



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Análisis de alternativas de tratamiento para la
potabilización de aguas subterráneas en la Isla de San
Andrés.**

Lesma Ivonne Casas Tapia

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela ambiental

Medellín, Colombia

Año 2020



ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACIÓN
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ISLA DE SAN ANDRÉS.

Lesma Ivonne Casas Tapia

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de: **Especialización en
Gestión Ambiental**

Asesor(a):

Jhon Camilo Duque Duque, Ingeniero Civil, MSc en Ingeniería Ambiental

Línea de Investigación:

Calidad del agua

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela ambiental,

Medellín, Colombia

2020

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 Objetivo general	2
1.4 Objetivos específicos.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Aguas subterráneas y su tratamiento para consumo humano.....	4
2.1.1 Panorama mundial.....	6
2.1.2 Panorama nacional	11
2.1.3 Panorama San Andrés	14
2.1.4 Otras alternativas de tratamiento de aguas para consumo humano	17
2.1.5 Marco normativo nacional para el tratamiento de aguas para consumo humano	22
3. METODOLOGÍA	24
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
4.1 Condiciones actuales del agua subterráneas en San Andrés Isla (Calidad y Cantidad)	25
4.2 Propuestas de tratamiento de aguas subterráneas (Según lo consultado en las experiencias internacionales y nacionales)	31
5. CONCLUSIONES	34
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de colectores usados en la potabilización de aguas con energía solar.....	17
Tabla 2. Alternativas de potabilización implementando plantas en procesos de coagulación y floculación.....	19
Tabla 3. Tipos de nanomateriales usados en la potabilización de aguas para la remoción de contaminantes.....	20
Tabla 4. Concentración de parámetros medidos en los pozos de agua subterránea de San Andrés.....	25
Tabla 5. Concentración de parámetros medidos en los pozos de agua subterránea de San Andrés.....	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa global de escasez de agua..	5
Figura 2. Mapa global de aguas subterráneas.....	7
Figura 3. Mapa de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas en Colombia..	13
Figura 4. Mapa de localización de puntos de agua en San Andrés.....	15
Figura 5. Oferta vs demanda de agua en San Andrés.	31

RESUMEN

Las aguas subterráneas son una de las mayores fuentes de abastecimiento de agua potable en diversas regiones del mundo por su disponibilidad y cantidad, sin embargo, estas tienen afectaciones en su calidad de forma natural, al estar en contacto con las rocas y cuerpos de aguas salinas, arrastrando consigo diversas trazas de compuestos químicos. Cabe mencionar que las actividades antropogénicas también afectan la calidad de las aguas por la sobreexplotación de acuíferos y vertimientos de efluentes industriales y domésticos, causando problemas de intrusión salina, metales pesados y microorganismos, por lo que se requieren aplicar técnicas para su potabilización, teniendo en cuenta el cumplimiento de los parámetros establecidos en las normativas de control y calidad del agua, que garantizan que es segura para el consumo humano. En muchos lugares de Colombia el abastecimiento se da a través de aguas superficiales por su abundancia y fácil acceso pero hay excepciones como es el caso de San Andrés, que por sus condiciones hidrológicas está obligada a abastecerse en un 80% de sus acuíferos, por lo que se implementan técnicas de potabilización como ósmosis inversa, coagulación y cloración, teniendo en cuenta la calidad inicial de sus aguas. Con base a lo anterior, se han hecho estudios donde se sugieren mejoras en las etapas de tratamiento, mediante el uso de la nanofiltración y técnicas MAR, sin embargo, de acuerdo a la información recolectada, se pueden contemplar otras técnicas como la coagulación con compuestos orgánicos, biorremediación, fotocatalisis, adsorción y colectores de energía solar.

Palabras clave: Potabilización, Acuífero, Contaminante, Calidad y Normatividad.

ABSTRACT

Groundwater are one of the largest sources of drinking water supply in various regions of the world due to its availability and quantity, however, these have naturally affectations in your quality, as it is in contact with rocks and saline water bodies, dragging with it various traces of chemical compounds. It is worth mentioning that anthropogenic activities also affect the quality of water due to the overexploitation of aquifers and discharges of industrial and domestic effluents, causing problems of saline intrusion, heavy metals and microorganisms, so it is necessary to apply techniques for their purification, taking into It counts on compliance with the parameters established in the water quality and control regulations, which guarantee that it is safe for human consumption. In many places in Colombia, the supply is through surface water due to its abundance and easy access, but there are exceptions, such as San Andrés, which, due to its hydrological conditions, is obliged to be supplied in 80% of its aquifers, therefore that drinking water treatment techniques such as reverse osmosis, coagulation and chlorination are implemented, taking into account the initial quality of its waters. Based on the above, studies have been made suggesting improvements in the treatment stages, through the use of nanofiltration and MAR techniques, however, according to the information collected, other techniques such as coagulation with compounds can be considered organic, bioremediation, photocatalysis, adsorption and solar energy collectors.

Keywords: Potabilization, Aquifer, Pollutant, Quality and Regulations.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Las Islas de San Andrés y Providencia debido a su geología e hidrografía tienen características muy particulares en cuanto a la disponibilidad y calidad del agua. En el imaginario colectivo, el agua utilizada para suplir las necesidades cotidianas y del sector turístico de las islas del Caribe, proviene únicamente del mar (la cuál suele tener procesos de desalinización por osmosis inversa), sin embargo, esto no es cierto para todas las islas del Caribe porque algunas se abastecen de agua subterránea, como es el caso de Puerto Rico, Haití, Barbados, Bahamas, Antigua y Jamaica e islas del Caribe colombiano (Cashman, 2013). La mayoría de estas islas, tienen problemas con respecto a la potabilización de aguas subterráneas debido a la contaminación hídrica que presentan.

La isla de San Andrés tiene una plataforma continental de 27 km^2 con una forma alargada, lo cual está relacionado con la capacidad de agua que pueden albergar sus acuíferos, porque debido a su reducido tamaño tiene problemas con respecto al recurso hídrico. Existen dos acuíferos en la isla, llamados San Andrés y San Luis, el primero cuenta con un espesor de 8 a 15 metros, se recarga con aguas lluvias y aguas residuales, el segundo cuenta con un espesor entre 170 y 270 metros, se recarga con agua lluvia infiltrada, debido a su capacidad es la mayor reserva de agua dulce con la que cuenta la isla. La escorrentía es alta en épocas

lluviosas que acompañada de diaclasamiento, fracturamiento y permeabilidad de las rocas favorecen a las recarga de acuíferos a través del tiempo (Aguado, 2010).

En la isla de San Andrés, los acuíferos presentan contaminación por ion cloruro, intrusión marina, materia fecal y compuestos nitrogenados (Gil, Chaparro, Jiménez & Quiroga, 2016), incumpliendo así con los parámetros establecidos en la resolución 1076 de 2015, si no se le brinda un tratamiento, sin embargo, una parte de estas aguas provenientes de los pozos profundos del valle del Cove es tratada por la empresa Proactiva, quien se encarga de brindar el tratamiento adecuado para que cumpla con los estándares de calidad establecidos por la normativa.

Debido a la escasez de agua, la comunidad de la isla de San Andrés emplea otras fuentes de abastecimiento, como la recolección de aguas lluvias y pozos barreños o artesanales. El problema de estos sistemas radica en que la captación de agua lluvia escasea en tiempos de sequía por la variabilidad climática de esa zona. Adicional a esto, el agua de los pozos no es apta para el consumo directo por la contaminación, lo que acarrea problemas de salud pública. Una situación diferente se presenta en islas cercanas, como Providencia, donde se abastecen del agua dulce proveniente de las zonas montañosas, a la cual se le brinda tratamiento de potabilización por las fluctuaciones que presenta.

1.2 OBJETIVOS

1.3 Objetivo general

Evaluar la viabilidad de la implementación de alternativas de potabilización del agua subterránea en la Isla de San Andrés.

1.4 Objetivos específicos

Analizar la eficacia de los estudios específicos realizados de tratamientos de potabilización implementados en otras zonas de estudio similares.

Evaluar los aspectos relacionados con la composición de los suelos y su influencia sobre la calidad de las aguas subterráneas.

Estudiar el marco normativo ambiental relacionado con la calidad de las aguas subterráneas, su tratamiento y el uso para el consumo humano.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación se presenta una revisión bibliográfica, la cual se enfoca en las aguas subterráneas y las técnicas de tratamiento para consumo humano, tanto a nivel mundial, regional y nacional.

2.1 Aguas subterráneas y su tratamiento para consumo humano

El agua se mantiene constante en el planeta por medio del ciclo hidrológico, en el cual está presente en sus tres estados sólido, líquido y gaseoso, haciendo que cambie su disponibilidad y calidad en el tiempo. Este proceso al ser un ciclo no tiene una etapa inicial, sin embargo, se puede partir de que inicia por el calentamiento de las grandes masas oceánicas, producido por la radiación solar, donde el vapor de agua asciende a través del aire a la atmósfera y se condensa por las bajas temperaturas, formando así las nubes, quienes son desplazadas por las corrientes de aire y colisionan sus partículas, las cuales posteriormente caen en forma de precipitación y nieve, siendo esta última mencionada, la que se acumula en los glaciares y capas de hielo. La nieve se derrite en ciertos países por los cambios estacionales recorriendo así la superficie, y llegando junto con las precipitaciones por la acción de la gravedad a las fuentes de aguas superficiales e infiltrándose en el suelo (USGS, 2020). El agua infiltrada es en parte devuelta a las fuentes de agua superficiales por medio de la descarga de agua subterránea, mientras que otra parte es absorbida por las raíces de las plantas y la parte restante llega a los acuíferos por medio de su infiltración en diferentes capas del suelo a través de las grietas, poros de las rocas y sedimentos por lo que estas características determinan el tipo de acuífero y la dinámica de las aguas (Vélez, Ortiz, & Vargas, 2011).

El planeta está cubierto de un gran porcentaje de agua, sin embargo, el agua disponible para el consumo humano, es poca porque el 97.5% del agua se encuentra en los océanos como salubre, mientras que el 2.5% está presente como agua dulce. De este último porcentaje un 70% del agua está distribuida en los glaciares, aproximadamente un 30% son aguas subterráneas y menos del 1% es el agua disponible para los seres vivos y ecosistemas (Comisión Nacional del Agua, 2012).

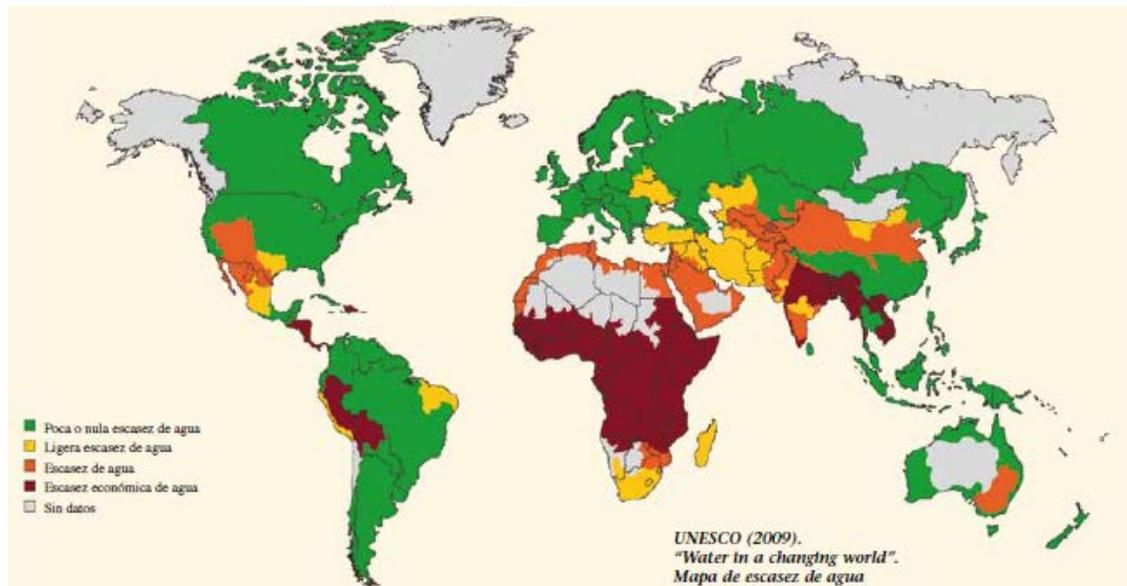


Figura 1. Mapa global de escasez de agua. Fuente: WWAP (2019).

Los autores López, Fornés, Ramos & Villarroya en su artículo **Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo** menciona que existen zonas del mundo donde es necesario el uso de aguas subterráneas por falta de una distribución del agua no homogénea o conflictos hídricos como se puede ver en la Figura 1.

Las aguas subterráneas tienen aumentos y disminuciones en sus volúmenes, lo cual está relacionado con la variabilidad climática y cambio climático, por otro lado en el caso de los acuíferos costeros, estos suelen tener problemas de intrusión marina por aumentos en el nivel del mar, bombeo excesivo y rápido del agua, trayendo como resultado una disminución en el nivel estático, formando un cono de depresión que al ascender el agua bombeada arrastra consigo el agua salobre (Vélez et al., 2011).

Además de la intrusión marina, las aguas subterráneas tienen otro tipo de contaminantes como nitratos, iones cloruro y presencia de materia fecal, los cuales afectan la calidad del agua, si se destina para el consumo humano, y hacen necesaria la implementación de sistemas de potabilización que mejoren su calidad. La potabilización es un proceso que brinda tratamiento al agua, teniendo en cuenta el tipo de fuente de la que provenga, principalmente consta de tres etapas como lo son clarificación, filtración y desinfección, implementadas con el fin de obtener agua potable apta para el consumo humano, mejorando los parámetros físicos, químicos y biológicos (Instituto Nacional de Salud, 2011).

La filtración en este tipo de aguas se da de forma natural porque al pasar por el suelo, este remueve gran cantidad de los sólidos suspendidos, sin embargo, existen alternativas de filtración que se podrían implementar en caso de que fuera necesario, una de estas es la sedimentación, en la cual se eliminan los sólidos que quedan suspendidos en el fondo por acción de la gravedad, implementando tanques clarificadores que funcionan aplicando una fuerza de giro (Instituto Nacional de Salud, 2011).

Existen filtraciones más rigurosas como es el uso de membranas de diferentes diámetros en procesos conocidos como la micro filtración, ultrafiltración y nanofiltración dependiendo del agua a tratar de acuerdo a la resolución 0330 del 8 de junio de 2017 (Ministerio de Vivienda, 2017). Este método implementa membranas de diferentes tamaños de poros, en la microfiltración se usan membranas micrométricas con poros entre 0.03 a 10 μm , con alta capacidad para remover material particulado del agua que pase a través de las membranas. La ultrafiltración utiliza membranas más pequeñas con poros entre 0.005 y 0.1 μm que remueve la mayoría de virus y bacterias en comparación con las micro membranas y por último la nanofiltración emplea membranas con poros de 0.001 μm removiendo todo tipo de virus y bacterias (Fernández, 2020).

Se pueden implementar otros métodos de filtración, sin embargo, la mayoría de estos no eliminan en su totalidad ciertos microorganismos como bacterias, hongos y virus por lo que se requiere aplicar un proceso de desinfección que comúnmente se hace con sustancias químicas como el cloro, cloramina, ozono y luz ultravioleta, siendo la cloración la técnica más implementada por su bajo coste económico, la cual se hace con la adición de gas cloro, hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio pero debido a su reactividad, al reaccionar con otros compuestos forma trihalometanos u organoclorados (Echarddak, 2018). Otro método usado es la coagulación, que consiste en adicionar compuestos químicos como sales de aluminio, sales de hierro y polielectrolitos en tanques de mezcla al agua, con el fin de homogenizar la solución por medio de la acción centrípeta o fuerza de giro en el tanque, que luego al dejar en reposo precipitaran los sólidos suspendidos y disueltos (Veliz, 2016).

2.1.1 Panorama mundial

A nivel mundial la cantidad y capacidad de renovación del agua subterránea varía de acuerdo a la posición geográfica de cada país o región (Figura 2), siendo el territorio árabe el que

tiene los mayores problemas de escasez hídrica debido su hidrogeología, crecimiento poblacional y cambio climático, lo cual incide en el deterioro de las aguas subterráneas de esta zona. En Asia y el Pacífico, 29 de sus 48 países tienen problemas de sostenibilidad por la sobreexplotación de las aguas subterráneas y su baja capacidad de renovación, además de las afectaciones causadas por el cambio climático y desastres ambientales. Una situación similar ocurre en África subsahariana, región en la que entre los años 2003 y 2013 se agotaron 8 grandes acuíferos por la alta demanda del recurso y baja capacidad de recarga (WWAP, 2019).

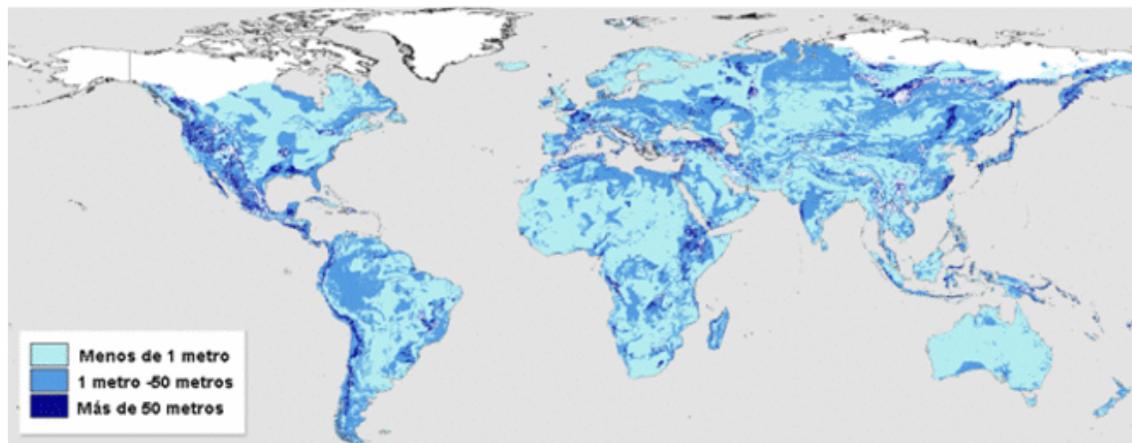


Figura 2. Mapa global de aguas subterráneas. Fuente: Gleeson et al. (2016).

Los países que hacen parte de la Unión Europea se abastecen de agua potable proveniente de fuentes subterráneas en un 75%, pero la calidad de estas aguas se ha visto afectada por la actividad antropogénica a lo largo de la historia, debido al vertimiento directo e indirecto de diversos contaminantes, de los se puede decir, que incluso con la aplicación de diferentes tecnologías no se logran eliminar en su totalidad, trayendo como consecuencia que más de 1/3 del agua de Europa exceda los límites establecidos de concentración para nitratos (Comisión Europea, 2008). España es uno de los países que presenta mayor aridez por su posición geográfica, sin embargo por su hidrogeología, cuenta con una gran cantidad de acuíferos a su disposición, quienes se están viendo afectados por la sobreexplotación, causando intrusión salina en los acuíferos costeros, mientras para los acuíferos no costeros, se prevé que pueden secarse parcial o totalmente porque el ritmo de la extracción del agua, no es consecuente con la recarga anual de acuíferos (WWAP, 2019).

Para esta problemática se han buscado soluciones como la implementación de técnicas MAR, que significa gestión de la recarga de acuíferos, en la que se recargan de manera intencional con aguas superficiales, lo cual aporta beneficios como la restauración por intrusión marina, controla la desertización, reduce pérdidas por evaporación, ayuda a la regeneración hídrica entre otras. (Fernández, 2014). Esta técnica es empleada en Rajasthan India, mediante la construcción de diques de contención en los arroyos, con el objetivo de desviar el agua a los acuíferos, aumentando así su disponibilidad en tiempos de sequía (WWAP, 2019).

Por otra parte las naciones unidas en el último informe mundial de recursos hídricos, han sugerido, el uso de la fitorremediación y biorremediación como técnicas para el tratamiento futuro del agua subterránea, debido a las afectaciones en su calidad por causas naturales y antropogénicas. La fitorremediación consiste en utilizar plantas para la degradación o eliminación de los contaminantes de las aguas, mientras que la biorremediación se utiliza para la remoción de materia orgánica, a través de la implementación de microorganismos, enzimas, plantas u hongos, permitiendo así restaurar el agua a sus condiciones iniciales (WWAP, 2019). Una de las técnicas de biorremediación más usadas en ensayos, ha sido la desnitrificación, la cual consiste en usar sustratos sólidos orgánicos naturales para la remoción de nitratos, en Chile se hicieron ensayos con plantas de *T. angustifolia* (recolectadas en distintas épocas del año) en reactores Batch, con bacterias desnitrificantes, dando como resultado rendimientos parecidos a los de la lixiviación e hidrólisis. (Deago & Pizarro, 2015). Otras técnicas empleadas para la remoción de nitratos son las de separación, que consisten en separar los iones de nitratos del agua, concentrándolos en un segundo desecho, estas técnicas son la nano filtración, electrodiálisis, osmosis inversa y las resinas de intercambio iónico (Kombo, 2015). La nanofiltración consiste en el uso de una membrana semipermeable que es selectiva y separa dos fases, por la cual pasa el flujo de alimentación de agua, donde quedan retenidas por encima de la membrana las partículas que no son filtradas y sale finalmente el permeado, inicialmente se utilizó para tratar aguas duras eliminando iones de calcio, magnesio y sulfato (Kombo, 2015).

A parte de los nitratos, otro tipo de contaminante presente en las aguas subterráneas es el arsénico, el cual se encuentra en altas concentraciones de forma natural por las formaciones geológicas en países de América Latina como México, Chile y Argentina, y países del sudeste Asiático como Taiwán, Mongolia, China, Japón, India y Bangladés, siendo este último

mencionado el que ha sufrido las mayores afectaciones, por las altas concentraciones de arsénico en sus aguas, causando aproximadamente 200000 casos de envenenamiento (López et al., 2009). Las tecnologías más empleadas para la remoción de arsénico son ablandamiento de agua mejorada, alúmina activa, osmosis inversa, adsorción e intercambio iónico. La adsorción es implementada también para la remoción de turbiedad, además de tener un bajo costo económico, su efectividad dependerá del tipo de adsorbente empleado, los cuales pueden ser minerales, biomasas, biopolímeros, alúmina activa y carbón activado (Fiestas & Millones Ñiquen, 2019). En Mórrope Perú, se hizo un ensayo con muestras de aguas subterráneas provenientes de distintos pozos con presencia de Arsénico, empleando el método de adsorción, usando como adsorbente el carbón activado proveniente de la concha de coco, característico por ser empleado para tratar este tipo de aguas por su gran cantidad de microporos, dando como resultado una óptima remoción del contaminante (Fiestas & Millones Ñiquen, 2019).

Otro de los contaminantes presentes de forma natural en las aguas subterráneas, es el flúor, para el cual se han empleado técnicas de remoción como la osmosis directa, que consiste en utilizar una membrana semipermeable que separa dos sustancias, una es la corriente de agua a tratar y la otra una solución de extracción, a través de la membrana pasa el agua ejerciendo presión osmótica al buscar equilibrar las concentraciones sin gasto de energía. La osmosis directa es generalmente utilizada para desalinizar agua, sin embargo, en un estudio realizado en Alemania, utilizaron muestras de aguas subterráneas provenientes de la India con altas concentraciones de flúor, y se comprobó que la aplicación de esta tecnología utilizando como soluciones extractoras el NaCl y MgSO₄, junto con la nanofiltración, resulta eficaz para la remoción de flúor (Pal, Chakraborty, Pal, & Linnanen, 2015).

Además del flúor, se han encontrados trazas de metales pesados en acuíferos de España y Portugal, los cuales han sido inmovilizados mediante el uso de barreras absorbentes in situ, técnica que consiste en la inyección de nano partículas de óxido de hierro en sedimentos a través de pozos, las cuales precipitan sobre el material sin obstruir los poros del acuífero. Esta técnica ha dado excelentes resultados y a futuro se espera utilizar para la remoción de cianuros e hidrocarburos policíclicos aromáticos (Comisión Europea, 2018).

Por otro lado cabe mencionar que los acuíferos de las zonas costeras tienen problemas de intrusión marina, debido a sus constantes interacciones con cuerpos de agua salinos, requiriendo así un tratamiento diferente, por esta razón se han empleado alternativas como el uso de barreras activas, conformadas por una fila de pozos paralelos a la costa que bombean el agua salada del acuífero (Post & Abarca, 2010). Este tipo de acuíferos puede ser tratado también con procesos de desalinización, por la concentración de sales presentes, las alternativas más empleadas son la nanofiltración, osmosis inversa y electrodiálisis. En Túnez se realizó un experimento con muestras de agua salobre aplicando las tecnologías mencionadas, dando como resultado que la técnica menos eficiente fue la nano filtración, porque las concentraciones de los sólidos totales disueltos fueron superiores a los valores establecidos por la OMS, seguido de la electrodiálisis, que dio como resultado los valores más bajos de este contaminante, además de ser económicamente viable por su bajo consumo energético, y por último la osmosis inversa, que resultó ser la más eficiente de todas por su alta remoción de sales y materia orgánica (Walha, Amar, Firdaous, Quéméneur & Jaouen, 2007).

Como se pudo evidenciar en lo anterior, la electrodiálisis es un proceso eficiente y viable, que consiste en el movimiento de los iones de la salmuera, a través de las membranas por la aplicación de una corriente generada por un par de electrodos. Las membranas usadas son selectivas de intercambio iónico, es decir permiten el paso de iones con igual carga pero no de diferente carga, dando como resultado agua dulce (Claudio, 2018).

En cuanto a la región de Centro América y el Caribe, se puede observar que países como Costa Rica, presentan problemas de contaminación en sus acuíferos por nitratos y patógenos, causados por la contaminación de materia fecal proveniente de pozas sépticas, adicional a los problemas de intrusión salina en los acuíferos cercanos a la costa por la hidráulica de las aguas de esta zonas, variando de bicarbonatadas cálcicas o magnésicas clóricas a clóricas sódicas o bicarbonatadas clóricas sódicas, elevando así sus niveles de salinidad, conductividad y pH, además de la presencia de metales y otros compuestos químicos causados por el vertimiento de aguas industriales sin tratar, como sucede en Cuba, exceptuando la contaminación por material fecal porque a diferencia de Costa Rica, Cuba tiene sistema de alcantarillado. Una Situación similar a la de Costa Rica, se vive en República dominicana por la cercanía de sus acuíferos con la costa y falta de alcantarillado, por lo que

sus aguas tienen presencia de heces fecales, causando altas concentraciones de coliformes fecales y demás microorganismos (Jiménez & Galizia, 2012).

En la actualidad en América Latina el 20% de las aguas residuales son tratadas según el Banco Interamericano de Desarrollo, sin embargo, hace 8 años solo un 6% recibían tratamiento, mientras que el porcentaje restante se vertía a las fuentes de aguas superficiales y subterráneas, dando como resultado que el consumo de aguas contaminadas por efluentes residuales, fuera la tercera causa de muertes por enfermedades hídricas en esta zona del mundo, por lo que se optó por la cloración para la para mitigar la tasa de mortalidad, siendo esta alternativa la más usada en la actualidad. En México el agua subterránea es su mayor fuente de abastecimiento, tanto para el sector urbano como para el industrial, causando sobreexplotación de acuíferos y a su vez pérdida de aguas superficiales, ecosistemas y agrietamiento de suelos, además de tener contaminantes como flúor, arsénico, hierro manganeso y cromo hexavalente (Jiménez & Galizia, 2012).

En Nicaragua el 70% de agua de abastecimiento proviene de las fuentes subterráneas, las cuales tienen buenas condiciones de recarga, por lo que cuentan con una gran abundancia del recurso y no presentan tanta contaminación en comparación con las fuentes de agua superficiales y tienen un costo económico viable en cuanto a captación y desinfección con cloración, sin embargo, también se han implementado otras técnicas convencionales como la radiación solar, aireación, filtración, etcétera (Jiménez & Galizia, 2012).

2.1.2 Panorama nacional

En el último estudio nacional del agua del año 2018 se identificaron las zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas a lo largo del territorio nacional, que fueron calificadas como: de alta potencialidad, moderada, baja y muy baja (Figura 3). Existen alrededor de 64.196 puntos de agua registrados por las autoridades ambientales del país de los cuales el 54.27% están sobre la cuenca Magdalena-Cauca, el 31.84% en el Caribe y con un 10.04% en el Orinoco. Este estudio se hizo con fines de recolectar información del abastecimiento del agua en 391 municipios del país, teniendo en cuenta aspectos como la hidrogeología, puntos de agua, datos hidráulicos, hidroquímicos e isotópicos, de los cuales se obtuvo como resultado que 116 tienen un alto potencial, 162 un potencial medio y 113 un potencial bajo (IDEAM, 2019). Los tratamientos aplicados para la potabilización de aguas son los sugeridos por las

normativas del país y comprenden principalmente de las etapas de clarificación, filtración y cloración, ya que Colombia no cuenta con una normativa específica para el tratamiento de aguas subterráneas, por lo que las zonas que se abastecen de este tipo de aguas se basan en lo sugerido por las normas y lo adaptan para el tratamiento del agua subterránea dependiendo de su calidad.

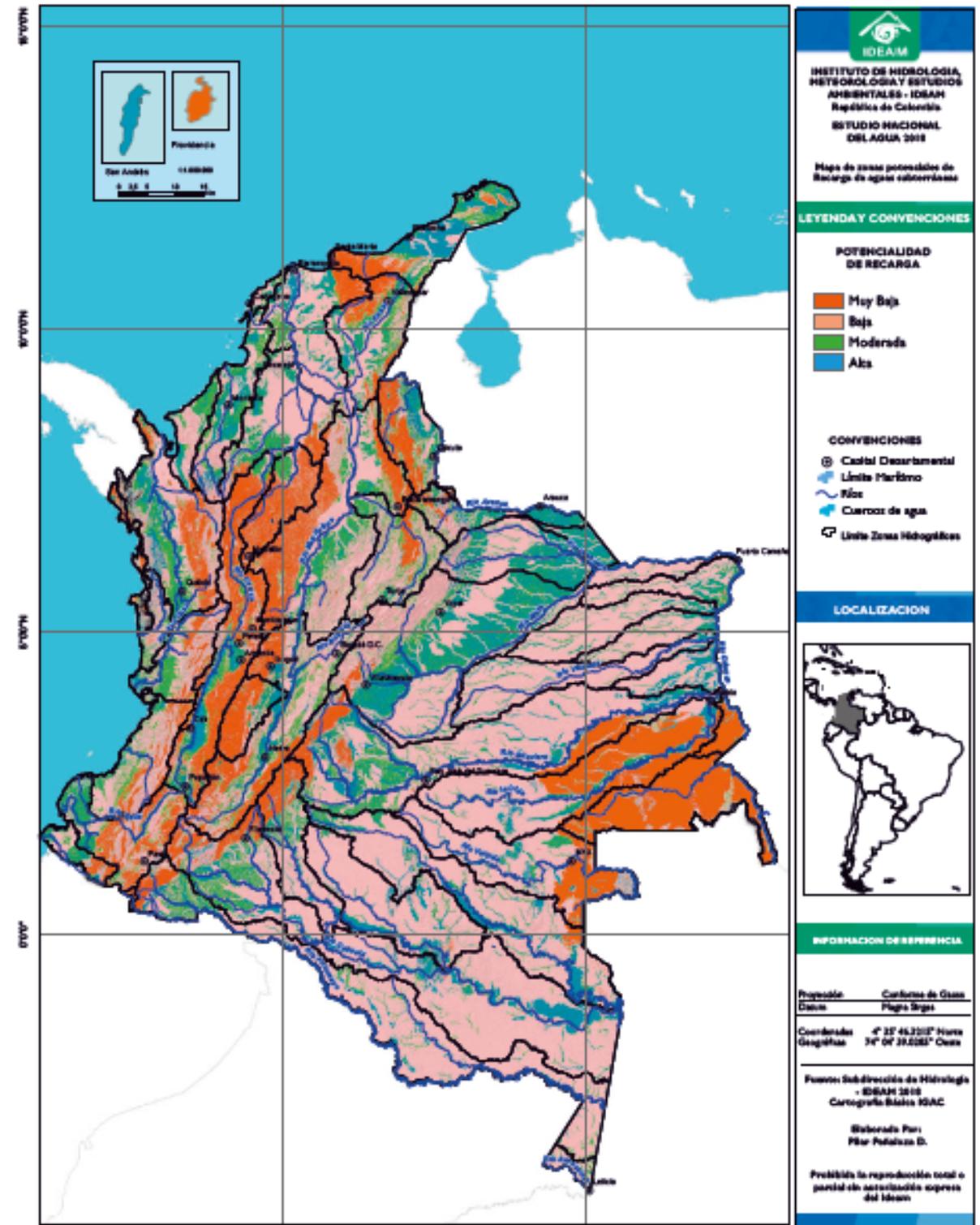


Figura 3. Mapa de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas en Colombia.
 Fuente: IDEAM (2019).

2.1.3 Panorama San Andrés

En la actualidad San Andrés islas depende aproximadamente en un 82% del agua subterránea para su abastecimiento proveniente de pozos artesanales, aljibes y pozos profundos, en el año 2010 dependía de un 80% de estas aguas por lo que se evidencia un crecimiento de la demanda del recurso del 2% en 10 años (Coralina, 2020). La recarga de acuíferos depende en gran parte del ciclo anual de las lluvias que se caracteriza por ser monomodal, donde las precipitaciones más intensas ocurren entre octubre y noviembre, un periodo húmedo entre junio y noviembre pero escasas entre enero y abril, siendo mayo y diciembre meses transitorios, cabe resaltar que este ciclo se ve afectado por el fenómeno ENSO (CDM, 2017).

La recarga y descarga del acuífero de la isla es compleja y heterogénea a lo largo del territorio, debido a las condiciones kársticas, haciendo que presente disolución de la roca al estar compuestas de carbonato de calcio, que al reaccionar con el agua ligeramente acida por la presencia de ácido carbónico (producto de la reacción entre el dióxido de carbono con el agua), produzca la disolución de la roca (CDM, 2017).

La isla está conformada dos acuíferos, el acuífero San Luis se desarrolla sobre la formación de San Luis de 9.89 km^2 y el acuífero San Andrés se desarrolla sobre la formación de San Andrés 17.13 km^2 , ambas de origen coralino. La formación de San Andrés es la de mayor potencial hidrogeológico, se caracteriza por presentar karts con porosidad primaria y porosidad secundaria, siendo esta última la que más posee, los sedimentos de este, están compuestos por calizas microcristalinas, detríticas arcillosas y detríticas arenosas, lo que influye en la porosidad y dureza, siendo estas características las que le confieren una baja permeabilidad, mientras que la formación de San Luis es plana con sedimentos compuestos por calizas cristalinas coralinas y areniscas calcáreas, sin restos fósiles, características que le confieren una alta permeabilidad. San Andrés tiene dos fallas, las cuales son: La falla del Cove, que es donde se localizan la gran mayoría de pozos de la isla (figura 4) por lo que es un punto de gran abastecimiento para el acueducto, y la falla de San Andrés que tiene zonas de recarga y acuíferos, a parte de las fallas mencionadas la isla tiene diaclasas, que son unas de las zonas que proveen de recarga a los acuíferos (UNAL, 2010).

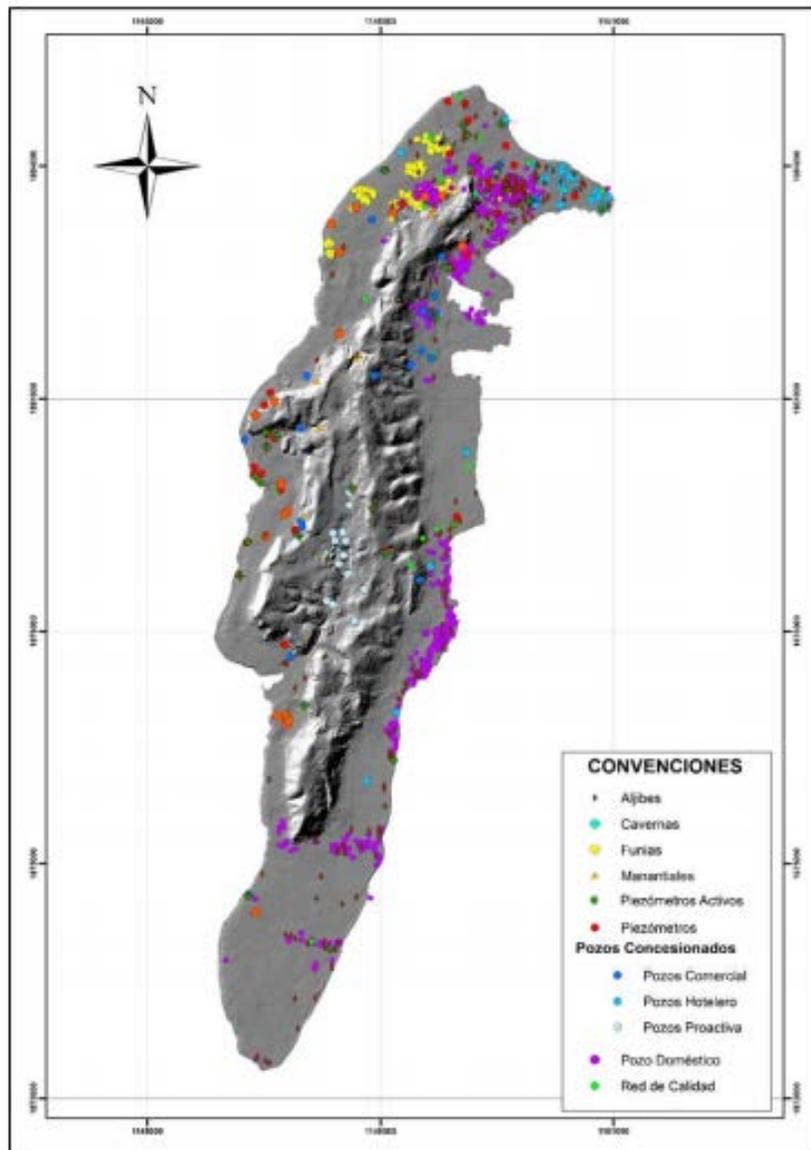


Figura 4. Mapa de localización de puntos de agua en San Andrés. Fuente: CDM (2017).

En el Valle del Cove se encuentran 33 pozos profundos, de los cuales se están aprovechando solo 13 pozos, 6035 entre aljibes y pozos barrenados, se sabe que la recarga de este acuífero es parcialmente inmediata por la relación que existe entre los piezómetros y lluvias en épocas de altas precipitaciones, lo cual se comprobó con la construcción y monitoreo de pozos de observación, alcanzando hasta los 10 msnm en las zonas altas de la cuenca y valores por debajo del nivel del mar en la falla de la cuenca en el verano (UNAL, 2010). La recarga no es inmediata porque una de las variables que interfiere en esto, es el tipo de suelo de la zona, la cual se caracteriza por tener suelo con texturas finas, moderadamente finas y con partículas

gruesas en las diferentes zonas del valle, haciendo que la infiltración sea baja en las áreas donde hay suelo arcilloso en épocas lluviosas por las expansión y contracción de este tipo de suelos, formando así una capa impermeable que hace que tengan una transmisión de agua lenta. Para el caso de las cuencas rurales poseen suelos con texturas moderadamente gruesas con partículas finas por lo que en estas zonas que están distribuidas al este y oeste de las colinas de la isla presentan una infiltración moderada (CDM, 2017). En ciertas zonas del Cove hay intrusión salina causada por la profundidad de perforación de algunos pozos, que atraviesan la interfase de agua dulce y salada, sin embargo, este no es el único problema que afecta la calidad del agua en este sector, la batimetría ha incidido en la karstificación y formación de cavernas, afectando la salobridad y dinámica de las aguas (UNAL, 2010).

Los aljibes y pozos barreneros están localizados en la formación de San Luis, donde la extracción es alta en comparación con los pozos profundos del Cove, cabe resaltar que se extrae agua salada de este sitio para desalinizarla. La formación de San Luis en la parte oriente y nororiente de la isla, tiene aguas muy dulces por la barrera de corales que amortigua las olas, en comparación a la zona occidental de la isla que tiene pendientes fuertes y no tiene amortiguamiento de olas dando como resultado aguas salobres (UNAL, 2010).

San Andrés se abastece principalmente de agua subterránea, sin embargo, se abastece también de agua desalinizada, tratada y lluvia en los distintos sectores que se clasificaron en tres, los cuales son: North End que es la parte norte, la zona rural comprendida por el Cove, la Loma y San Luis, y la zona South o sur de la isla. La planta desalinizadora que funciona con osmosis inversa, se encuentra en el sector de Lox Bight y es manejada por proactiva, esta planta puede producir un caudal de 50 l/s de agua potable pero solo produce un caudal de 42.4 l/s, sin embargo, al sector North End el cual es abastecido en parte por esta planta, no le llega este caudal de agua, si no 23 l/s porque se dan pérdidas que pueden ser causadas por conexiones ilegales a las tuberías del acueducto y conexiones con bypass del medidor (CDM, 2017).

La planta de tratamiento de agua potable Duppy Gully abastece gran parte de la zona rural con agua tratada que funciona con tratamiento químico y cloración, esta planta puede producir un caudal aproximado de 66 l/s pero produce un caudal de 14.4 l/s por las limitaciones de agua cruda de los pozos del Valle del Cove perteneciente a la formación de

San Andrés, sin embargo, debido a pérdidas a los usuarios solo les llega un caudal de 8.3 l/s (CDM, 2017).

Se hizo un plan de desarrollo entre los años 2008 y 2011 que indica los subsectores que cuentan con el servicio de acueducto, siendo este servicio a diario para los hoteles, el barrio Sarie Bay y el sur de la isla, mientras que los otros subsectores que son alrededor de 43 reciben el servicio en su mayoría cada 15 días por lo que se puede constatar que el sector hotelero es privilegiado por encima de la comunidad. El sector turístico se abastece de agua proveniente de los acuíferos y algunos hoteles cuentan con plantas desalinizadoras que funcionan con osmosis inversa opción que aunque costosa, es viable para evitar la sobreexplotación del acuífero por lo que este sector en su totalidad debería solo abastecerse de agua desalinizada. Se ha analizado que la mejora en acueducto e infraestructura podría satisfacer en gran parte la demanda del recurso hídrico, por lo que no sería necesaria la construcción de plantas de tratamiento, ni el uso de los carrotanques que representan un costo elevado en comparación con la desalinización (UNAL, 2010).

2.1.4 Otras alternativas de tratamiento de aguas para consumo humano

Se han hecho diversas investigaciones con respecto a la aplicación de otras alternativas de potabilización diferentes a las convencionales, una de las propuestas es el uso de la energía solar, basándose en el ciclo hídrico, aprovechando el cambio de fase del agua de líquido a vapor por medio de la adición de calor a diferentes temperaturas para la remoción de minerales, seguido de la condensación del vapor quedando así libre de contaminantes, este proceso se lleva a cabo por medio de colectores de caja de efecto invernadero, de placa plana y concentradores solares los cuales están descritos en la tabla 1 (Forero & Zuluaga, 2012).

Tabla 1. Tipos de colectores usados en la potabilización de aguas con energía solar.

Tipo de colector	Funcionamiento
Caja efecto invernadero	Absorben la radiación en un recipiente de color negro donde la energía lumínica es transmitida al agua, calentándola y haciendo que cambie de fase, el vapor generado tiene contacto con un vidrio al que le cede energía

	y termina condensándose y cayendo sobre el recipiente recolector.
Caja de placa	Absorben la radiación en una placa negra usando el mismo principio que la caja invernadero en el cambio de fase de líquida a gaseosa, en lo que difiere es en la condensación porque se usa un serpentín de tubos de cobre de color negro por la alta conductividad de calor, en donde el vapor pasa por el espiral y va perdiendo energía calorífica, causando así el cambio de fase gaseosa a líquida.
Colector concentrador	Existen 4 diferentes diseños. <ol style="list-style-type: none"> 1. Tubería acoplada con un foco de calor que emite la radiación y pasa el fluido en estado gaseoso a un serpentín. 2. Recipiente puesto en el foco y al darse el cambio de fase, el agua pasa por una tubería hasta un condensador. 3. Fluidos diferentes al agua, que se calientan a menores temperaturas los cuales están contenidos en recipientes al vacío fuera del área de captación y que se calientan con la radiación proveniente del foco. 4. Súper conductor de calor, donde un fluido en un recipiente aislado y al vacío necesita menos radiación y se usan tubos de calor, los cuales están cerrados pero por su interior fluye el líquido que al calentar el tubo pasa a vapor y luego se condensa nuevamente el fluido al recorrer el tubo.

Nota. Adaptación. Fuente: Forero, J. E. C., & Zuluaga, D. A. H. (2012). Potabilizar agua con energía solar, una alternativa para las comunidades más alejadas de los centros urbanos. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 4(6), 121-132.

En Colombia la comunidad indígena Wiwa de Seyamake, en la Sierra Nevada de Santa Marta, tiene una potabilizadora que funciona con placas solares con una capacidad de

producir agua potable a 8 metros cúbicos por hora, abasteciendo a 400 personas por día (Acciona, 2017). En la comunidad indígena de Kamusuchiwou, de la Alta Guajira colombiana se potabiliza agua proveniente del mar por medio de un pozo profundo, el cual es bombeado por una bomba solar y lleva el agua a una planta de destilación solar, aprovechando las altas radiaciones en esta zona por su ubicación geográfica logrando abastecer de agua potable cerca de 56 personas (Colciencias, 2014). En la tabla 2 se muestran algunas de las alternativas propuestas mediante ensayos implementando plantas en procesos de coagulación y floculación.

Tabla 2. Alternativas de potabilización implementando plantas en procesos de coagulación y floculación.

Técnica	En que consiste	País de Autor implementación
Coagulación con moringa oleífera	La moringa es diluida con agua potable e inyectada al proceso, ofreciendo resultados similares a los coagulantes químicos, permitiendo así tener lodos biodegradables lo cual permite eliminar la etapa de tratamiento de residuos que se generan con el uso de coagulantes químicos	España García, Rivera, (Arnal & Sancho, 2014)
Coagulación con cactus lefaria	El coagulante se elabora mediante el secado, tamizado y pulverización de la planta, a la cual se le realiza extracción solido- liquido mediante la adición de solventes como metanol, acetato de etilo y éter de petróleo, logrando así la separación de la sustancia y el polvo del cactus	Colombia (Molina, 2016).

Floculación con almidón	Proviene de maíz, yuca y papa, ya sea mezclándolo con sulfato de aluminio o cloruro férrico	Colombia	(Arcila & Peralta, 2015).
-------------------------	---	----------	---------------------------

Nota. Adaptación de diversas fuentes de investigación.

Se han hecho investigaciones con tecnologías más avanzadas como es el caso de la nano escala o nanotecnología con el fin de emplear otra manera de potabilizar el agua, implementando nanomateriales como nanoadsorbentes, nanocatalizadores, nanopartículas bioactivas, membranas catalíticas nano estructuradas, y filtración mejorada con nano partículas para la purificación del agua, resaltando la efectividad de los nanoadsorbentes que llega a ser 3 0 4 veces más efectivo que los filtros de carbón activado (Sadegh, Ali, Gupta, Makhoulf, Shahryari-ghoshekandi, Nadagouda & Megiel, 2017).

Tabla 3. Tipos de nanomateriales usados en la potabilización de aguas para la remoción de contaminantes.

Nanomaterial	Uso	Material	Contaminante removido
Nanoadsorbentes	Separación por su alta selectividad para atrapar iones de Pb, Cu y Cd	Quitosan y tripolifosfato	Plomo
		Oxido de cerio	Arsénico
		Akaganeita	Cromo
		Zeolitas	Metales pesados
Nanotubos de carbono	Remoción de alquenos	Carbono	Benceno, tolueno, xileno y etilbenceno
Nanocatalizadores	Degradación	Dióxido de titanio	Alquenos, alcanos, dioxinas, y organoclorados y policlorobifenilos

Nanomaterial	Uso	Material	Contaminante removido
Membranas nanoestructuradas	Purificación de aguas superficiales y subterráneas	Zeolitas, polímeros	Compuestos orgánicos, microorganismos, nitratos y metales

Nota. Adaptación. Fuente: Sadegh, H., Ali, GA, Gupta, VK, Makhlof, ASH, Shahryari-ghoshekandi, R., Nadagouda, MN & Megiel, E. (2017). El papel de los nanomateriales como adsorbentes efectivos y sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de nanoestructura en química*, 7 (1), 1-14.

Existen nuevas tecnologías para la desinfección del agua y microorganismos emergentes, como la fotocátalisis y desinfección electroquímica, debido a que los tratamientos convencionales de desinfección como el cloro y ozono no eliminan en su totalidad ciertos patógenos y generan subproductos. La desinfección por electroquímica se hace sumergiendo en el agua un par de electrodos, que generan un campo eléctrico y destruyen las paredes celulares de los microorganismos y la permeabilidad de sus membranas (Guadalupe, 2017), mientras que la fotocátalisis es un proceso de oxidación avanzada en donde se forman radicales hidroxilos que oxidan a los compuestos orgánicos, generando radicales libres orgánicos que reaccionan con el oxígeno y dan lugar a numerosas reacciones en cadena, las cuales producen estrés oxidativo en los microorganismos y degradación de moléculas orgánicas por lo que resultan ser más efectivos que los desinfectantes convencionales usados para el tratamiento del agua debido a su alto potencial de oxidación. Existen dos tipos de fotocátalisis la homogénea y heterogénea, en la homogénea el catalizador y el sustrato se encuentran en la misma fase y reacciona el ion férrico con el peróxido de hidrogeno produciendo radicales hidroxilos mediante la aplicación de radiación ultravioleta y visible, mientras que en la fotocátalisis heterogénea el catalizador y el sustrato no se encuentran en la misma fase por lo que se le aplica radiación al catalizador que es el dióxido de titanio (está suspendido o inmovilizado) y produce radicales hidroxilos (Nevárez, Espinoza, Quiroz-Chávez & Ohtani, 2017). En investigaciones recientes se ha planteado la construcción de

plantas potabilizadoras de agua en la Provincia de Santa fe, Argentina por medio de implementación de fotocatalisis heterogénea para la desinfección primaria, con el fin de tratar agua proveniente de ríos y reducir el impacto ambiental negativo que generan los subproductos de otros agentes de desinfección empleados (Sosa & Sanjuan, 2018).

2.1.5 Marco normativo nacional para el tratamiento de aguas para consumo humano

En Colombia no existe una normatividad específica para el tratamiento de aguas subterráneas para consumo humano, pero si existe reglamentación general para tratamiento de aguas crudas. A continuación se describe algunos decretos donde se definen los aspectos a tener en cuenta en términos de tratamiento y calidad del agua.

La calidad del agua es regulada de acuerdo a los parámetros establecidos en el decreto 2115 de 2007 el cual esta compilado en la resolución 1076 de 2015 del Ministerio de la protección social, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial en donde se evalúan características físicas tales como la turbiedad, color, olor, sabor y propiedades como la conductividad y pH, quienes deben estar bajo ciertos valores máximos admisibles, lo mismo aplica para la concentración de ciertos metales pesados como el antimonio, arsénico, bario, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y selenio, y compuestos orgánicos como trihalometanos, hidrocarburos aromáticos y policíclicos. También se evalúan los valores máximos admisibles de las características químicas como alcalinidad y dureza, y concentraciones de calcio, cloruros, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, sulfatos, zinc, fosfatos y finalmente los niveles máximos admisibles de ciertos microorganismos tales como Coliformes y Escherichia Coli (bacterias) y Giardia y Cryptosporidium (parásitos). Para garantizar que las muestras de agua provenientes de cualquier empresa que ofrezca el servicio de agua potable cumplan con los parámetros, se envían las muestras a laboratorios avalados por el gobierno, donde se hacen los análisis físico-químicos y microbiológicos, y posteriormente, se calcula el índice de riesgo de la calidad del agua para el consumo, conocido como IRCA mediante la asignación de puntajes de riesgo a las características no aceptables por el puntaje de riesgo asignado a todas las características analizadas, el cual se hace por muestra y mensual cuyos valores van del 0 (sin riesgo) al 100 (inviabile sanitariamente) (Ministerio de la protección social, 2007).

Adicional a los establecido en el decreto anterior, el sistema de protección y control de la calidad del agua está regida también por lo establecido en el decreto 1575 de 2007, mientras que la resolución 0330 del 8 de junio de 2017, reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos, domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo con respecto a los sistemas de potabilización de aguas. En comparación con el decreto 2115 y 1575 de 2007, en la resolución 0330 de 2017 se abordan otros aspectos, como las consideraciones técnicas generales de los sistemas de potabilización de aguas, caracterización y trazabilidad del agua cruda, tecnologías y procesos unitarios de tratamiento, gestión de subproductos de la potabilización, instalaciones complementarias para sistemas de potabilización, puesta en marcha, operación y mantenimiento de sistemas de potabilización. Con respecto a las tecnologías y procesos unitarios además de plantear las tecnologías de tratamiento de potabilización, exige parámetros de referencia de diseño para aireadores, mezcla rápida y sedimentación, características y rangos de tasas de filtración, características de las membranas de filtración, parámetros de desinfección por cloración y radiación ultravioleta (Ministerio de Vivienda, 2017).

3. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló con el fin de evaluar la viabilidad de la implementación de alternativas de potabilización del agua subterránea en la Isla de San Andrés, por lo cual se hizo una revisión bibliográfica a nivel mundial en artículos científicos, tesis, revistas, libros, informes y páginas web en donde se encuentra documentada información específica acerca de la variabilidad climática, intrusión salina, tratamientos de potabilización convencionales y no convencionales, calidad, contaminación por fuentes antropogénicas y naturales del agua subterránea.

Adicional a lo anterior se realizó una búsqueda a nivel nacional sobre el abastecimiento del agua y los sistemas de tratamiento de potabilización de aguas subterráneas empleados en el país, además se revisaron las normativas a nivel nacional que rigen el agua potable, tales como la resolución 2115 de 2007 compilado en el decreto 1076 de 2015 y el decreto 1575 de 2007.

Se consultó la información hidrológica, hidrogeológica, tratamientos de potabilización, oferta y demanda, y calidad del agua subterránea en la isla de San Andrés por medio de la corporación de desarrollo sostenible del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, CORALINA.

Y finalmente se realizó una comparación sobre los sistemas de tratamiento de agua subterránea a nivel mundial con el archipiélago, por lo que se proponen algunas técnicas de tratamientos distintas a las ya empleadas o en su defecto se sugiere complementar las técnicas ya existentes con otras técnicas teniendo en cuenta principalmente la calidad de las aguas.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan las condiciones de calidad del agua específicas de la isla de San Andrés y se proponen alternativas de tratamiento de agua diferentes a las ya utilizadas, o en su defecto se sugiere complementar algunas de las alternativas ya existentes con otras empleadas en diferentes lugares del mundo con características similares.

4.1 Condiciones actuales del agua subterráneas en San Andrés Isla (Calidad y Cantidad)

Existen alrededor de 2900 pozos domésticos de aguas subterráneas en la isla, los cuales son la mayor fuente de abastecimiento, estos presentan un estado de calidad sanitaria deficiente según el inventario de pozos domésticos de la isla de San Andrés del 2006, donde se recopilaron datos acerca del diagnóstico ambiental de los pozos domésticos de agua subterránea de la isla durante las 6 campañas realizadas comprendidas entre el año 2000 y 2006 para el plan de manejo de aguas subterráneas, del cual se seleccionaron al azar 187 muestras de pozos pertenecientes a la formación San Andrés y San Luis, con el fin de analizar compuestos nitrogenados, cloruros, conductividad eléctrica, coliformes totales, fecales, y enterococos de los cuales se obtuvo resultados que registraron en un 71% de las muestras con contaminación por nitrogenados y un 96% con contaminación microbiológica según los rangos establecidos para aguas destinadas para el consumo humano (Coralina, 2006).

A continuación, en la tabla 4, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 4.

Concentración de parámetros medidos en los pozos de agua subterránea de San Andrés.

Indicador	Causa	% por encima del límite de permisibilidad para consumo humano	Concentración permitida por la normativa	Concentración en la muestra
------------------	--------------	--	---	------------------------------------

Detergente	Vertimientos de aguas grises	1	0.5 mg/l	1.0 mg/l.
Amonio	Materia fecal	42.8	1 mg/ml	925 mg/l
Nitratos	Aguas residuales y fertilizantes	45.5	10 mg/l	157 mg/l
Nitritos	Aguas residuales y fertilizantes	3.2	0.1 mg/l	925 mg/l
Cloruros	Intrusión salina	60.64	250 mg/l	6761 mg/l
Conductividad eléctrica	Iones	60.42	50-1000 μ S/cm	19860 μ S/cm
Coliformes totales	Escherichia, Klebsiella, Enterobacter y Citrobacter	84	0UFC/ 100 cm ³	
Coliformes fecales	Materia fecal	82	0UFC/ 100 cm ³	
Enterococos	Materia fecal	88	0UFC/ 100 cm ³	

Nota. Adaptación. Fuente: Coralina. (2006). Protección y manejo sostenible del recurso hídrico del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Inventario de pozos domésticos de la Isla de San Andrés sexta campaña.

Según los resultados obtenidos se puede analizar con respecto a los indicadores que se salen del rango de permisibilidad que:

- Los niveles de detergente en casi la totalidad de las muestras no exceden el rango permisible a pesar de la baja cobertura de alcantarillado y el vertimiento de aguas residuales, se cree que esto se da porque el suelo actúa como filtro al pasar el agua, reteniendo grandes concentraciones del contaminante antes de llegar al acuífero (Coralina, 2006).

- Los coliformes totales están conformados por las bacterias Escherichia, Klebsiella, Enterobacter y Citrobacter, las cuales están asociadas a enfermedades de origen hídrico como hepatitis A, diarrea, enfermedades transmitidas por alimentos, tifoidea y paratifoidea (Rodríguez, García & García, 2016).
- Los nitratos y nitritos están presentes de forma natural en las aguas por su geología y tipo de suelo entre un rango de 9 mg/litro y 0.3 mg/litro, respectivamente, en términos generales de la muestras analizadas, un 71% no cumple por lo menos con algún indicador, siendo los barrios de la zona norte los que presentan mayor contaminación por nitratos y nitritos, mientras que los de la zona sur presentan mayor contaminación por amonio (Coralina, 2006).
- Los cloruros en el agua subterránea están presentes en bajas concentraciones de forma natural por las rocas e infiltración de aguas lluvias que arrastran iones cloruros del mar y del suelo por la acción de los vientos, se obtuvo un exceso de cloruros por la intrusión salina causada por la sobreexplotación de acuíferos (Coralina, 2006).

Los datos más recientes de la calidad del agua en San Andrés fueron los resultados obtenidos del monitoreo a la calidad del agua subterránea por unidades de planificación insular del año 2019, realizado por Coralina mediante la toma de muestras de agua provenientes de aljibes y pozos domésticos analizando alrededor de 530 muestras para análisis físico-químicos y 30 para análisis microbiológicos (Coralina, 2019).

Tabla 5. Concentración de parámetros medidos en los pozos de agua subterránea de San Andrés.

Indicador	Causa	% por encima del límite de permisibilidad para consumo humano	Concentración permitida por la normativa	Concentración en la muestra
Alcalinidad	Iones	85	200 mg/l	280.68 mg/l
Cloruros	Intrusión salina	69	250 mg/l	1910.16 mg/l

Indicador	Causa	% por encima del límite de permisibilidad para consumo humano	Concentración permitida por la normativa	Concentración en la muestra
Conductividad eléctrica	Iones	89	1000 μ S/cm	7282.36 μ S/cm
Calcio	Interacción con la roca	91	60 mg/l	165.44 mg/l
Magnesio	Interacción con la roca	59	36 mg/l	116.96 mg/l
Dureza total	Interacción con la roca	82	300 mg/l	852.04 mg/l
Nitratos	Aguas residuales y fertilizantes	55	10 mg/l	17.72 mg/l
Nitritos	Aguas residuales y fertilizantes	22	0.1 mg/l	0.52 mg/l
pH	Carácter del agua	0	6.9 – 9	7.32
Sólidos disueltos totales	Aguas residuales, escorrentía, fuentes naturales y antropogénicas	88	500 mg/l	2571.87 mg/l
Sulfatos	Residuos industriales, Oxidación y esquistos	80	250 mg/l	311.2 mg/l

Indicador	Causa	% por encima del límite de permisibilidad para consumo humano	Concentración permitida por la normativa	Concentración en la muestra
Coliformes totales	Escherichia, Klebsiella, Enterobacter y Citrobacter	83	0UFC/100 cm ³	
Coliformes fecales	Materia fecal	63	0UFC/100 cm ³	
Enterococos	Materia fecal	56	0UFC/100 cm ³	

Nota. Adaptación. Fuente: Coralina (2019). Resultados del monitoreo a la calidad del agua subterránea por unidades de planificación insular.

En ese último informe se incluyeron otros parámetros a parte de los descritos en la recopilación de las campañas del 2006, estos nuevos parámetros son los exigidos por la resolución 2115 de 2007 los cuales se encuentran descritos a continuación:

- La alcalinidad indica presencia de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, la mayoría de muestras exceden los valores permisibles porque son grandes las cantidades de especies iónicas presentes en ellas.
- Los iones calcio y magnesio están presentes de forma natural en las aguas por las interacciones de los cuerpos acuáticos con las rocas, siendo mayor la concentración de estos en las aguas subterráneas que en las superficiales, por esta razón en las muestras tomadas se superan los valores máximos permisibles según la normativa.
- La dureza total está relacionada con las sales de magnesio y calcio en el agua por lo que depende también de las interacciones de los cuerpos de agua con las rocas, dando como resultado valores altos en aguas subterráneas.

- El pH indica la acidez, neutralidad o basicidad de las aguas, variaciones en el indican presencia de contaminación o cambios ambientales, con respecto a las muestras tomadas no exceden los valores de permisibilidad establecidos, esto está asociado a la presencia de carbonatos, bicarbonatos, anhídrido carbónico y dióxido de carbono que regulan naturalmente el pH en aguas de esta naturaleza.
- Los sólidos totales disueltos están compuestos por materia orgánica, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sales de calcio, magnesio, potasio y sodio procedentes de fuentes naturales y antropogénicas, en las muestras analizadas se excede el valor permitido, debido al vertimiento directo de aguas residuales al suelo e interacciones de los acuíferos con la roca.
- Los sulfatos están presentes de forma natural en las aguas y se intensifican por sus reacciones con otros minerales, por esta razón las aguas analizadas tienen una concentración superior a la permitida, debido a las altas concentraciones de minerales que posee.

De lo anterior se puede concluir que en ambos informes, los indicadores de nitratos, nitratos, cloruros, conductividad eléctrica, enterococos, coliformes fecales y totales no se pueden comparar entre sí porque el número de muestras es mayor en el informe final de la campaña de 2006 que en el último informe, sin embargo, es evidente que durante los años transcurridos siguen excediendo estos parámetros los valores admisibles permitidos (Coralina, 2019).

En términos generales, las aguas de mejor calidad son las de la cuenca del Cove, quienes tienden a ser bicarbonatadas cálcicas dentro de la cuenca y cloruradas fuera de la cuenca por la cercanía con el mar a pesar de esta en la misma zona, mientras que las de la formación de San Luis son clorurada- sulfata a excepción de la zona nororiental y oriental (UNAL, 2010).

A parte de la calidad del agua otro aspecto a contemplar es la oferta y demanda de agua en la isla, donde es mayor la demanda de agua por parte del sector turístico que la de la comunidad residente (figura 5).



Figura 5. Oferta vs demanda de agua en San Andrés. Fuente: CDM (2017).

Se puede analizar que la mayor oferta de agua es la proveniente de los pozos de San Luis, seguida de otras aguas (pozos artesanales y barreneros), pozos de San Andrés, agua desalinizada (plantas de hoteles y de proactiva), agua tratada por la planta de Duppy Gully, y por último el agua captada de lluvias.

4.2 Propuestas de tratamiento de aguas subterráneas (Según lo consultado en las experiencias internacionales y nacionales)

La propuesta de soluciones presentada por el plan director del recurso hídrico del 2017, teniendo en cuenta la operación de la PTAP Duppy Gully, sugiere una optimización del sistema de tratamiento por medio de una adecuada dosificación de cal a las aguas duras, debido al uso de dosis elevadas, que causan deterioro en las tuberías y afectaciones en la calidad del agua. Para esto sugiere que la dosificación debe ser hecha de acuerdo al caudal de agua de alimentación, sin embargo, también se propone la eliminación de la técnica de adición de cal por la nanofiltración, y mejoras en la etapa de desinfección con la dosificación de hipoclorito de sodio y el tiempo de contacto (CDM, 2017).

De acuerdo a la información recolectada a lo largo de esta investigación, el ablandamiento de las aguas no está únicamente limitado a tratarse con cal y nanofiltración, sino que también, podrían implementar técnicas como la osmosis inversa y la electrodiálisis como se hizo en

Túnez, África para el tratamiento de aguas salobres. La desinfección a parte de la cloración, podría ser tratada también con la desinfección electroquímica y fotocátalisis con nanopartículas como el dióxido de titanio y fotocátalisis heterogénea como se ha propuesto en la provincia de Santa fe, Argentina para evitar los subproductos generados por la cloración.

Por otro lado, también se plantea la construcción de un reservorio de aguas superficiales que opere en conjunto con la planta, donde se tendrán que tener en cuenta que el caudal a tratar sería una mezcla de agua lluvia y subterránea, lo que aparentemente disminuirá la dureza por la dilución, sin embargo, se generaría turbiedad por lo que se recomienda el uso de coagulantes (CDM, 2017). La turbiedad en caso tal se construya un reservorio que opere en conjunto con la planta podría tratarse con coagulantes orgánicos como moringa oleífera y cactus lefaria mencionados en la tabla 2, adsorción con minerales, biomasas, biopolímeros, alúmina activa y carbón activado, siendo esta última técnica de bajo costo y una de las implementadas en Mórrope Perú para la remoción de metales, sin embargo, también se puede usar para la remoción de turbiedad.

Se sugiere también la construcción de otro tipo de obras de superficie tales como fosas, lagunas, canales, zanjas entre otros para mejorar los problemas de intrusión salina y solidos suspendidos, debido a la depuración que se da en la operación de este tipo de construcciones, como se evidencio en la construcción de diques en Rajasthan, India que dio como resultado una alta efectividad en la decantación de solidos suspendidos, sin embargo, para una óptima remoción de materia se puede complementar con el uso de coagulantes orgánicos que podrían ser los mencionados en la tabla 2, además de técnicas de biomerrediación que permiten remover materia orgánica y devolver el agua a sus condiciones iniciales según el último informe mundial de recursos hídricos. Se podría contemplar la construcción de obras de profundidad como pozos, pero estos requieren métodos más rigurosos para la limpieza del agua, lo cual se puede tratar mediante la implementación de membranas de diferente diámetro como la micro filtración, ultrafiltración y nanofiltración, además de airear el agua para la remoción de contaminantes orgánicos por los problemas de colmatación. En la actualidad en esta zona hay un pozo abandonado y un reservorio, los cuales no están en uso, sin embargo, se debería aprovechar estas obras en conjunto con la construcción de una planta potabilizadora que funcione con colectores de caja de efecto invernadero, de placa plana y

concentradores solares como se usa en algunas comunidades indígenas colombianas, teniendo en cuenta la radiación solar intensa en ciertas épocas del año, siendo esta una alternativa en épocas de escasez de lluvias.

5. CONCLUSIONES

El abastecimiento de agua en Colombia proviene en su mayoría de aguas superficiales, siendo muy pocos los lugares que se abastecen de aguas subterráneas, por lo que se obtuvo poca información, se sabe que las técnicas empleadas actualmente son las convencionales, mientras que las no convencionales se han empleado en muy pocas zonas del país o simplemente se han estudiado a escala laboratorio.

La normativa colombiana con respecto al agua potable no es específica para el tratamiento del agua subterránea, sin embargo, los pocos lugares del país que se abastecen de estas aguas, se basan en la resolución 2115 de 2007 compilada en el decreto 1076 de 2015 quien reglamenta la calidad de las aguas, en conjunto con el decreto 1575 de 2007 que reglamenta los requisitos técnicos relacionados con los sistemas de potabilización de las aguas.

El 82% del abastecimiento de agua en San Andrés islas depende de las aguas subterráneas, las cuales presentan deterioro en su calidad por la sobreexplotación de acuíferos e infiltración de aguas residuales provenientes de pozas sépticas, causando contaminación por ion cloruro, intrusión marina, materia fecal y compuestos nitrogenados.

Al relacionar los informes del año 2006 y 2019 se evidencia que a pesar de los años transcurridos la calidad de las aguas no mejora, si no que al contrario sigue habiendo una elevada concentración de nitratos, nitritos, cloruros, conductividad eléctrica, enterococos, coliformes fecales y totales los cuales están por fuera del rango de permisibilidad para el agua potable según lo establecido en la normativa.

Las técnicas implementadas actualmente para el tratamiento de aguas subterráneas en la isla son la desalinización por osmosis inversa en aguas salobres, mientras que para las aguas duras se implementa tratamiento químico con coagulantes y cloración para la desinfección.

Se sugiere recuperar los reservorios de agua ya existentes en la isla, para disminuir la dureza de las aguas subterráneas al ser mezcladas con agua lluvia. Estos reservorios pueden operar en conjunto con una planta potabilizadora que funcione con paneles solares o colectores de energía solar, aprovechando la radiación intensa en ciertas épocas del año, como se ha hecho en algunas zonas de Colombia con difícil acceso al agua potable.

Las aguas subterráneas de la isla son duras por la interacción natural del agua con la roca, ocasionando una alta concentración de iones de magnesio y calcio, por lo que se ha venido empleando cal para su tratamiento, sin embargo, existen otras técnicas que son empleadas en diversos países como la nanofiltración, osmosis inversa y electrodiálisis, las cuales han dado resultados óptimos en el ablandamiento de aguas duras por lo que podrían implementarse en San Andrés.

Para la remoción de materia orgánica en el tratamiento de aguas de la isla se emplean coagulantes químicos, por lo que se propone el uso de coagulantes orgánicos, adsorción, biorremediación e implementación de membranas filtrantes de diferente tamaño de poro, como se ha realizado en distintas zonas del mundo, las cuales son económicas, viables y devuelven el agua a sus condiciones iniciales.

Las aguas subterráneas de la isla requieren tratamiento de desinfección por la presencia de bacterias, lo cual se hace con hipoclorito de sodio, sin embargo, sería interesante contemplar el uso de otras alternativas como la desinfección electroquímica y fotocátalisis, las cuales resultan ser eficientes y no generan subproductos como la cloración.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acciona. (2017). Agua potable para los Wiwa | ACCIONA. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=roIZZP9pl_Y&feature=emb_logo

Aguado, J. (2010). El agua en el territorio, la cultura y la política de San Andrés Isla: Una historia ambiental del siglo XX para el siglo XXI. San Andrés Isla: Universidad Nacional de Colombia-Sede Caribe. Instituto de Estudios Ambientales (Idea)- Bogotá. Facultad de Ciencias Económicas. Programa de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo.

Arcila, H. R., & Peralta, J. J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136-153.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2020). Disponible en: <https://www.iadb.org/es/mejorandovidas/como-esta-america-latina-en-terminos-de-saneamiento>.

Cashman, A. (2013). La seguridad del abastecimiento de agua en el Caribe. Inter-American Development Bank.

CDM Smith. (2017). Plan director del recurso hídrico de San Andrés- PDRH.

Claudio, O. (2018). Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable.

Colciencias. (2014). Potabilización de agua mediante destilación solar en la comunidad Kamusuchiwou, Alta Guajira. Disponible en: <https://ideasparaelcambio.minciencias.gov.co/sites/default/files/Implementacion-Uribia.pdf>

Comisión Europea. (2008). Protección de las aguas subterráneas en Europa la nueva directiva sobre las aguas subterráneas – consolidación del marco normativo de la UE. Disponible en: <https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/groundwater/pdf/brochure/es.pdf>

Comisión Europea. (2018). Tecnologías innovadoras para garantizar la seguridad hídrica de Europa ahora y en un futuro. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/article/id/401167-water-innovation-technological-solutions-ensuring-europes-present-and-future-water-security/es>

Comisión Nacional del Agua (2012): Estadísticas del Agua en México, 2011. Agua en el Mundo. Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf.

Coralina. (2006). Protección y manejo sostenible del recurso hídrico del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Inventario de pozos domésticos de la Isla de San Andrés sexta campaña. San Andrés, Colombia.

Coralina (2019). Resultados del monitoreo a la calidad del agua subterránea por unidades de planificación insular. San Andrés, Colombia.

Coralina (2020). Agua subterránea usada para el abastecimiento de la isla de San Andrés.

Deago, E. M., & Pizarro, G. E. (2015). *Typha angustifolia* L. evaluada como sustrato sólido orgánico natural para biorremediar agua subterránea contaminada con nitrato. *Rev. I+ D Tecnol*, 11, 41-54.

De López-Geta, J. A., Fornés Azcoiti, J. M., Ramos González, G., & Villarroya Gil, F. (2009). Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo. Instituto Geológico y Minero de España.

Echarddak Yahyaoui, K. (2018). Estudio de distintos sistemas de cloración del agua potable (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Fernández Escalante, E. (2014). Técnicas de recarga artificial de acuíferos: Aplicación en entornos Mediterráneos. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/7444/T%C3%A9cnicas%20de%20Recarga%20Artificial%20de%20Acu%C3%ADferos.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Fernández Sanz, A. (2020). Diseño de un MBR para el tratamiento de aguas residuales urbanas en una población de 11.500 habitantes-equivalentes (Doctoral dissertation).

Fiestas Eca, M. S., & Millones Ñiquen, A. L. (2019). Influencia de la concentración y el tiempo de contacto del carbón activado de cáscara de coco en la remoción de arsénico de aguas subterráneas de Mórrope.

Forero, J. E. C., & Zuluaga, D. A. H. (2012). Potabilizar agua con energía solar, una alternativa para las comunidades más alejadas de los centros urbanos. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 4(6), 121-132.

García-Fayos, B., Rivera Rodríguez, F. J., Arnal Arnal, J. M., & Sancho Fernández, M. (2014). Diseño de una planta de potabilización para comunidades rurales utilizando el compuesto coagulante de la semilla de *Moringa oleifera*.

Gil, J. W. I., Chaparro, F., Jiménez, J. D. R., & Quiroga, H. G. *Acuíferos de San Andrés: Evaluación de la Problemática Ambiental*.

Gleeson, T., Befus, K., Jasechko, S. et al. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geosci* 9, 161–167 (2016). <https://doi.org/10.1038/ngeo2590>

Guadalupe, V. M. (2017). *Procesos electroquímicos*.

IDEAM (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: Ideam: 452 pp.

Instituto nacional de salud (2011). *Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio*. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2011%20Manual%20toma%20de%20muestras%20agua.pdf>

Jiménez Cisneros, B., & Galizia Tundisi, J. (2012). *Diagnóstico del agua. En las Américas*. Red interamericana de academias de ciencias. Foro consultivo científico y tecnológico, ac. Disponible en: https://www.agua.org.mx/wpcontent/uploads/2012/03/Libro_Diagnostico_del_Agua_en_las_Americas.pdf

Kombo Mpindou, G. O. M. (2015). *Estudio experimental de la eliminación de nitratos mediante nanofiltración: aplicación a la determinación de modelos de transporte*

Molina, N. F., Rodríguez, E. J. M., & Ariza, C. P. (2016). Coagulantes naturales en sistemas de flujo continuo, como sustituto del $Al_2(SO_4)_3$ para clarificación de aguas. *Producción+ Limpia*, 11(2).

Ministerio de la protección social, M. d. (22 de junio de 2007). Resolución número 2115 de 2007. Disponible en:

https://www.minambiente.gov.co/imageshttps://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf

Ministerio de Vivienda, C. y. (8 de junio de 2017). Resolución 0330 de junio 8 de 2017. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/GuíasRAS/RAS%2520-%2520009.pdf&ved=2ahUKEwjP9fDU3anpAhVuh-AKHTRhBVIQFjAlegQIAxAH&usg=AOvVaw3zmf7Z0CtRymVxz7ZS5fX7>

Nevárez-Martínez, M. C., Espinoza-Montero, P. J., Quiroz-Chávez, F. J., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO_2 . *Avances en Química*, 12(2-3), 45-59.

Pal, M., Chakraborty, S., Pal, P., & Linnanen, L. (2015). Purifying fluoride-contaminated water by a novel forward osmosis design with enhanced flux under reduced concentration polarization. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(15), 11401-11411.

Post, V., & Abarca, E. (2010). Preface: Saltwater and freshwater interactions in coastal aquifers. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 1-4.

Rodríguez Miranda, J. P., García-Ubaque, C. A., & García-Ubaque, J. C. (2016). Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. *Revista de salud pública*, 18, 738-745.

Sadegh, H., Ali, GA, Gupta, VK, Makhlof, ASH, Shahryari-ghoshekandi, R., Nadagouda, MN & Megiel, E. (2017). El papel de los nanomateriales como adsorbentes efectivos y sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de nanoestructura en química*, 7 (1), 1-14.

Sosa, L., & Sanjuan, A. (2018). Planta potabilizadora de agua de río con utilización de fotocatalisis heterogénea para desinfección primaria.

UNAL (2010). Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, facultad de minas. Escuela de geociencias y medio ambiente. Modelación del acuífero San Andrés Islas, Proyecto INAP-Colombia informe final enero 2010.

USGS. (2020). El Ciclo del Agua, The Water Cycle, Spanish. Disponible en: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish#:~:text=A%20lo%20largo%20del%20tiempo,...y%20comienza%2>

Vélez, M., Ortiz, C., & Vargas, M. (2011). Las aguas subterráneas un enfoque práctico colección Guías y Manuales. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Aguas-subterráneas-enfoque-practico.PDF>

Veliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A., & Bataller, M. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 17-34.

Walha, K., Amar, R. B., Firdaous, L., Quéméneur, F., & Jaouen, P. (2007). Brackish groundwater treatment by nanofiltration, reverse osmosis and electro dialysis in Tunisia: performance and cost comparison. *Desalination*, 207(1-3), 95-106.

WWAP (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. Paris, UNESCO.