecnologías convencionales y no convencionales de esta investigación (Fase III y Fase IV), dentro del ciclo de proyectos del área de diseño, para plantas potabilizadoras de AyA.
- 4) Incorporar dentro del análisis de alternativas para abastecimiento de agua mediante fuentes de agua superficial, el uso o aplicación de sistemas de potabilización para remoción de color y turbiedad dentro de un contenedor o del tipo “plug and play”. Esta alternativa puede ser muy interesante para caudales pequeños o bajos, en lugares remotos, en espacios pequeños, cuando se requiera ir modulando el caudal de producción de acuerdo con el crecimiento del acueducto y donde se necesite una solución rápida. Además, al ser móviles pueden ser trasladados a otros sitios, siempre y cuando se tomen en cuenta el requerimiento de obras conexas para su puesta en servicio.
- 5) Tomar en consideración que cuando se evalúen sistemas para remoción de calcio y sulfatos se debe contemplar que algunos de los procesos pueden remover los dos contaminantes, pero otros sólo uno de los dos, por lo que se podría requerir de procesos adicionales.




- 6) Realizar pruebas de jarras a distintos valores de pH para el caso de querer remover aluminio del agua para consumo mediante un ajuste de este y posterior proceso de separación de sólidos.
- 7) Evaluar en caso de aplicar la tecnología de membranas de ósmosis inversa, el uso de productos químicos para acondicionar el agua antes de pasar por la membrana, adicionalmente, se debe caracterizar el rechazo del proceso para definir su tratamiento y disposición.
- 8) Evaluar en caso de aplicar sistemas que utilizan medios adsorbentes, la vida útil de los mismos para la cantidad y calidad del agua a tratar, así como el tratamiento y disposición del medio una vez agotado.
- 9) Evaluar en caso de aplicar sistemas de intercambio iónico, la frecuencia de las regeneraciones y el tratamiento y disposición de los residuos generados.
- 10) Valorar cuando sea necesario el uso de pruebas a escala para estudiar el funcionamiento de plantas potabilizadoras no convencionales; lo anterior, antes de realizar los diseños finales del sistema y en situaciones donde se desconozca cómo podría resultar su funcionamiento. Este es un componente que se puede incluir incluso dentro de los contratos de inversión propiamente.
- 11) Generar hojas de cálculo estandarizadas para el dimensionamiento sanitario de sistemas de remoción de los contaminantes estudiados en este documento.
- 12) Utilizar la herramienta de base de datos de costos de capital de plantas potabilizadoras como un criterio preliminar aplicable a la formulación y evaluación de proyectos de sistemas de tratamiento de agua para consumo humano.
- 13) Desarrollar o motivar el desarrollo de una herramienta multicriterio para evaluar las distintas alternativas tecnológicas existentes para la remoción de contaminantes específicos.

Por otra parte, se recomienda para el Laboratorio Nacional de Aguas:

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 34 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	<b>N° de Versión: 01</b>

14) Incluir dentro de las caracterizaciones del agua, los parámetros establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua y adicionalmente al menos:

- Boro, estroncio y bario: pueden llegar a afectar el funcionamiento de los sistemas de potabilización que utilizan membranas como la ósmosis inversa y algunos adsorbentes.
- Carbono orgánico total: se relaciona con la presencia de materia orgánica en el agua, puede reaccionar con el cloro para producir subproductos de la desinfección, acomplejarse con metales y dificultar su oxidación y ser sustrato para el desarrollo de microorganismos y biopelículas en los sistemas de membranas o adsorción.
- Fosfatos y sílice: la presencia de estas sustancias en concentraciones elevadas puede llegar a afectar seriamente la vida útil de los adsorbentes y generar atascamiento en las membranas de ósmosis inversa.

	<b>Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)</b>	Página 35 de 38
	Fecha de entrega: 23 de junio de 2021	N° de Versión: 01

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araya, R. Catálogo de Plantas Potabilizadoras tipo “Plug and Play”. Fase III: Estudio de Mercado. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. AyA. 2020.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Lima, Perú. 2004.

Crittenden, R; et al. MWH’s Water Treatment: Principles and Design. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc. USA. 2012.

Edzwald, J; et al. Water Quality and Treatment. A Handbook on Drinking Water. Sixth Edition. American Water Works Association. Denver, Colorado. USA. 2011.

Galvis, G; et al. Organización Panamericana de la Salud (OPS). Guía para Diseño de Sistemas de Tratamiento de Filtración en Múltiples Etapas. OPS. Lima, Perú. 2005.

Hoffman, G; et al. Removal of Arsenic from Drinking Water Supplies by Iron Removal Process. US Environmental Protection Agency. USA. 2006.

Postawa, A; Hayes, C. Best Practice Guide on the Control of Iron and Manganese in Water Supply. International Water Association (IWA) Publishing. USA. 2013.

TU Delft. (24 de mayo 2021). Drinking Water Treatment. Subjects. <https://ocw.tudelft.nl/courses/drinking-water-treatment-1/subjects/>

Voutchkov, N. Desalination engineering. Planning and Design. McGraw-Hill. New York. USA. 2013.



## 7. CONTROL DE CAMBIOS DEL DOCUMENTO

N° Versión	Apartado del Cambio	Cambio Realizado	Fecha aprobación de cambio



## 8. APÉNDICES



## **9. ANEXOS**