

**Prediseño de un desalinizador para el abastecimiento de agua potable para los habitantes
de la alta Guajira**

**Por:
Sebastián Camilo Fuertes Tobar**



**Universidad Santo tomas
División de Ingenierías
Facultad de ingeniería Civil
Bogotá D.C.
2024**

Prediseño de un desalinizador para el abastecimiento de agua potable para los habitantes de la alta Guajira

**Por:
Sebastián Camilo Fuertes Tobar**

**Director:
Ing. Antonio Preziosi Ribero**

**Proyecto de Grado presentado para optar al título profesional de:
Ingeniero Civil**



**Universidad Santo tomas
División de Ingenierías
Facultad de ingeniería Civil
Bogotá D.C.
2024**

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Colombia

Dedicatoria

*A mi madre, Guisselle, por acompañarme en cada paso para ser
mejor persona y profesional.*

*También se la dedico a mi abuelo, siempre estuvo a mi lado
dándome conocimiento y fuerzas para continuar.*

*A mi hermano, por todo su apoyo incondicional, espero les sirva
de ejemplo de que todo se puede lograr.*

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi madre que siempre ha estado a mi lado en cada momento, que me ha dado fuerza para continuar y culminar esta etapa en mi vida, en segundo lugar a mi familia, en tercer lugar a la Universidad Santo Tomas y en especial a la facultad de ingeniería civil donde se destacan docentes y administrativos que fueron fundamentales para la culminación del inicio de mi proyecto de vida la etapa universitaria, en 4 lugar al ingeniero Antonio Preziosi por guiarme en éste camino de la investigación.

Resumen

En 2019, la Organización de las Naciones Unidas, preocupada por la desigualdad y la pobreza en el mundo, hizo un llamado mundial a la acción creando los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Para la realización de este proyecto, es importante destacar el Objetivo 6: «Agua limpia y saneamiento», que se centra en garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos los habitantes de la sociedad. Este proyecto busca analizar una nueva tecnología para la recolección y tratamiento de agua, con el fin de garantizar y mejorar las condiciones de salud pública de las personas que no cuentan con este servicio básico. Es decir, esta iniciativa ayuda en la prevención de enfermedades y en la disminución de la desnutrición en niños, adolescentes, adultos y personas de la tercera edad. Para ello, se propone un desalinizador para la recolección de agua de mar y su transformación en agua potable apta para el consumo humano, una variable importante para la mejora continua de la calidad de vida, especialmente en las zonas vulnerables y con mayor pobreza de la sociedad.

Palabras clave: Ósmosis inversa, desalinización, calidad del agua, presión, crecimiento poblacional, tratamiento.

Abstract

In 2019, the United Nations, concerned about inequality and poverty in the world, issued a global call to action by creating the Sustainable Development Goals (SDGs). To carry out this project, it is important to highlight Goal 6: "Clean water and sanitation", which focuses on ensuring the availability and sustainable management of water and sanitation for all inhabitants of society. This project seeks to analyze a new technology for water collection and treatment, in order to guarantee and improve the quality of life of people who do not have this basic service. In addition, this initiative helps in the prevention of diseases and in reducing malnutrition in children, adolescents, adults and the elderly. To this end, a desalinator is proposed for the collection of seawater and its transformation into drinking water suitable for human consumption, an important variable for the continuous improvement of the quality of life, especially in the vulnerable and most poverty-stricken areas of the city. society.

Keywords: Reverse osmosis, Desalination, Water quality, Pressure, Population growth, treatment.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	12
JUSTIFICACIÓN	14
OBJETIVO	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos	15
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
METODOLOGÍA	17
CAPÍTULO 1. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA	20
Marco geográfico	20
1. Ubicación Geográfica.....	20
2. Aspectos Culturales y Sociales	20
3. Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT)	21
3.1. Plan de Ordenamiento Territorial (POT) en la Alta Guajira.....	21
2. Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) en la Alta Guajira.....	21
3. Consideraciones Especiales en la Alta Guajira.....	22
4. Impacto y Perspectivas	23
4. Contexto Ambiental.....	23
5. Infraestructura y Conectividad	24

Aspectos demográficos	24
Estimación de la población	25
Cálculo de proyección futura	27
<i>Cálculo aritmético</i>	28
<i>Cálculo geométrico</i>	29
<i>Cálculo exponencial</i>	31
CAPÍTULO 2. DATOS INICIALES	33
Cálculo de dotación	33
<i>Uso del agua</i>	33
<i>Dotación neta</i>	33
<i>Porcentaje de pérdidas</i>	34
<i>Dotación bruta</i>	34
<i>Demanda</i>	34
CAPÍTULO 3. PROCESO DE DESALINIZACIÓN	36
Fuente de abastecimiento	36
Ósmosis y Ósmosis Inversa:	38
Tratamiento	40
<i>Desinfección</i>	40
<i>Estabilización del pH</i>	41
<i>Coagulación</i>	42
<i>Decloración</i>	43
<i>Filtración</i>	44
Filtros de Arena-Antracita.	44

Filtros de Cartucho en Polipropileno.	45
Osmosis inversa	45
<i>Cantidad de membranas y tubos de presión</i>	49
Postratamiento.....	50
Almacenamiento agua potable.....	53
Energía solar fotovoltaica	54
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA	56
Inversión propuesta.....	56
Presupuesto	56
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59

Lista de figuras

Figura 1. Sexto objetivo de desarrollo sostenible (ODS), agua limpia y saneamiento.....	12
Figura 2. Árbol del problema.....	16
Figura 3. Árbol de objetivos	168
Figura 4. Censo de población y vivienda de 1993 en Colombia	25
Figura 5. Censo de población y vivienda de 2005 en Colombia	26
Figura 6. Censo de población y vivienda de 2018 en Colombia	26
Figura 7. Crecimiento poblacional en la Guajira	27
Figura 8. Proyección Poblacional Método Aritmético Para el Departamento de la Guajira	29

Figura 9. Proyección Poblacional Método Geométrico Para el Departamento de la Guajira.....	30
Figura 10. Proyección Poblacional Método Exponencial Para el Departamento de la Guajira ...	32
Figura 11. Caudal máximo diario (L*seg).....	35
Figura 12. Zona propuesta para la ejecución del proyecto	36

Lista de tablas

Tabla 1. Metodología del proyecto.	18
Tabla 2. Información recopilada de los últimos 3 censos realizados en Colombia para el departamento de la guajira	27
Tabla 3. Proyección de la población método Aritmético para el departamento de la guajira	28
Tabla 4. Proyección de la población método Geométrico para el departamento de la guajira.....	30
Tabla 5. Proyección de la población método Exponencial para el departamento de la guajira....	32
Tabla 6. Cálculos de Demanda para la zona de la alta Guajira.....	34
Tabla 7. Cálculos de pretratamiento desinfección.	40
Tabla 8. Cálculos de pretratamiento Acidificación.....	41
Tabla 9. Cálculos de pretratamiento	42
Tabla 10. Cálculos de pretratamiento Decloración.....	43
Tabla 11. Cálculos de pretratamiento Filtros de arena	44
Tabla 12. Condiciones iniciales para selección de membrana.....	46
Tabla 13. Elección del tipo de membrana.....	47

Tabla 14. Tipos de Membranas SW.....	47
Tabla 15. Distribución Filtros de lechada de calcita.....	52
Tabla 16. Cloración Postratamiento.....	53
Tabla 17. Tanques de Almacenaje Agua Potable.	54
Tabla 18. Resumen propuesta económica.....	57

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Calculo Aritmético crecimiento poblacional _____	28
Ecuación 2. Calculo geométrico crecimiento poblacional _____	29
Ecuación 3. Tasa de crecimiento anual_____	30
Ecuación 4. Calculo Exponencial crecimiento poblacional _____	31
Ecuación 5. Tasa de crecimiento poblacional_____	31
Ecuación 6. Dotación bruta_____	34
Ecuación 7. Número de membranas Osmosis Inversa _____	49
Ecuación 8. Número de tubos Osmosis Inversa _____	49
Ecuación 9. Cálculo de número de membranas y tubos de presión _____	49
Ecuación 10. Reacción química post-tratamiento_____	51

Introducción

La escasez de agua es un problema a nivel mundial que genera consecuencias como enfermedades, hambre y conflictos. Se estima que la demanda mundial de agua puede seguir aumentando a un ritmo del 1 % anual hasta 2050, lo que representa un crecimiento del 20 % al 30 % sobre el uso actual, debido a la intensificación del cambio climático y al incremento de la demanda en los sectores industrial y doméstico. Más de 2,000 millones de personas viven en países que sufren de escasez de agua y aproximadamente 4,000 millones de personas padecen escasez de agua durante al menos un mes al año (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2019), (ver figura 1).

Figura 1. Sexto objetivo de desarrollo sostenible (ODS), agua limpia y saneamiento.



Nota. Tomado de Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2019.

Colombia es uno de los países con mayor biodiversidad y tiene diferentes fuentes de abastecimiento de agua en su territorio, incluyendo ríos, lagunas, lagos, mares y cascadas. Sin embargo, uno de los inconvenientes más grandes es la falta de infraestructura que facilite la

recolección, manejo, transporte y tratamiento del agua, procesos necesarios para suplir uno de los servicios básicos que cualquier ciudadano del planeta debería tener. En específico, la zona de la Alta Guajira es una región desértica en la que habitan diferentes comunidades indígenas que forman parte de la historia de Colombia. Para ayudar a suplir este servicio básico a esta población, es necesario determinar una fuente de abastecimiento de agua que mejore la calidad de vida en la zona.

La falta de agua potable influye directamente en la salud, las actividades diarias e incluso en las actividades laborales de la comunidad, ya que no se cuenta con un servicio de acueducto ni alcantarillado para el transporte constante de agua potable. Esto genera un aumento en las tasas de mortalidad y de desempleo de la comunidad. Al ser una zona desértica y de difícil acceso, se limita la entrada de entes privados y gubernamentales para desarrollar proyectos, ya que es muy difícil encontrar infraestructura vial adecuada para el suministro de los elementos necesarios para la construcción de estructuras que ayuden a las comunidades y pueblos aledaños. Sin embargo, en los últimos años y con la ayuda de líderes sociales, las obras civiles han llegado a gran parte de la zona a intervenir, proporcionando más vías de acceso e impulsando el comienzo de la mejora de la calidad de vida de los habitantes, así como el progreso de la infraestructura y el desarrollo social en la Guajira.

Justificación

La falta de agua potable en la zona de la Alta Guajira afecta directamente la vida de las comunidades, generando problemas de salud, desnutrición y propagación de enfermedades que afectan a todos los habitantes de municipios y resguardos indígenas ubicados en la zona. Para el desarrollo del trabajo se propone realizar el prediseño de un desalinizador amigable con el medio ambiente para la extracción de agua de mar, que funcione como fuente de agua para un acueducto que ayude a mejorar la calidad de vida de la comunidad.

Este proyecto está vinculado con la propuesta de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) denominada Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el Objetivo 6: “*Agua limpia y saneamiento*”. Este objetivo se basa en garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos los habitantes de la sociedad mundial. Acceder al sistema de agua y saneamiento es un derecho vital para las personas, y en nuestro planeta aún hay miles de millones de personas que no cuentan con este recurso, enfrentándose diariamente a la adversidad de no contar con este servicio básico.

Objetivo

Objetivo general

Prediseñar un desalinizador de agua de mar para el abastecimiento de agua potable para los habitantes de la zona de la alta Guajira.

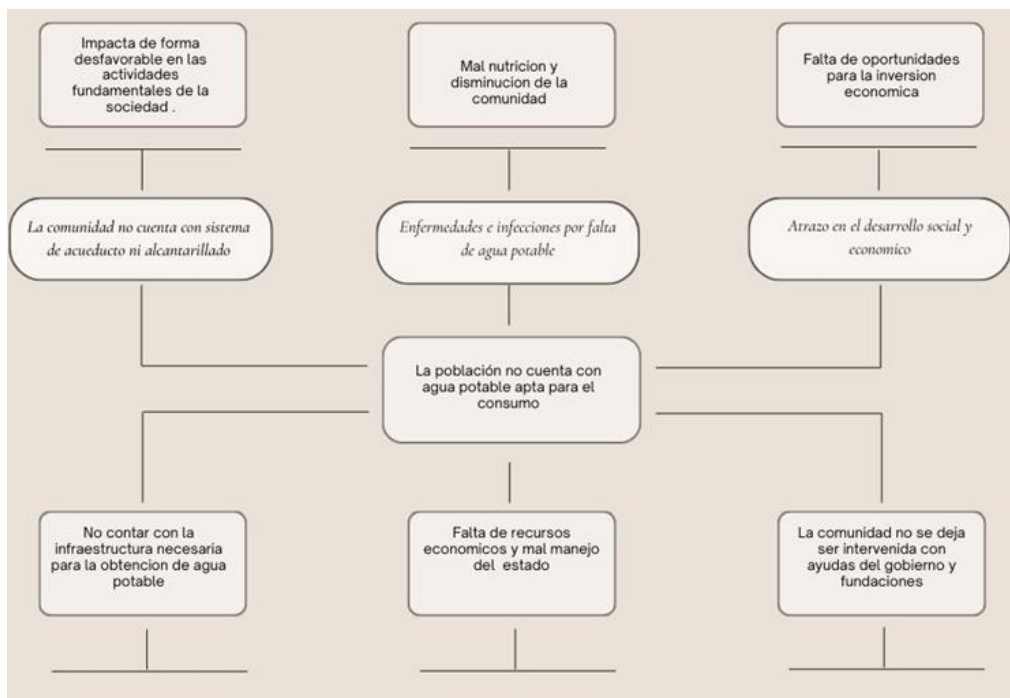
Objetivos específicos

- Planificar el diseño de un desalinizador mediante el crecimiento poblacional de la zona a intervenir en la Guajira.
- Calcular el la demanda de agua potable para la zona de estudio.
- Establecer un sistema de desalinización para la recolección y transformación del agua de mar en agua potable para la zona de la alta Guajira.
- Elaborar un presupuesto para dar a conocer el precio estimado del proyecto a ejecutarse.

Formulación del problema

La falta de agua potable para el consumo de los habitantes de la zona de la Alta Guajira, donde se encuentran las comunidades Wayúu, es un problema crítico debido a la ausencia de acueducto y alcantarillado, ya que no han contado con la presencia del Estado en cuanto a construcción de infraestructura, las causas y consecuencias se presentan en la figura 2 árbol del problema. A lo largo de la historia, estas comunidades no han sido adecuadamente intervenidas para solucionar este inconveniente, generando problemas de salud, infecciones en adultos mayores y niños, y afectaciones en la realización de actividades básicas diarias, lo que conlleva a la malnutrición y a la disminución de la comunidad, La figura 2 muestra el árbol de problemas, en el cual se identifica el problema principal y se detallan las consecuencias que este genera en las comunidades, En este caso, la población no dispone de agua potable adecuada para el consumo. Las posibles causas de esta problemática incluyen la falta de infraestructura necesaria para obtener agua potable, la carencia de recursos económicos, y la gestión ineficaz por parte del Estado. Además, la comunidad se resiste a recibir intervención de ayudas gubernamentales y fundaciones. Las consecuencias de esta situación son graves: la comunidad carece de sistemas de acueducto y alcantarillado, lo que impacta negativamente en las actividades fundamentales de la sociedad. Esto también contribuye a la propagación de enfermedades e infecciones, que a su vez provocan malnutrición, baja natalidad y una elevada mortalidad. Además, se retrasa el desarrollo social y económico, lo que disminuye las oportunidades para la inversión económica.

Figura 2. *Árbol del problema*

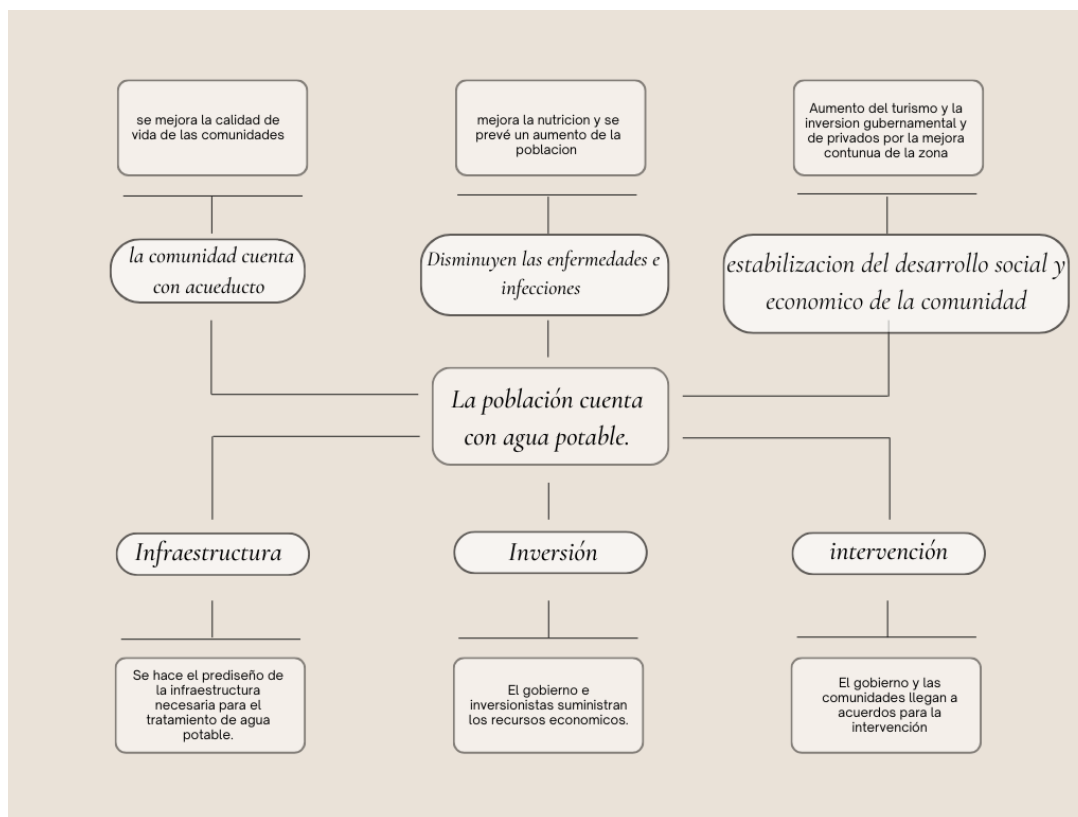


Nota. Elaboración propia.

Metodología

En el desarrollo del proyecto de prediseño de una planta desalinizadora para la alta Guajira, se implementó el árbol de objetivos figura 3 como una herramienta metodológica clave para estructurar y guiar el proceso de formulación de soluciones. El árbol de objetivos permitió desglosar de manera lógica el objetivo principal, identificando objetivos específicos y subobjetivos que abordan las causas principales del problema de escasez de agua potable en la región.

Figura 3. Árbol de objetivos



Nota. Elaboración propia.

Tabla 1. Metodología del proyecto.

METODOLOGIA				
CAPITULO		ACTIVIDAD		DESCRIPCIÓN
1	Estimación de la demanda de agua de la zona	1	Caracterización Geográfica	Estudiar la disponibilidad de recursos hídricos, fuentes de abastecimiento y la ubicación geográfica.
		2	Evaluación de necesidades	Determinar la población objetivo, el consumo de agua y las proyecciones de crecimiento poblacional.

2	Dimensionamiento preliminar	3	Dimensionamiento del sistema	Determinar la capacidad de producción de agua desalinizada necesaria para cubrir la demanda.
3	Sistema de Desalinización	4	Especificaciones técnicas	Desarrollar especificaciones preliminares para los equipos principales (bombas, membranas, unidades de destilación, etc.)
		5	infraestructura complementaria	Identificar necesidades adicionales como almacenamiento, distribución y tratamiento post-desalinización.
		6	Análisis de Energía	Considerar fuentes de energía disponibles (solar, eólica, Diesel, etc.) y su integración con el sistema de desalinización.
4	Evaluación económica	7	Estimación de costos	Calcular los costos iniciales de inversión.

Nota. Elaboración propia.

Capítulo 1. Estimación de la demanda de agua en la zona

Marco geográfico

La Alta Guajira es una subregión del departamento de La Guajira, ubicada en el extremo norte de Colombia. Esta área se caracteriza por su paisaje desértico, su población mayoritariamente indígena (especialmente de la etnia Wayuu), y su aislamiento geográfico y social respecto al resto del país. A continuación, se describe el marco geográfico de la Alta Guajira y se abordan aspectos relacionados con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) en la región.

1. Ubicación Geográfica

La Alta Guajira está situada al norte de la península de La Guajira, limitando al norte y al este con el Mar Caribe, al oeste con la región media de La Guajira y al sur con la Media Guajira. Los municipios principales de la Alta Guajira son Uribia, Manaure y Maicao, siendo Uribia reconocida como la "capital indígena de Colombia". El clima es predominantemente semiárido y árido, con vastas planicies desérticas, dunas y montañas bajas, como la Serranía de Macuira, un oasis en medio del desierto.

2. Aspectos Culturales y Sociales

La población de la Alta Guajira es mayoritariamente indígena, principalmente de la etnia Wayuu, que mantiene un sistema de organización social y territorial propio. La economía local se basa en la pesca, el pastoreo de cabras y, en menor medida, en la minería de sal en Manaure. Además, el turismo en áreas como Cabo de la Vela ha cobrado importancia en los últimos años.

3. Plan de Ordenamiento Territorial (POT)

3.1. Plan de Ordenamiento Territorial (POT) en la Alta Guajira

El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de la Alta Guajira, al igual que los POT en otras regiones de Colombia, es un instrumento de planificación y desarrollo que establece directrices para el uso del suelo, la organización del territorio y la implementación de infraestructura básica, incluyendo el saneamiento.

En términos de saneamiento, el POT de la Alta Guajira suele enfocarse en los siguientes aspectos clave:

Mejoramiento de Infraestructura de Saneamiento Básico: El POT señala la necesidad de mejorar o construir sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, así como la gestión de residuos sólidos. Dado que muchas comunidades carecen de estas infraestructuras, el plan se enfoca en implementar soluciones adaptadas a las condiciones geográficas y climáticas de la región, tales como tecnologías de saneamiento seco y la construcción de plantas de tratamiento.

Acceso a Agua Potable: El acceso al agua potable es una prioridad crítica en la Alta Guajira debido a su aridez. El POT busca garantizar la disponibilidad de agua potable para las comunidades indígenas y rurales, mediante la construcción de acueductos, la recolección de agua de lluvia y la perforación de pozos profundos.

Sostenibilidad y Resiliencia Climática: Se resalta la importancia de diseñar sistemas de saneamiento que sean sostenibles y resistentes a las condiciones extremas de la región, como las sequías prolongadas. Esto incluye la promoción de sistemas de reutilización de aguas residuales tratadas y la gestión adecuada de los recursos hídricos.

Enfoque Participativo e Intercultural: El POT de la Alta Guajira tiene en cuenta las dinámicas culturales de las comunidades wayuu y su relación tradicional con el territorio y los recursos naturales. La planificación del saneamiento debe ser culturalmente apropiada y contar con la participación activa de las comunidades indígenas, respetando sus formas de organización y modos de vida.

Mitigación de Problemas de Salud Pública: El mejoramiento de las condiciones de saneamiento está directamente vinculado con la reducción de enfermedades relacionadas con el agua contaminada y la falta de higiene adecuada. Por ello, el POT promueve la instalación de baños y letrinas seguras, así como campañas educativas sobre higiene.

3. Consideraciones Especiales en la Alta Guajira

En la Alta Guajira, tanto el POT como el EOT deben considerar varias particularidades fundamentales para el éxito de estos instrumentos:

Respeto por la Autonomía Indígena: Dado que la mayoría de la población en la Alta Guajira es indígena, es crucial que los planes de ordenamiento territorial respeten su autonomía y derechos territoriales. Esto implica la participación de las comunidades Wayuu en la elaboración y ejecución de estos planes.

Adaptación al Entorno Natural: La región cuenta con un entorno natural árido y vulnerable, por lo que cualquier plan de ordenamiento debe incluir estrategias para mitigar los efectos del cambio climático, la desertificación, y la escasez de recursos hídricos.

Infraestructura y Servicios Básicos: La deficiencia en infraestructura y servicios básicos, como agua potable, electricidad y salud, es un problema crítico en la Alta Guajira. Los POT y EOT deben priorizar la mejora de estos servicios para elevar la calidad de vida de la población.

4. Impacto y Perspectivas

Los POT en la Alta Guajira tienen el potencial de transformar la región, promoviendo un desarrollo territorial que sea inclusivo socialmente, sostenible ambientalmente y respetuoso culturalmente. No obstante, su éxito depende de una implementación efectiva, que requiere la participación de las comunidades locales y un enfoque adaptado a las particularidades de la región.

4. Contexto Ambiental

A pesar de ser una región árida, la Alta Guajira alberga áreas de alta biodiversidad, como la Serranía de Macuira, que es un área protegida y un ejemplo de la variabilidad ecológica del desierto guajiro. Las principales amenazas ambientales en la región incluyen la desertificación, la sobreexplotación de recursos naturales y el cambio climático, que agrava las condiciones de sequía.

5. Infraestructura y Conectividad

La infraestructura vial en la Alta Guajira es limitada, con pocas carreteras pavimentadas. Las principales vías conectan Uribia y Manaure con Maicao y Riohacha, la capital departamental. El acceso a servicios básicos como agua potable, electricidad y salud es insuficiente, especialmente en las zonas rurales y apartadas.

Aspectos demográficos

Para la planeación del prediseño, se debe realizar un ejercicio de proyección de la estimación futura de la población de la zona que alberga la Alta Guajira. Para esto, se analizarán los diferentes tipos de proyección de la población futura, gracias a los datos obtenidos en los censos nacionales realizados por la autoridad encargada, en este caso, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Estos censos y la estimación de la población urbana sirven como aspecto principal para la determinación del nivel de complejidad y de prioridad del proyecto. Además de analizar y determinar la densidad poblacional futura, se debe evaluar el nivel de expansión de la comunidad y asegurar que este no afecte el plan de ordenamiento territorial (POT) ni el esquema de ordenamiento territorial de la región (EOT) de la región, o específicamente de los municipios a intervenir.

Para este proyecto, se analizarán los municipios de Maicao, Uribí y Manaure, con una proyección de generar agua potable para todo el departamento. La complejidad se evaluará mediante el estudio de los censos de población. En 2018, se realizó el último censo nacional en Colombia, el cual indicó una población total de 818,380 personas en La Guajira. La población de los municipios a intervenir inicialmente es: Maicao con 159,081 personas, Uribí con 168,166

personas y Manaure con 73,152 personas, sumando un total de 400,399 personas. Estos datos se utilizan para determinar que el nivel de complejidad del proyecto es ALTO.

Estimación de la población

Se toman en cuenta los datos presentados por el DANE, seleccionando el número de habitantes en los municipios que componen la Alta Guajira durante los últimos tres censos realizados en 1993 figura 3, 2005 figura 4 y 2018 figura 5. Para el proyecto de un desalinizador de agua de mar, se emplean los datos de habitantes dentro del área urbana o cabecera municipal, población que representa aproximadamente un 48.93% de la población total del departamento. Para el censo realizado en el año 1993 (Figura 3), el departamento de La Guajira contaba con una población total de 387,773 habitantes, de los cuales la zona de la Alta Guajira presentaba una población total de 173,153 habitantes.

Figura 4. Censo de población y vivienda de 1993 en Colombia

 DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA INFORMACIÓN ESTADÍSTICA									
XVI CENSO NACIONAL DE POBLACION Y V DE VIVIENDA - 1993									
Población total censada, por área y sexo, según departamentos y municipios									
Departamentos y municipios	Total			Cabecera			Resto		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
Guajira	387.773	192.503	195.270	249.489	122.441	127.048	138.284	70.062	68.222
Riohacha	97.289	48.450	48.839	77.083	37.686	39.397	20.206	10.764	9.442
Barrancas	24.264	12.149	12.115	11.333	5.588	5.745	12.931	6.561	6.370
El Molino	5.151	2.656	2.495	5.151	2.656	2.495	-	-	-
Fonseca	28.305	14.583	13.722	19.918	9.871	10.047	8.387	4.712	3.675
Maicao	93.093	46.431	46.662	80.770	39.873	40.897	12.323	6.558	5.765
Manaure1	24.375	11.580	12.795	4.148	2.009	2.139	20.227	9.571	10.656
S.Juan D.Cesar	30.052	15.139	14.913	21.833	10.721	11.112	8.219	4.418	3.801
Uribia1	55.685	26.507	29.178	3.247	1.430	1.817	52.438	25.077	27.361
Urumita	9.964	5.292	4.672	7.961	3.932	4.029	2.003	1.360	643
Villanueva	19.595	9.716	9.879	18.045	8.675	9.370	1.550	1.041	509

Nota. Tomado de DANE, 1993.

Para el censo realizado en el año 2005 (figura 4), el departamento de La Guajira contaba con una población total de 623,250 habitantes, de los cuales la zona de la Alta Guajira presentaba una población total de 288,376 habitantes.

Figura 5. Censo de población y vivienda de 2005 en Colombia

Departamento	Código de municipio	Nombre de municipio o corregimiento departamental	Categoría	Población CENSADA COMPENSADA 2005			Hogares CENSADOS COMPENSADOS 2005		
				Urbano (Cabecera)	Rural (Resto)	Total	Urbano (Cabecera)	Rural (Resto)	Total
La Guajira	44001	Riohacha		137.224	32.087	169.311	30.353	6.459	36.812
La Guajira	44035	Albania		10.174	10.724	20.898	2.850	1.492	4.342
La Guajira	44078	Barrancas		13.172	9.035	22.207	2.969	1.967	4.936
La Guajira	44090	Dibulla		3.117	17.981	21.098	708	3.809	4.517
La Guajira	44098	Distracción		3.984	4.290	8.274	895	889	1.784
La Guajira	44110	El Molino		5.476	461	5.937	1.092	105	1.197
La Guajira	44279	Fonseca		18.958	3.262	22.220	4.310	770	5.080
La Guajira	44378	Hatonuevo		8.880	917	9.797	2.082	193	2.275
La Guajira	44420	La Jagua del Pilar		1.954	242	2.196	313	45	358
La Guajira	44430	Maicao		64.011	39.113	103.124	11.261	5.329	16.590
La Guajira	44560	Manauare		26.654	41.924	68.578	7.635	7.052	14.687
La Guajira	44650	San Juan del Cesar		17.373	8.214	25.587	4.075	1.989	6.064
La Guajira	44647	Urbia		5.494	111.180	116.674	1.150	18.196	19.346
La Guajira	44855	Urumita		7.436	1.109	8.545	1.598	361	1.959
La Guajira	44874	Villanueva		18.213	591	18.804	4.266	182	4.448
				total		623.250			

Nota. Tomado de DANE, 2005.

Para el censo realizado en el año 2018 (figura 5), el departamento de La Guajira contaba con una población total de 818,380 habitantes, de los cuales la zona de la Alta Guajira presentaba una población total de 400,399 habitantes.

Figura 6. Censo de población y vivienda de 2018 en Colombia

									
Censo Nacional de Población y Vivienda a CNPV 2018									
PERSONAS (Demográfico)									
Población censada en hogares particulares, por auto reconocimiento étnico y áreas (Total, Cabecera y Centros poblados y Rural disperso), según departamento y grupos de edad									
Cuadro 12PD Departamental									
Índice									
2018									
Departamento y grupos de edad		Total áreas							
		Total	Indígena	Gitano(a) o Rom	Nicaragüenses, nicaragüenses de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	Palenquero(a) de San Basilio	Negros(as), mulatos(as), Afrodescendiente, Afrocolombiano(a)	Ningún grupo étnico	Sin información
44 La Guajira	85 años y más	8.498	44	0	0	0	23	8.374	57
	Total	818.380	389.883	29	108	111	60.246	358.937	9.066
	0-4 años	97.441	56.240	2	9	5	4.765	35.502	918
	5-9 años	98.212	56.219	3	8	8	5.469	35.842	663
	10-14 años	88.651	47.099	2	9	10	6.111	34.820	600
	15-19 años	84.429	42.953	5	6	11	6.158	34.509	787
	20-24 años	76.450	37.443	1	8	6	5.212	32.849	931
	25-29 años	66.041	29.229	2	6	9	4.629	31.282	884
	30-34 años	58.548	25.871	1	12	13	4.322	27.565	764
	35-39 años	51.999	21.498	1	9	7	4.282	25.528	674

Nota. Tomado de DANE, 2018.

Cálculo de proyección futura

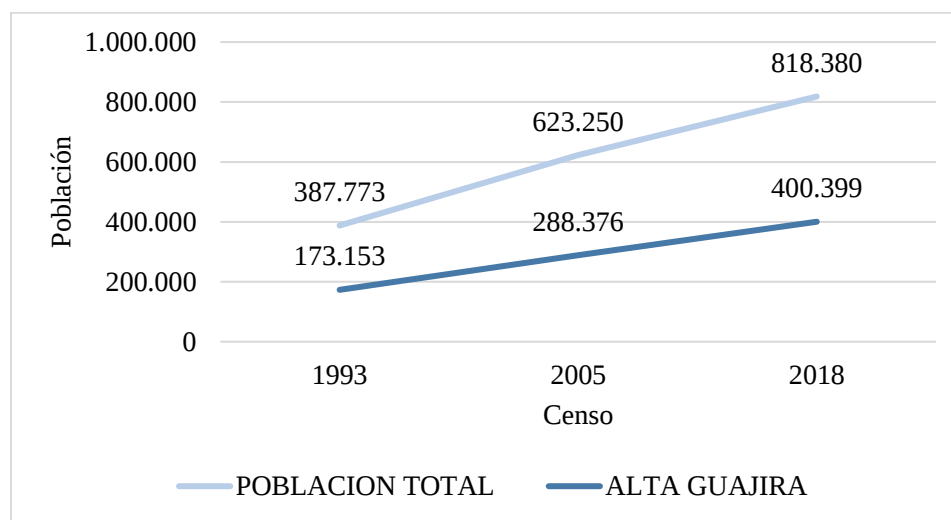
Teniendo en cuenta los datos presentados en las figuras 3, 4 y 5, se realiza una proyección del crecimiento poblacional de la zona de la Alta Guajira para el año 2050 (Tabla 2). Este es el periodo de tiempo para el cual se está diseñando el desalinizador.

Tabla 2. Información recopilada de los últimos 3 censos realizados en Colombia para el departamento de la guajira

Año	Población total	Alta guajira
1993	387.773	173.153
2005	623.250	288.376
2018	818.380	400.399

Nota. Datos tomados de DANE 1993, 2005, 2018.

Figura 7. Crecimiento poblacional en la Guajira



Nota. Elaboración propia.

Cálculo aritmético

Teniendo en cuenta la resolución 330 de 2017 y la resolución 799 de 2021, se procede a realizar el cálculo de proyección de población futura mediante el cálculo aritmético, con ecuación 1:

Ecuación 1. *Calculo Aritmético crecimiento poblacional*

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \times (T_f - T_{uc})$$

Nota. Donde: P_f e

s la población (hab) correspondiente al año para el que se quiere proyectar la población, P_{uc} es la población (hab) correspondiente al último año censado con información, P_{ci} es la población (hab) correspondiente al censo inicial con información, T_{uc} es el año correspondiente al último año censado con información, T_{ci} es el año correspondiente al censo inicial con información y T_f es el año al cual se quiere proyectar la información como se observa en la tabla 3 y la figura 7 donde se realiza la Proyección de la población método Aritmético para el departamento de la guajira.

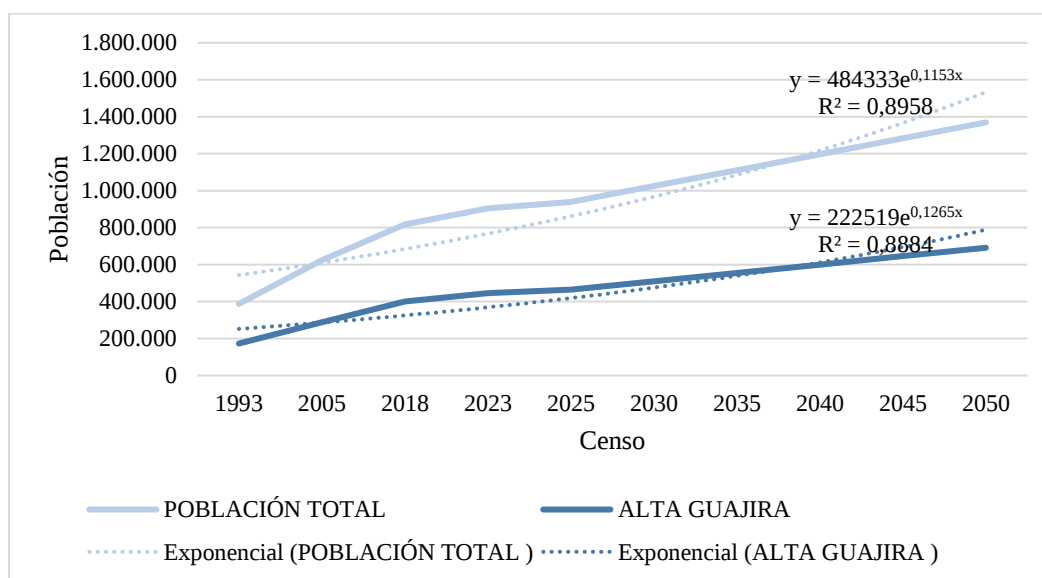
Tabla 3. *Proyección de la población método Aritmético para el departamento de la guajira*

Año	Población total	Alta guajira
1993	387.773	173.153
2005	623.250	288.376
2018	818.380	400.399
2023	904.501,40	445.848,20
2025	938.949,96	464.027,88
2030	1.025.071,36	509.477,08
2035	1.111.192,76	554.926,28
2040	1.197.314,16	600.375,48

2045	1.283.435,56	645.824,68
2050	1.369.556,96	691.273,88

Nota. Datos calculados con base en el DANE.

Figura 8. *Proyección Poblacional Método Aritmético Para el Departamento de la Guajira*



Nota. Elaboración propia.

Cálculo geométrico

Teniendo en cuenta la resolución 330 de 2017 y la resolución 799 de 2021, se procede a realizar el cálculo de proyección de población futura mediante el cálculo geométrico, con la ecuación 2:

Ecuación 2. *Calculo geométrico crecimiento poblacional*

$$P_f = P_{UC}(1 + r)^{T_f - T_{uc}}$$

Donde r es la tasa de crecimiento anual en forma decimal y las demás variables se definen igual que para el método anterior. La tasa de crecimiento anual se calcula con la

ecuación 3, generando la tabla 4 y la figura 8 Proyección Poblacional Método Geométrico Para el Departamento de la Guajira:

Ecuación 3. *Tasa de crecimiento anual*

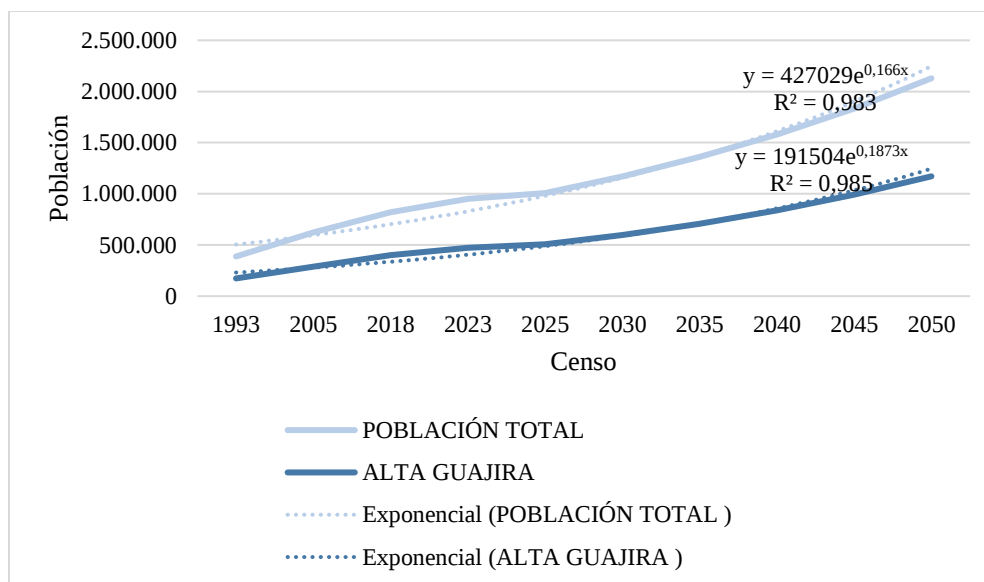
$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uc}-T_{ci})}} - 1$$

Tabla 4. *Proyección de la población método Geométrico para el departamento de la guajira.*

Año	Población total	Alta guajira
1993	387.773	173.153
2005	623.250	288.376
2018	818.380	400.399
2023	950.233,85	473.484,29
2025	1.008.743,36	506.326,45
2030	1.171.267,73	598.746,80
2035	1.359.977,32	708.036,75
2040	1.579.090,99	837.275,52
2045	1.833.507,30	990.104,39
2050	2.128.914,07	1.170.829,29
r	0,03032704	0,034099953

Nota. Datos calculados con base en el DANE.

Figura 9. *Proyección Poblacional Método Geométrico Para el Departamento de la Guajira.*



Nota. Elaboración propia.

Cálculo exponencial

Teniendo en cuenta la resolución 330 de 2017 y la resolución 799 de 2021, se procede a realizar el cálculo de proyección de población futura mediante el cálculo exponencial, con la ecuación 4:

Ecuación 4. *Calculo Exponencial crecimiento poblacional*

$$P_f = P_{ci} \times e^{k \times (T_f - T_{ci})}$$

Nota. Donde k es la tasa de crecimiento de la población la cual se calcula como el promedio de las tasas calculadas para cada par de censos, utilizando la ecuación 5:

Ecuación 5. *Tasa de crecimiento poblacional*

$$k = \frac{\ln P_{cp} - \ln P_{ca}}{T_{cp} - T_{ca}}$$

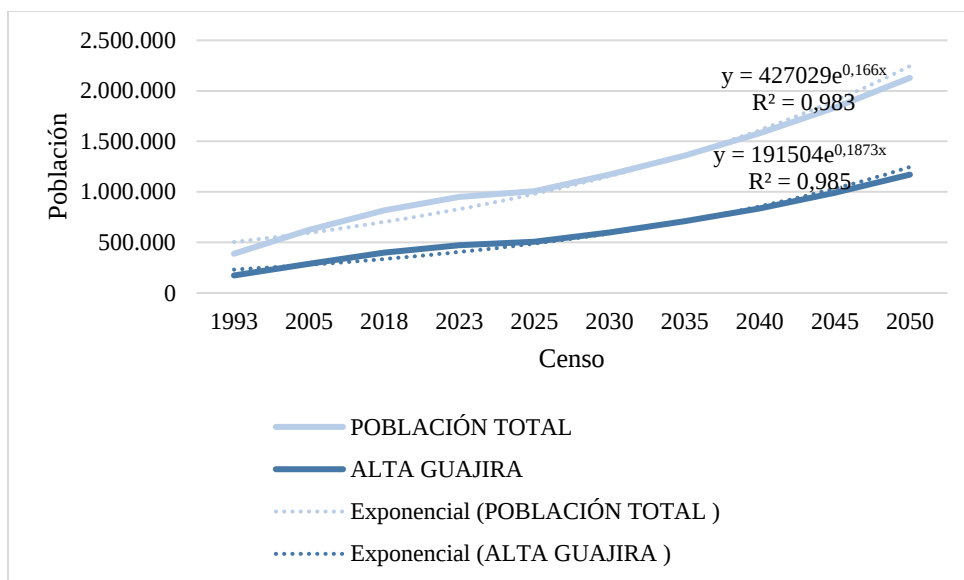
Nota. Donde P_{cp} es la población del censo posterior, P_{ca} es la población del censo anterior, T_{cp} es el año correspondiente al censo posterior, T_{ca} es el año correspondiente al censo anterior y $\ln$ el logaritmo natural como se puede observar en la tabla 5 y la figura 9 Proyección Poblacional Método Exponencial Para el Departamento de la Guajira.

Tabla 5. *Proyección de la población método Exponencial para el departamento de la guajira*

Año	Población total	Alta guajira
1993	387.773	173.153
2005	623.250	288.376
2018	818.380	400.399
2023	727.044,12	369.278,77
2025	758.157,87	388.403,04
2030	841.892,90	440.659,71
2035	934.876,08	499.947,11
2040	1.038.128,82	567.211,18
2045	1.152.785,35	643.525,12
2050	1.280.105,16	730.106,51
k	0,020952235	0,025245874

Nota. Datos calculados con base en el DANE.

Figura 10. *Proyección Poblacional Método Exponencial Para el Departamento de la Guajira*



Nota. Elaboración propia.

Capítulo 2. Dimensionamiento preliminar

Cálculo de dotación

Uso del agua

Mediante la resolución 330 de 2017 y la resolución 799 de 2021, se determina el tipo de uso del agua, en este caso, uso residencial.

Dotación neta

Se procede a analizar la dotación neta según el nivel de complejidad del proyecto. Al ser de complejidad alta, se establece que la dotación neta mínima es de 150 L/hab*día. Sin embargo,

se debe realizar una corrección por clima, aumentando un 20% quedando una dotación neta de 180L/hab*día.

Porcentaje de pérdidas

En el análisis correspondiente, se utiliza el nivel máximo de pérdida según el nivel de complejidad, el cual es del 20%.

Dotación bruta

La siguiente variable necesaria para el diseño es la dotación bruta, dada por la ecuación 6:

Ecuación 6. Dotación bruta

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \%p}$$

Nota. La dotación bruta generada es de: 225L/hab*día

Demanda

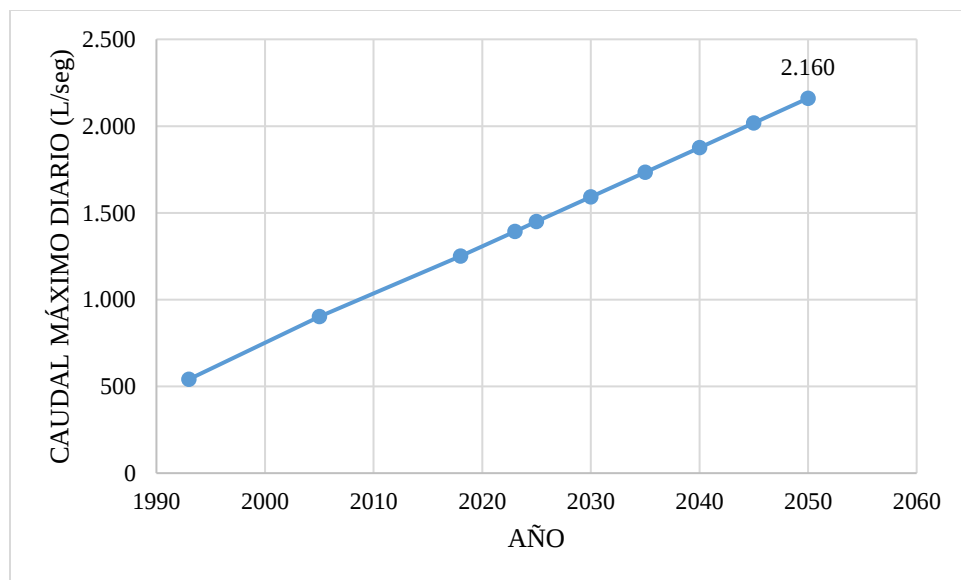
Para determinar la demanda se emplea el método aritmético, que se adapta a la tasa de crecimiento poblacional observada en el análisis histórico de la zona. Esta región se caracteriza por un bajo crecimiento poblacional, influido en gran medida por la escasez de recursos hídricos aptos para el consumo humano. Siguiendo lo establecido en la Resolución 330 de 2017 y la Resolución 799 de 2021, se presenta en la tabla 6 la demanda diaria de consumo de agua por habitante, basada en el crecimiento poblacional total de la zona:

Tabla 6. *Cálculos de Demanda para la zona de la alta Guajira*

Año	Población total	Alta guajira	Dotación bruta (L/hab*día)	Caudal medio diario (L/seg)	Caudal máximo diario (L/seg)	Caudal máximo horario (L/seg)
1993	387.773	173.153	225	451	541	812
2005	623.250	288.376	225	751	901	1.352
2018	818.380	400.399	225	1.043	1.251	1.877
2023	904.501,40	445.848,20	225	1.161	1.393	2.090
2025	938.949,96	464.027,88	225	1.208	1.450	2.175
2030	1.025.071,36	509.477,08	225	1.327	1.592	2.388
2035	1.111.192,76	554.926,28	225	1.445	1.734	2.601
2040	1.197.314,16	600.375,48	225	1.563	1.876	2.814
2045	1.283.435,56	645.824,68	225	1.682	2.018	3.027
2050	1.369.556,96	691.273,88	225	1.800	2.160	3.240

Nota. Datos calculados con base en el DANE.

Figura 11. Caudal máximo diario (L/seg)



Nota. Elaboración propia.

Capítulo 3. Sistema de desalinización

Fuente de abastecimiento

Para el prediseño de un desalinizador de agua de mar destinado al suministro de agua potable para los habitantes de la zona de la Alta Guajira, se debe tomar como fuente de abastecimiento el Mar Caribe, específicamente la zona aledaña a los municipios a intervenir. Se debe garantizar que en la zona no haya albergues marinos o áreas coralinas que puedan afectar estos ecosistemas acuáticos. Después de revisar el Atlas de las Áreas Coralinas de Colombia, proporcionado por el Ministerio de Medio Ambiente, se escoge la zona cercana al municipio de Manaure como se observa en la figura 11 donde se marca en amarillo una posible ubicación de la planta desalinizadora. Esta ubicación se elige para mejorar y disminuir la pérdida de agua por tuberías y accesorios, tomando el agua desde una zona más cercana al municipio.

Figura 12. Zona propuesta para la ejecución del proyecto



Nota. Tomado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente)

Se prevé un lote en la zona que cuenta con un área de 50 hectáreas en la zona cercana a los municipios a intervenir como se delimita en la figura 12.

Figura 13. Lote propuesto para el proyecto



Nota. Tomado de Google Earth.

La ósmosis inversa es una tecnología de tratamiento de agua que se utiliza ampliamente para la desalinización, es decir, la eliminación de sales y minerales del agua de mar o agua salobre para producir agua potable. Este proceso es especialmente relevante en regiones áridas como la Alta Guajira, donde las fuentes de agua dulce son limitadas y la disponibilidad de agua potable es un desafío crítico.

Ósmosis y Ósmosis Inversa:

Ósmosis es el proceso natural en el que el agua se mueve a través de una membrana semipermeable desde una solución de baja concentración de solutos (como sales) hacia una solución de alta concentración, buscando un equilibrio.

Ósmosis inversa (OI) es un proceso artificial que invierte este flujo natural al aplicar presión sobre una solución concentrada (agua salada o salobre) para forzar el paso del agua a través de una membrana semipermeable, dejando atrás los solutos, como las sales.

Membrana Semipermeable:

Es el componente clave del sistema de ósmosis inversa. Permite el paso de moléculas de agua mientras retiene la mayoría de las sales, minerales y otros contaminantes.

Proceso de Desalinización:

En el contexto de la Alta Guajira, donde la disponibilidad de agua dulce es escasa, el agua de mar o de pozos salobres es bombeada a alta presión a través de la membrana de ósmosis inversa.

La alta presión es necesaria para superar la presión osmótica natural del agua salada.

El resultado es la separación del agua dulce, que pasa a través de la membrana, y un flujo de rechazo concentrado en sales (salmuera).

Impacto y Consideraciones:

Sostenibilidad: La desalinización mediante ósmosis inversa puede ser una solución sostenible para la provisión de agua potable en la Alta Guajira, especialmente si se combina con fuentes de energía renovable, como la solar, que es abundante en la región.

Rechazo de Salmuera: El manejo adecuado del concentrado salino es crucial para evitar impactos ambientales en la región, dado que la liberación sin tratamiento adecuado puede afectar los ecosistemas locales.

Accesibilidad: La implementación de tecnología de ósmosis inversa en comunidades remotas requiere de inversiones en infraestructura, formación y mantenimiento para garantizar su efectividad a largo plazo.

Para esta planta desalinizadora, se elige la utilización de captación abierta mediante una torre de toma, ya que este sistema mejora la captación y no presenta dificultades en la generación del caudal para la demanda requerida. La torre de toma estará a una distancia de 1,000 metros de la costa, donde se realizará el ingreso de agua por la parte superior de la torre de forma horizontal mediante un flujo laminar, a través de filtros y rejillas para la disminución de sedimentos en suspensión. Además, debido a la reducción de oxígeno y luz en esta zona, se disminuirá la presencia de vida marina. La conexión de esta torre de captación a la planta de tratamiento se realizará mediante una tubería de 1,5 m de diámetro en polietileno de alta densidad con lastres de hormigón, dado que estos materiales generan mayor resistencia a la corrosión y están especializados para trabajar bajo altas presiones.

Antes de llegar a la planta desalinizadora, a unos 400 metros de la costa, el agua de mar debe llegar a un depósito de captación para abastecer al menos 1 hora del caudal necesario para satisfacer la demanda. De acuerdo con los cálculos de la demanda, se necesita un volumen de

almacenamiento de 17,593 m³. La construcción de este depósito debe hacerse reforzado. Después de dicho depósito, el agua será enviada a un pozo de bombeo, también construido en concreto reforzado, ubicado a la entrada del desalinizador, con un volumen de 5,864 m³. En esta zona se encontrarán 12 bombas sumergibles APP S 674, diseñadas para aplicaciones en alta mar y que tienen los valores más altos de eficiencia y certificaciones API 674 y ATEX. El conducto de circulación de agua hasta el centro de bombeo será de 1,2 m de diámetro interior, fabricado en polietileno de alta densidad.

Tratamiento

Desinfección

Para iniciar con el proceso de pretratamiento, se debe realizar el proceso de desinfección con Hipoclorito de Sodio (NaClO) para eliminar y reducir la carga biológica del agua derivada de microorganismos que puedan afectar el funcionamiento de la membrana, disminuyendo así el rendimiento de la producción de agua potable. Se utilizará una solución al 13%, la cual se preparará en el pozo de bombeo. Para esta dosificación exacta, se debe contar con un depósito con un volumen aproximado de a 188 m³, se realiza el procedimiento en la tabla 7 Cálculos de tratamiento desinfección.

Tabla 7. Cálculos de tratamiento desinfección.

HIPOCLORITO DE SODIO NaClO			15 días de almacenamiento	
dosis media	2,5	ppm		
	98%		dosificación en el pozo de bombeo	
	160	mg/L		
Qmed	275	L/h	nota	se requieren 2 bombas dosificadoras de NaClO en disposición con

depósito de NaClO

caudal de cloración	245,6
---------------------	-------

Vdnaclo	187416	L
	187,416	m3

nota 2

caudal unitario mayor de 275 L/h

se requiere un depósito para el hipoclorito de sodio de 188 m3

Nota. Elaboración propia.

Estabilización del pH

Después de la desinfección inicial, se procede a realizar la estabilización del pH del agua mediante el uso de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este proceso se lleva a cabo durante el traslado del agua desde el pozo de bombeo hasta los filtros de arena y antracita, se realiza el procedimiento en la tabla 8 Cálculos de tratamiento Acidificación.

Tabla 8. *Cálculos de tratamiento Acidificación*

ÁCIDO SULFÚRICO H_2SO_4			15 días de almacenamiento
dosis media	20	ppm	
	13%		dosificación en el pozo de bombeo
	1800	mg/L	

Qmed	196	L/h
------	-----	-----

nota

depósito de H_2SO_4

se requieren 2 bombas dosificadoras de H_2SO_4 en disposición con caudal unitario mayor de 196 L/h

Vd	70560	L
	70,56	m3

nota 2

se requiere un depósito para el Ácido Sulfúrico de 71 m3

Nota. Elaboración propia.

Coagulación

El tercer proceso del pretratamiento es la coagulación mediante el agente químico cloruro férrico (FeCl_3). Este proceso se encarga de realizar la sedimentación de partículas que puedan afectar el funcionamiento de las membranas, se realiza el procedimiento en la tabla 8 Cálculos de tratamiento almacenamiento.

Tabla 9. Cálculos de tratamiento almacenamiento

CLORURO FERRICO FeCl_3			15 días de almacenamiento
dosis media	10	ppm	
	40%		ANTES DE LOS FILTROS DE ARENA
	567	mg/L	

Qmed	311	L/h
------	-----	-----

nota

depósito de FeCl_3

se requieren 2 bombas dosificadoras de FeCl_3 en disposición con caudal unitario mayor de 311 L/h

Vd	111960	L
	111,96	m3

nota 2

se requiere un depósito para el cloruro férrico de 112 m3

Nota. Elaboración propia.

Declaración

Para concluir con los procesos químicos del pretratamiento, se debe realizar la declaración mediante bisulfito sódico (NaHSO_3) para la eliminación del cloro en el agua. Este proceso se lleva a cabo durante la transición entre los filtros de arena y los filtros de cartucho, se realiza el procedimiento en la tabla 8 Cálculos de tratamiento Declaración.

Tabla 10. Cálculos de tratamiento Declaración.

BISULFITO SÓDICO NaHSO_3			7 días de almacenamiento	
dosis media	8	ppm		
	40%		ENTRE FILTROS DE ARENA Y FILTROS DE CAUCHO	
	250	mg/L		

Qmed	563	L/h	nota	se requieren 2 bombas dosificadoras de NaHSO_3 en disposición con caudal unitario mayor de 563 L/h
depósito de H_2SO_4				
Vd	94584	L		
	94,584	m3		
			nota 2	se requiere 5 depósitos para el NaHSO_3 de 20 m3

Nota. Elaboración propia.

Filtración

En los procesos físicos de pretratamiento, la filtración se divide en dos subprocesos: filtración mediante filtros de arena-antracita y filtración mediante filtros de cartuchos de polipropileno.

Filtros de Arena-Antracita.

Mediante bajas presiones, se hace la conducción por filtros de doble capa en arena-antracita, los cuales funcionan como filtración a 15 micras y a 10 micras. Se necesitan 23 filtros horizontales de 51 m² de superficie filtrante, fabricados en acero galvanizado y con recubrimiento interior plástico para aislar el hierro del agua, como se establece en la tabla 15.

Tabla 11. Cálculos de pretratamiento Filtros de arena

FILTROS DE ARENA-ANTRACITA		
PRETRATAMIENTO FISICO ANTES DE BASTIDORES		
Vfil	15	m/h
Vfilm	20	m/h
p	6	bar
Afil	51	m2
A	1173	m2
N° fil	23	se necesitan 23 filtros de 51 m2

Nota. Elaboración propia.

Filtros de Cartucho en Polipropileno.

Mediante la dosificación del caudal y el aumento de la presión, se hace la conducción por filtros de doble capa con cartuchos de polipropileno, los cuales funcionan como filtración a 5 micras. Se necesitan 30 filtros PUTSCH, fabricados en acero inoxidable de 316 L y con recubrimiento interior plástico para aislar el hierro del agua. Todo este proceso se debe a que el agua debe poseer unas condiciones fisicoquímicas óptimas para ser introducida en las membranas de ósmosis inversa, ya que por sus características y funciones suelen tener una dureza muy baja. Con este procedimiento, las aguas deben tener un índice de densidad de sedimentos (SDI) igual a 3, lo que evita que las membranas se dañen.

Osmosis inversa

Posterior a la filtración y a los procesos fisicoquímicos, el agua de alimentación ingresa al área de alta presión, donde las bombas principales aumentan la presión entre 700 y 800 psi, impulsando el agua hacia las membranas de ósmosis inversa, que producirán la cantidad de agua requerida para satisfacer la demanda de la sociedad. En la etapa más importante, una o más bombas de alta presión dirigen el agua a la zona de membranas correspondientes para la realización del fenómeno de ósmosis inversa. En términos generales, los productos generados en estos procesos son un 40 % a 45 % de agua desalinizada y un 55 % a 60 % de salmuera, agua con altas concentraciones de sal. Después de este proceso, la salmuera se devolverá en pequeñas cantidades, aproximadamente un 5%, mediante un emisario submarino por gravedad que no afecte el ecosistema marino circundante al proyecto.

SDI, o Silt Density Index (Índice de Densidad de Sólidos), es una medida utilizada para evaluar la cantidad de partículas suspendidas en un líquido, generalmente agua, y su tendencia a obstruir

membranas en sistemas de filtración, como las utilizadas en procesos de desalinización por ósmosis inversa.

Para la realización de este proceso, el agua pretratada fluye a través de la membrana de ósmosis inversa, siendo el proceso controlado mediante un sensor de salinidad con ajuste automático, que registra electrónicamente el contenido de sal del agua. Inmediatamente después, el agua dulce producida pasa a través de un flujómetro para la revisión del caudal lineal producido por el sistema, el cual se debe ajustar a la demanda, en este caso 2,160 L/s. Para la elección de la membrana de ósmosis inversa, se hace una evaluación de los mejores fabricantes con mayor eficacia y experiencia a nivel mundial. En este caso, se escoge la empresa DOW FILMTEC, líder en la fabricación de membranas para ósmosis inversa. Como es conocido, el fabricante establece unas condiciones mínimas para el buen funcionamiento de la membrana. En este caso, estas serían las de la tabla 12:

Tabla 12. *Condiciones iniciales para selección de membrana*

consideraciones iniciales			
SDI	<5		
QP	190000	m3/día	
	7917	m3/h	
TDS	36537	PPM	
SE REQUIEREN TUBOS DE PRESION DE 7 ELEMENTOS			
RECUPERACIÓN	45%		
BASTIDORES DE 10000 m3/día		19	

Nota

se requiere la configuración estándar de flujo de un solo paso

Nota. Elaboración propia.

Según estos datos iniciales, se puede seleccionar la membrana para el proyecto mediante las tablas generadas en la guía de diseño de membranas del fabricante DOW FILMTEC, de las cuales se extraen los cuadros guía de la tabla 13 para satisfacer la necesidad de la comunidad:

Tabla 13. Elección del tipo de membrana

Membrane type	TDS (PPM)	System Permeate Flow (GPM)	Permeate Quality (PPM)
TW	< 5000	4-inch:máx.25	< 50
		8-inch:máx.10	
XLE, LE	< 1000	4-inch:máx.26	< 50
		8-inch:máx.11	
BW, FR	< 5000	4-inch:máx.27	< 50
		8-inch:máx.12	
SW	3000-15000	4-inch:máx.28	< 150
		8-inch:máx.13	
SWHE, SWHRLE	10000-50000	4-inch:máx.29	varies (<500)
		8-inch:máx.14	
NF	<1000	4-inch:máx.30	< 150
		8-inch:máx.15	

Nota. Tomado de DOW FILTEC.

La tabla 13 muestra una serie de sugerencias para la selección de la membrana, ya que la elección final depende también de los parámetros fisicoquímicos del agua de mar que se está desalinizando en el proyecto. De esta tabla, se probó que las membranas más adecuadas según la salinidad de la alimentación de la planta son las SW, SWHR y SWHRLE. A continuación, se muestran todos los tipos de membranas SW en la tabla 14 donde se seleccionan según las condiciones iniciales del proyecto, el flujo permeado, el área total, la presión el porcentaje de rechazo de sales y el caudal permeado después de pasar por la membrana:

Tabla 14. Tipos de Membranas SW

FILMTEC	Tipo de membrana	Flujo de permeado GPD (M3/D)	Área FT2 (M2)	Max presión (BAR)	Rechazo de sales (mínimo)	Flujo de permeado (M3//M2*D)
Membrana con alto rechazo de sales	SW30HR-280	6.000 (23)	380 (35)	69	99,70	0,657
	SW30HRLE-400i	7.500 (28)	400 (37)	83,3	99,75	0,757
	SW30HRLE-400	7.500 (28)	400 (37)	83	99,75	0,757
	SW30HR-370/34i	6.300 (24)	370 (34)	83	99,75	0,706
	SW30XHR-440i	6.600 (25)	440 (41)	83	99,82	0.610
	SW30HRLE-440i	8.200 (31)	440 (41)	83	99,80	0,756
	SW30HRLE-370/34i	6.700 (25)	370 (34)	83	99,80	0,735
Membrana de baja energía y alto flujo	SW30XLE-400i	9.000 (34)	400 (37)	83	99,70	0,919
	SW30XLE-440i	9.900 (37,5)	440 (41)	83	99,75	0,915
Membranas de ultra baja energía y alto flujo	SW30ULE-400i	11.000 (41,6)	400 (37)	83	99,70	1.124
	SW30ULE-440i	12.000 (45,4)	440 (41)	83	99,70	1,107

Nota. Tomado de DOW FILTEC.

La tabla 14 sirve de base para la elección del tipo de membrana SW. Según las condiciones del proyecto, se procede a elegir la membrana de ultra baja energía y alto flujo SW30ULE-440i. Para conocer la cantidad de tubos y de membranas totales, se debe encontrar el flujo medio de cada membrana para las condiciones del sistema. El flujo medio de permeado está entre 11-17 L/m²h para agua de mar y elementos de 8 pulgadas. Se elige un flujo de permeado de 15 L/m²h.

Cantidad de membranas y tubos de presión

Con los datos obtenidos se procede a realizar el cálculo de membranas y tubos de presión que se requiere en cada bastidor y en el sistema completo, utilizando la ecuación 7 Número de membranas Osmosis Inversa, 8 Número de tubos Osmosis Inversa y 9 Cálculo de número de membranas y tubos de presión:

Ecuación 7. Número de membranas Osmosis Inversa

Área efectiva de la membrana	440	ft ²
	40,9	m ²

$$\frac{N^{\circ} \text{ de membranas}}{\text{bastidor}} = \frac{\text{caudal de diseño}}{\text{area de la membrana} * \text{caudal permeado}}$$

Nota. Elaboración propia.

Ecuación 8. Número de tubos Osmosis Inversa

$$\frac{N^{\circ} \text{ de membranas}}{\text{bastidor}} = \frac{10000 * \frac{1000}{24} (\frac{L}{h})}{40,9(m^2) * 15(\frac{L}{m^2 * h})}$$

N°	679,1632709	680
----	-------------	-----

$$\frac{N^{\circ} \text{ de tubos de presión}}{\text{bastidor}} = \frac{\frac{N^{\circ} \text{ de membranas}}{\text{bastidor}}}{\frac{N^{\circ} \text{ de membranas}}{\text{tubos de presión}}}$$

Nota. Elaboración propia.

Ecuación 9. Cálculo de número de membranas y tubos de presión

Nt°	97,14285714	98
-----	-------------	----

Número total de membranas	12920
Número total de tubos de presión	1862

Nota. Elaboración propia.

Dados los datos anteriores, se requieren un total de 12,920 membranas SW30ULE-440i del fabricante DOW FILMTEC, para un total de 1,862 tubos de presión distribuidos en 19 bastidores de 10,000 m³/día cada uno, con 98 tubos de presión y dentro de cada tubo 7 membranas SW30ULE-440i, para cumplir con la demanda de 190,000 m³/día. Si eventualmente el monitor de sólidos disueltos totales registra una salinidad en el agua producto superior a la establecida inicialmente por las normativas sanitarias y el ente operador encargado del funcionamiento correcto de la planta, automáticamente esta se conduce al sistema de rechazo de la planta, alertando correspondientemente al operador a fin de que se tomen las medidas pertinentes para corregir la situación anormal. Una vez terminado el proceso de ósmosis inversa y obtenida el agua desalinizada, ésta es enviada al tanque de almacenamiento de agua potable, recibiendo un postratamiento para su potabilización con el fin de mejorar la calidad y que sea apta para el consumo humano según las normativas sanitarias.

Postratamiento

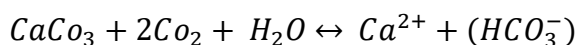
Para mejorar la calidad y potabilización del producto después del tratamiento de ósmosis inversa, se debe realizar un proceso de postratamiento cuyo objetivo es la remineralización del agua desalada para aumentar su alcalinidad a valores que permitan que el índice de saturación de Langelier (medida de la estabilidad de la alcalinidad del agua potable) tenga valores aproximados a 0. Este postratamiento se debe iniciar mediante la técnica de adición de carbonato

cálcico y dióxido de carbono. Para esta remineralización, se debe dosificar el dióxido de carbono (CO₂). Este proceso comienza con un paso del agua producto por disolvedores de CO₂ a bajas presiones. Para este proceso se deben suministrar:

1. 19 disolvedores a baja presión fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con capacidad de 10.000 m³/día, en los cuales el CO₂ se dosifica a contracorriente. La velocidad del agua en el disolvedor debe mantenerse en 0,07 m/s para evitar así el arrastre de burbujas. La presión diferencial del agua y la del gas debe ser del orden de 0,2 bar.
2. Se debe disponer de un número suficiente de difusores de CO₂ de baja presión para garantizar una dosificación correcta aún a dosis elevadas.
3. Se dispondrá de dispositivos interiores que faciliten la mezcla de las burbujas de CO₂.
4. Difusores de CO₂, con tamaño de poros que permiten la dosificación con una pérdida de carga mínima.
5. Visor de burbujas: Está situado en la pared del tanque como una membrana semitransparente que permite visualizar el CO₂ que no se disuelva.

El siguiente proceso en el postratamiento es el paso por filtración en lecho de calcita granulada al 99% de concentración y tamaño de partículas entre 1 y 4 mm donde se lleva a cabo la ecuación 10 reacción química en el postratamiento:

Ecuación 10. *Reacción química postratamiento*



Nota. Donde se aumenta el pH y la dureza del agua producto para alcanzar un equilibrio químico, después de pasar por los filtros de calcita el agua carbonatada vuelve a ingresar a una

zona de 0 flujo donde mediante un rebose perimetral el agua ingresa a un sistema de canales hacia el sistema de almacenamiento.

Para este proceso se propone utilizar 75 lechos de calcita en depósitos fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio, con medidas de 3 m de diámetro y 5.75 m de altura, para una filtración mínima de 500 m³/h hasta una filtración de 3390 m³/h. Para este diseño, se debe considerar el panorama más desfavorable, en este caso 500 m³/h, con un tiempo de contacto entre 10 y 30 min, en la tabla 14 se realiza la distribución de los filtros de lechada de calcita.

Tabla 15. Distribución Filtros de lechada de calcita.

FILTROS DE CALCITA

POST-TRATAMIENTO

$$CaCo_3 + 2Co_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + (HCO_3^-)$$

Material filtrante calcita granulada al 99%

consumo de calcita

concentración	50	ppm
	0,05	(kg/m3)
Qp	7917	m3/h

cc	395,85	kg/h
----	--------	------

necesidad de consumo de CO2

consumo CO2	174,174	kg/h
-------------	---------	------

caudal min	500	m3/h
------------	-----	------

tiempo de contacto	30 min
--------------------	--------

Superficie Necesaria

velocidad de ascenso	15	m/h
----------------------	----	-----

Sn	527,8	m2
----	-------	----

Área de contacto	7,068583471	m2
------------------	-------------	----

cantidad de depósitos

cd	74,6684257	75 depósitos de 3 metros de diámetro
----	------------	--------------------------------------

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, el agua permeada requiere la adición de cloro con el fin de eliminar elementos patógenos y perjudiciales para la salud. Para ello, se dosifica hipoclorito sódico (NaClO), asegurando que el agua permeada cumpla con las calidades requeridas como agua apta para el consumo humano, su dosificación se presenta en la tabla 15 cloración en el postratamiento.

Tabla 16. *Cloración Postratamiento*

HIPOCLORITO SÓDICO NaClO		
dosis media	5	ppm
	13%	
d	1,240	g/l

dosificación en el poso de bombeo

Qclo	395,85	Kg/h
	395850	g/h

consumo de producto comercial

cp	304500	g/h
----	--------	-----

Vclo	245564,516	l/h
------	------------	-----

Nota. Elaboración propia.

Almacenamiento agua potable

Después de los procesos de postratamiento, se procede al almacenaje del agua tratada, la cual debe tener la capacidad mínima para abastecer a la zona durante un día. Se utilizarán 12

tanques de 26 metros de diámetro y 30 metros de altura para almacenar los 190,000 m³ necesarios para satisfacer la demanda de las comunidades, en la tabla 16 se muestra la cantidad de tanques de almacenaje según el volumen total que se requiere para suministrar a la comunidad.

Tabla 17. *Tanques de Almacenaje Agua Potable.*

ALMACENAJE		
Vmin	190000	m3
parámetro	dimensión	unidad
D	26	m
H	30	m
volumen	15927,8748	m3
CANTIDAD	11,9287729	12

Nota. Elaboración propia.

Energía solar fotovoltaica

Dados los avances en el tema de energías renovables y para impulsar a Colombia en el ámbito de nuevas metodologías para generar electricidad, así como las ventajas naturales de la zona elegida para el proyecto, se propone la utilización de energía solar fotovoltaica. La transformación de la radiación solar en electricidad se realiza mediante paneles fotovoltaicos, donde la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, produciendo una ligera diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial cada vez mayores.

Este sistema propuesto debe ser un sistema aislado, ya que, dadas las condiciones actuales de la zona, no se dispone de energía regular tradicional, lo cual podría afectar el funcionamiento de la planta desalinizadora. Los componentes para el sistema aislado de energía fotovoltaica en el proyecto son los siguientes:

1. *Módulos fotovoltaicos*: Dispositivos cuyo fin es la captación de la energía solar y su transformación en energía eléctrica.
2. *Regulador de carga*: Aparato que controla el proceso de carga de energía en los acumuladores, además de proteger a estos de un exceso de carga y de su descarga por exceso de uso.
3. *Sistema de acumulación*: Dispositivo o dispositivos que almacenan la energía eléctrica producida por el generador fotovoltaico, a fin de poder utilizar esta en períodos en el que la demanda exceda la capacidad de producción de los módulos fotovoltaicos.
4. *Inversor o acondicionador de la energía eléctrica*: Es la componente del sistema encargada de transformar la corriente continua producida por el generador fotovoltaico o el sistema de acumulación, en corriente alterna, la que es entregada a los dispositivos de distribución o uso final de la energía producida.
5. *Elementos de protección del circuito*: Dispositivos que protegen la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o situaciones de sobrecarga.

La particularidad del sistema de desalación propuesto para la zona alta de la Guajira con sistema de osmosis inversa es que requiere de un suministro constante de energía para evitar la

degradación de sus membranas. Por este motivo los sistemas aislados con baterías pudiesen ser la clave para el éxito de este tipo de plantas.

Capítulo 4. Evaluación económica

Para determinar la viabilidad del proyecto, se debe analizar la evaluación económica del costo inicial y los costos fijos durante el funcionamiento de la planta desalinizadora. Estos costos también influyen en la determinación del valor del producto final y en la proyección de la recuperación de la inversión necesaria. Un factor importante para considerar es la necesidad que se desea suplir con este proyecto, en este caso, la generación de agua potable para los habitantes de la zona.

Inversión propuesta

Para determinar la evaluación económica del proyecto, es importante tener en cuenta factores como el tamaño de la planta, la proyección de producción, los materiales a implementar y la eficiencia de los equipos. En este tipo de proyectos, el uso de energía juega un papel importante en los costos operativos. En este caso, se propone la utilización de un sistema de conversión de energía fotovoltaica, un proceso basado en la eficiencia energética y la utilización de energías limpias, lo cual genera un impacto ambiental bajo.

Presupuesto

Se presenta la propuesta económica para el proyecto Prediseño de un desalinizador para el abastecimiento de agua potable para los habitantes de la alta Guajira, ver anexo 2. Evaluación

económica, el presupuesto se puede observar en la tabla 18 Resumen propuesta económica por un valor de \$176.224.402.995,34.

Tabla 18. Resumen propuesta económica

PRESUPUESTO		
DEFINITIVO – Planta desalinizadora alta Guajira		
Cliente: DESALINISADOR ALTA GUAJIRA		Área: 494980,74 M2
Proyecto: DESALINISADOR ALTA GUAJIRA		TRM: 4.000
CAPITULO	DESCRIPCIÓN	VALOR PARCIAL
1	PRELIMINARES	\$ 1.444.153.910,46
2	CIMENTACIÓN	\$ 22.821.614.548,37
3	REDES ENTERRADAS	\$ 20.599.641.738,35
4	EDIFICACIONES	\$ 366.901.264,17
5	EQUIPOS MECANICOS	\$ 82.252.606.408,29
6	TUBERIA	\$ 26.960.357.183,20
7	SISTEMA ELECTRICO	\$ 20.000.000.000,00
8	INSTRUMENTACION Y CONTROL	\$ 1.779.127.942,50
	TOTAL	\$ 176.224.402.995,34

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

1. Se realizó un prediseño a nivel de factibilidad para una planta desalinizadora en la alta Guajira, con el objetivo de mitigar la escasez de agua potable en esta región. El estudio permitió evaluar las condiciones técnicas, económicas y ambientales necesarias para implementar un sistema de desalación que responda a las características específicas de la zona. Los resultados obtenidos evidencian que la planta es una solución viable para garantizar un suministro continuo de agua potable, mejorando las condiciones de vida de las comunidades locales.

2. El prediseño de un desalinizador de agua de mar para el abastecimiento de agua potable en la zona de la Alta Guajira representa una solución técnica viable para mitigar la escasez de agua en esta región. A través de este proyecto, se busca proporcionar a los habitantes acceso a un recurso vital, mejorando su calidad de vida y promoviendo el desarrollo sostenible. La implementación de esta tecnología no solo atendería las necesidades básicas de la población, sino que también contribuiría a reducir los problemas de salud y favorecería el progreso social y económico de la comunidad.

3. El desarrollo e implementación del sistema de desalinización de osmosis inversa presentado en este trabajo representa un avance significativo en el ámbito de la obtención de agua potable en Colombia a partir de fuentes salinas. A lo largo del estudio, se logró cumplir con los objetivos planteados, demostrando la eficacia y eficiencia del desalinizador del prediseño.

4. Para el desalinizador con osmosis inversa se propone la utilización de tecnologías sostenibles y accesibles, asegurando una operación eficiente con un bajo consumo de energía. Los componentes clave, como las membranas de ósmosis inversa y los sistemas de tratamiento, fueron seleccionados y optimizados para maximizar el rendimiento de la planta.

5. A pesar de los logros alcanzados, el estudio también identificó ciertas limitaciones y desafíos, la inversión inicial del sistema pueden representar un obstáculo para su implementación en estas comunidades de la alta Guajira ya que cuentan con recursos económicos limitados. La viabilidad económica del sistema requiere un análisis más detallado para asegurar su accesibilidad y sostenibilidad financiera a largo plazo.

6. En conclusión, el desalinizador desarrollado para la alta Guajira en este estudio no solo demuestra ser una solución efectiva para la obtención de agua potable, sino que también señala el

camino hacia el campo de la desalinización en Colombia. Al abordar los desafíos identificados y aprovechar las oportunidades de mejora, se puede avanzar hacia un uso más sostenible y generalizado de esta tecnología crucial para la seguridad hídrica nacional.

Bibliografía

Arreguín F. (2000), Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*, 15(1), 27-49.

Béchar, S., Levy, L., Clas, S. (1995). Thermal, mechanical and functional properties of cellulose acetate phthalate (CAP) coatings obtained from neutralized aqueous solutions. *International Journal of Pharmaceutics*, 114(2):205–213.

Cabero, J. (2016). *Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de osmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía*. [Tesis doctoral, Universidad del País Vasco].

Calderón, V. (2007). *Síntesis, caracterización, propiedades y aplicaciones de nuevas poliamidas aromáticas con subestructuras benzoéter corona y benzopodandos en la cadena lateral*. [Tesis doctoral, Universidad de Burgos].

Danfoss. (2024). *Catálogo de bombas y accesorios para osmosis inversa*. [catalogo].

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2005). *Censo de población y vivienda 2005*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2018). *Censo de población y vivienda 2018*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>

Fariñas, M. (1999). *Osmosis inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones*. Mc Graw Hill.
Taylor, S. (1998). *Ósmosis inversa y nanofiltración. A: American Water Works Association Research Foundation. Tratamiento del agua por procesos de membrana. 1ª edición*. McGraw Hill.

Fernández, M. (2015). *Planta de ósmosis inversa de un ferry tipo ROPAX*. [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Cartagena].

Fundación Aquae. (2021). *Plantas desalinizadoras más grandes del mundo - Fundación Aquae*. *Fundación Aquae*. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/desalinizacion-en-el-mundo/>

Hernández, R. (2018). *Influencia del método de desengrasado en la extracción de celulosa a partir de la especie Stipa ichu. Preparación de análogos semisintéticos*. [Trabajo de grado, Universidad Central Del Ecuador].

Inviarco S.A.S. (2013). *Revolución de los Negocios Sostenibles*. Computerworld Colombia.

Isiordia, G., Enríquez, R., y Fernández, N. (2012). Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México. *Ra Ximhai*, 8(2.), 57-68

- Jamrah, A. (2008). *Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman*. Springer Science.
- Lara, J., y Hernández, A. (2003). Reutilización de aguas residuales: aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. *Instituto Cinara, Universidad del Valle*, 237- 242.
- Lechuga, J., Rodríguez, M., y Lloveras, J. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. *Ingeniería*, 11(3), 5-14.
- Miller, B. y Levine, J. (2004). *Biología* . Pearson Prentice Hall
- Ministerio de Desarrollo Económico (Mindesa). (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000*. Ministerio de Desarrollo Económico (Mindesa).
- Ortiz, R. (2021). Desalinización: ¿el futuro del agua? *Volvamos a la fuente*.
<https://blogs.iadb.org/agua/es/desalinizacion-el-futuro-del-agua/>
- Pérez, F. (2012). *Desarrollo de las nuevas membranas poliméricas basadas en polibenzimidazol para su aplicación en celdas de combustible PEM de alta temperatura*. [Tesis Doctoral, Universidad de Castilla, La Mancha].
- Soto, G., y Soto, C. (2013). *Desalación de agua de mar mediante sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Valero A. (2001). *La desalinización como alternativa al plan hidrológico nacional*. Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación de recursos y Consumos Energéticos (CIRCE).

Vega, J., Sibaja, M., Nikolaeva, S., y Rivera, A. (2014). Síntesis y caracterización de celulosa amorfa a partir de triacetato de celulosa. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(1), 45-50.

Zolotucho, H., y González, C. (2014). *Fibras de carbono sintetizadas desde fibras de poliacrilonitrilo (PAN)*. III Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 3). Argentina.