

**Análisis de la viabilidad técnica de un sistema de captación de agua a partir de mallas
atrapanieblas en la zona rural del municipio de Los Santos por la escasez de fuentes de
abastecimiento**

Camila Andrea Mora Zarate

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Marlon Leonardo Rodríguez Sierra

Magister en Ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2024

Contenido

1. Viabilidad técnica de un sistema de captación de agua a partir de mallas de atrapanieblas en la zona rural del Municipio de los Santos	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Justificación.....	11
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico	15
2.1 Información general del Municipio de los Santos.....	15
2.1.1 Geografía.....	15
2.1.2 Actividades económicas	16
2.2 Oferta hídrica.....	16
2.3 Demanda hídrica	17
2.4 Sistemas de malla de atrapanieblas	17
2.3.1 Factores externos	18
2.4.2 Atrapanieblas aplicados en el mundo.....	19
3. Método	21
3.1 Análisis de la metodología de la investigación	21
3.1.1 Tipo de investigación	21
3.1.2 Diseño.....	21
3.1.3 Enfoque	22
3.1.4 Variables.....	22

3.1.5 Muestra y muestreo	23
3.1.6 Técnica de recolección	23
3.1.7 Instrumentos de recolección	23
3.1.8 Técnica de análisis.....	24
3.1.9 Resultados esperados.....	25
3.2 Estimación de la demanda hídrica.....	25
3.2.1 Cálculo de la demanda hídrica de uso doméstico (Dd)	25
3.2.2 Cálculo de la demanda hídrica de uso agrícola (Da).....	27
3.2.3 Cálculo de la demanda hídrica de uso pecuario (Dp).....	28
3.3 Estimación del volumen de agua captado por el sistema de atrapanieblas	29
4. Resultados.....	31
4.1 Fase 1. Análisis de las condiciones meteorológicas.....	31
4.1 Fase 2. Cálculo para la estimación de la demanda hídrica	35
4.2.1 Cálculo de la demanda de uso domestico.....	36
4.2.2 Cálculo de la demanda de agua de uso agrícola.....	37
4.2.3 Cálculo de la demanda de agua de uso pecuario	46
4.2.4 Cálculo de la demanda hídrica total	46
4.3 Fase 3. Porcentaje de abastecimiento de la demanda hídrica.....	47
4.4 Fase 4. Propuesta de diseño del sistema de mallas de atrapanieblas.....	52
5. Conclusiones.....	57
Referencias	59

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Dotación de agua por habitante</i>	26
Tabla 2. <i>Censo Nacional de Población y Vivienda.....</i>	26
Tabla 3. <i>Tipos de cultivos presentes en Los Santos y su cobertura del suelo.....</i>	27
Tabla 4. <i>Inventario de especies y su consumo de agua diario.....</i>	29
Tabla 5. <i>Promedio mensual de las variables analizadas.....</i>	35
Tabla 6. <i>Especificaciones para cada cultivo.....</i>	38
Tabla 7. <i>Información de la estación meteorológica satelital.....</i>	39
Tabla 8. <i>Temperatura promedio mensual nocturna 2018-2022 (°C)</i>	39
Tabla 9. <i>Número máximo de horas de sol de acuerdo con la latitud.....</i>	40
Tabla 10. <i>Evapotranspiración potencial mensual 2018.....</i>	41
Tabla 11. <i>Evapotranspiración potencial mensual 2019.....</i>	42
Tabla 12. <i>Evapotranspiración potencial mensual 2020.....</i>	43
Tabla 13. <i>Evapotranspiración potencial mensual 2021.....</i>	43
Tabla 14. <i>Evapotranspiración potencial mensual 2022.....</i>	44
Tabla 15. <i>Evapotranspiración potencial anual.....</i>	45
Tabla 16. <i>Cálculo de la demanda hídrica de uso agrícola.....</i>	45
Tabla 17. <i>Cálculo de la demanda hídrica de uso pecuario.....</i>	46
Tabla 18. <i>Cálculo de la demanda hídrica total.....</i>	47
Tabla 19. <i>Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2018.....</i>	48
Tabla 20. <i>Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2019.....</i>	49
Tabla 21. <i>Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2020.....</i>	50

Tabla 22. <i>Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2021.....</i>	50
Tabla 23. <i>Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2022.....</i>	51
Tabla 24. <i>Porcentaje de abastecimiento.....</i>	52
Tabla 25. <i>Descripción de las piezas y unidades requeridas.....</i>	55

Lista de figuras

Figura 1. <i>Panorámica del casco urbano de Los Santos.....</i>	15
Figura 2. <i>Velocidad del viento promedio mensual</i>	32
Figura 3. <i>Humedad relativa promedio mensual</i>	33
Figura 4. <i>Temperatura promedio mensual</i>	34
Figura 5. <i>Estructura de la propuesta de un atrapanieblas – Vista frontal.....</i>	53
Figura 6. <i>Estructura de la propuesta de un atrapanieblas – Vista superior.....</i>	54
Figura 7. <i>Piezas que componen un atrapanieblas.....</i>	55

Introducción

La problemática del desabastecimiento hídrico en el departamento de Santander, Colombia, es una realidad que afecta a numerosos municipios, especialmente en la zona rural. La escasez de agua se intensifica durante la temporada seca, y según el Estudio Nacional del Agua, el 35.5% de los municipios colombianos se ven afectados por esta situación, destacándose la concentración en departamentos como Santander, Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Bolívar y Magdalena. El municipio de Los Santos enfrenta desafíos significativos debido a la falta de acceso constante y seguro al recurso hídrico. Esta problemática se agrava por diversos factores, como la variabilidad climática, la deforestación, el crecimiento poblacional y la falta de infraestructura adecuada.

En este contexto, surge la necesidad de encontrar soluciones innovadoras y sostenibles que aborden de manera efectiva la escasez hídrica en la zona rural de Los Santos. El proyecto de investigación propone la implementación de sistemas de malla de atrapanieblas como una alternativa viable y eficiente para suplir parte de las necesidades hídricas de la población. La problemática se centra en la falta de acceso al agua potable, derivada de factores climáticos y ambientales, así como de la falta de gestión adecuada de los recursos hídricos en la región.

Se destaca la importancia de encontrar soluciones temporales e inmediatas que mitiguen el impacto de la escasez de agua en la población, mientras se buscan soluciones a largo plazo. Es por eso por lo que, con este estudio se propone analizar la viabilidad técnica de la implementación de sistemas de malla de atrapanieblas en la zona rural de Los Santos, abordando las necesidades hídricas para uso agrícola, pecuario y doméstico. Esta propuesta busca suplir un porcentaje significativo de la demanda de agua en la población afectada. El estudio se fundamenta en la

aplicación de tecnologías innovadoras y accesibles, como las mallas de atrapanieblas, que han demostrado su eficacia en otras regiones del país.

1. Viabilidad técnica de un sistema de captación de agua a partir de mallas de atrapanieblas en la zona rural del Municipio de los Santos

1.1 Planteamiento del problema

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura en 2013, mencionó que el desabastecimiento hídrico se entiende como la carencia de este recurso, en un momento y lugar específico. Esto como resultado de recursos hídricos insuficientes, falta de infraestructura y su inadecuado mantenimiento, o debido a bajos niveles del agua como consecuencia de diferencias estacionales o anuales en el clima, o por muchos otros factores hidrológicos o hidrogeológicos.

En Colombia, la falta de agua es un desafío que afecta a gran parte de su población. Específicamente en el departamento de Santander, la escasez hídrica se ha manifestado como una gran preocupación, en la que los municipios más afectados enfrentan la realidad donde la accesibilidad de este recurso se vuelve limitado para sus habitantes.

Según el Estudio Nacional del Agua (ENA), realizado en el año 2018, se evaluaron los municipios que enfrentaron desabastecimiento de agua durante la temporada seca, los resultados indican que el 35.5% de los municipios del país se encuentran en esta situación, y están concentrados principalmente en los departamentos de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Bolívar y Magdalena. Además, el Estudio Nacional del Agua realizado en el año 2022, reveló que los departamentos mencionados anteriormente continuaron concentrando la mayor cantidad de municipios susceptibles a presentar desabastecimiento hídrico durante la temporada seca.

Por otro lado, se identificó que en el periodo 1998-2021 se identificaron 835 municipios susceptibles a desabastecimiento hídrico en temporada de lluvias, además se encontró que el 74%

del territorio nacional ha presentado afectaciones en los sistemas de distribución de agua potable y/o sistemas de acueducto, por problemas derivados a la ocurrencia de eventos como crecientes súbitas, inundaciones, avenidas torrenciales, tormentas eléctricas, movimientos en masa, avalanchas y vendavales, entre otros.

Así como también lo registra el Ministerio de Vivienda y la Oficina para la Gestión de Riesgos y Desastres (OGRD) en el reporte N°5 del 5 de febrero de 2020, el cual emitió una alerta, debido a que 102 municipios a nivel nacional, de los cuales 25 municipios de Santander tienen riesgo de que se suspenda el suministro de agua potable por las altas temperaturas que se presentan por el Fenómeno del Niño que se extienden hasta finales del 2023. Adicionalmente otros 34 municipios donde se podrían presentar racionamientos de agua. (Gobernación de Santander, 2020).

Esta problemática ha sido originada por una serie de factores que van desde la inadecuada gestión del recurso hídrico, hasta la ausencia de estrategias sostenibles y/o opciones efectivas para el aprovechamiento del agua, sumando el impacto negativo que provoca el cambio climático. Las zonas rurales son los lugares más afectados por este fenómeno, donde se evidencia poca disponibilidad del recurso para consumo y uso humano, agrícola y ganadero.

La causa de la escasez hídrica puede atribuirse a: la variabilidad climática con periodos prolongados de sequía por la reducción de las precipitaciones; la deforestación porque se reduce la capacidad de retención de agua en el suelo, así como la sobreexplotación de los recursos hídricos e irrigación ineficiente que lleva al uso inadecuado del suelo; el crecimiento poblacional debido al incremento de la demanda de agua; falta de infraestructura de almacenamiento y distribución, así como la planeación y gestión; la contaminación de fuentes de agua que puede afectar la calidad y disponibilidad del recurso, agravando los factores ya mencionados.

Para abordar la sequía es fundamental que se implementen medidas de conservación del agua, la promoción de prácticas sostenibles, fomentar la reforestación, invertir en infraestructura y adoptar enfoques de gestión integrada de recursos hídricos. A pesar de la importante necesidad de gestión, la falta de respuesta por parte del gobierno deja a las comunidades en situaciones sin brindarles una pronta solución o con los proyectos retrasados. Esto provoca que, la misma población se vea obligada a buscar soluciones temporales, sin el respaldo de las autoridades. Lo anterior podría acarrear repercusiones negativas a nivel social, económico y/o ambiental, teniendo como posibles consecuencias la limitación en producción agrícola, aumento de la pobreza y migración.

Existen muchas zonas en el territorio colombiano que tienen abundancia hídrica, pero carecen de un adecuado sistema de accesibilidad e infraestructura que permita captar y aprovechar sus recursos. Esto lleva a que se limiten las oportunidades para el desarrollo local y la mejora de la calidad de vida. La inversión en tecnologías y proyectos que permitan la captación, almacenamiento y distribución del recurso hídrico es esencial para fomentar la sostenibilidades y potencial de estas zonas, además de beneficiar a las comunidades locales y la economía en general.

1.2 Justificación

La implementación de tecnologías innovadoras y accesibles como la malla de atrapanieblas emerge como una posible solución para abordar la problemática de escasez del recurso hídrico. Para este estudio, se tendrá un enfoque directo del análisis de las condiciones climáticas y atmosféricas del departamento de Santander, para corroborar su viabilidad.

Un atrapanieblas se presenta como una alternativa temporal de abastecimiento eficiente que le brinde a las comunidades condiciones óptimas para el suministro de agua. Esta técnica brindaría

una solución a corto plazo para la población que se están viendo afectadas por la escasez de agua, la ausencia de instalaciones, infraestructura e incorrecto mantenimiento de estas, así como el mal uso del recurso hídrico.

Este sistema se caracteriza por su facilidad en construcción y funcionamiento, con un diseño relativamente simple. Consta de dos postes con cable de tensión en acero para la resistencia al viento, una malla raschel o poli sombra, en la que las gotas de agua que contiene la niebla se adhieren a sus filamentos y caen hasta el tubo PVC ubicado en la parte inferior de la malla que conducen el líquido captado por un filtro y posteriormente hasta su lugar de almacenamiento.

La implementación de este proyecto se plantea como una alternativa viable para abordar de manera provisional e inmediata la demanda hídrica de la población, mientras el gobierno busca establecer una solución permanente.

La aplicación y ejecución del sistema de atrapanieblas en el municipio de Los Santos resulta como una propuesta interesante desde diferentes puntos de vista, ya que se destaca por su economía, eficiencia y funcionalidad; además, con la gran posibilidad de ser un caso exitoso en la zona de estudio, debido a que cuenta con variedad de microclimas, ecosistemas y relieve que favorecen su correcto funcionamiento.

En cuanto a los aspectos técnicos, que son explicados en el documento Fuentes de agua no convencionales para contribuir a la mitigación y a la adaptación al cambio climático, publicado en el 2014, se menciona que en la zona de estudio se experimentan fenómenos “convectivos”, que se entienden como nubes de gran desarrollo vertical, las cuales se originan en el Valle de Magdalena medio; esta región también se encuentra influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), una franja nubosa que es formada por las corrientes de aire cálido y húmedo provenientes de los grandes cinturones de alta presión situados en la zona subtropical de los

hemisferios norte y sur. Este fenómeno origina la formación de grandes masas nubosas que provocan abundantes precipitaciones.

Un estudio realizado en esta región, llamado Propuesta de un sistema de atrapanieblas como fuente de agua no convencional en la Vereda La Fuente, publicado en el año 2017, explico como ocurre la formación de masas nubosas que provocan las precipitaciones. Inicialmente, se presenta una acumulación de aire húmedo en el Valle de Magdalena Medio que junto con las altas temperaturas de la zona, hace que este ascienda y posteriormente se desplace desde el valle hacia el Este en dirección al municipio de los Santos, dando lugar a precipitaciones orográficas, las cuales ocurren cuando las masas de aire húmedo chocan con el flanco Oeste de la cordillera Oriental, enfriándose hasta alcanzar su punto de saturación del vapor de agua y finalmente depositando parte de su humedad en forma de precipitación sobre dicho flanco.

El sistema de atrapanieblas es una propuesta que además de ser económico, funcional y eficiente, presenta un valor social, debido a que este prototipo aún no está patentado y logra beneficiar a poblaciones que están siendo vulneradas por no tener un acceso eficiente, constante y sin riesgos del agua; además corresponde a una alternativa ecológica y amigable con el medio ambiente, convirtiéndose en un modelo sostenible para el abastecimiento hídrico.

Es de vital importancia reconocer el impacto que han tenido los sistemas de atrapanieblas en Colombia, donde estos modelos se destacan por su éxito, excelente funcionamiento y facilidad de acceso a todo tipo de público y/o población; gran parte de estos proyectos se han ubicado en el departamento de Cundinamarca, teniendo como ejemplares en el municipio de Choachí, Suesca y Arbeláez; los atrapanieblas también han tomado popularidad en los departamentos de Santander y Boyacá.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar la viabilidad técnica de la implementación de sistemas de malla de atrapanieblas para uso agrícola, pecuario y doméstico en la zona rural del municipio de Los Santos, como propuesta alternativa que supla un porcentaje de las necesidades hídricas de la población a causa de la escasez de agua.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar las condiciones meteorológicas del municipio a partir de bases de datos institucionales y satelitales.
- Calcular la demanda hídrica de uso agrícola, pecuario y doméstico para la zona rural del municipio considerando un análisis demográfico.
- Determinar el porcentaje de abastecimiento de la demanda hídrica que podría suplir la implementación del sistema de atrapanieblas en la zona rural.
- Desarrollar una propuesta de diseño de mallas de atrapanieblas para conocer el potencial de abastecimiento de esta tecnología.

2. Marco teórico

2.1 Información general del Municipio de los Santos

2.1.1 Geografía

El municipio de Los Santos tiene una extensión territorial de 284,74 Km². Política y administrativamente el municipio está conformado por su Cabecera municipal o suelo urbano y el área rural integrada por 15 veredas registradas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. La Cabecera municipal se encuentra ubicado a una altura entre los 1320 y 1270 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 21°. Geográficamente se ubica a 6°45' latitud norte y 73°06' de longitud al oeste con respecto al meridiano de Greenwich [1]. A continuación, se puede apreciar la Figura 1, que muestra una imagen panorámica del casco urbano del municipio de Los Santos.

Figura 1. *Panorámica del casco urbano de Los Santos*



Tomado de [1]

Los ríos que integran la red hidrográfica de la región son el Río Chicamocha y Río Sogamoso, los cuales pertenecen a la Gran Cuenca del Magdalena. El municipio de los Santos

tiene una escasa cobertura vegetal, lo que provoca que en época de verano la mayoría de las quebradas permanezcan secas, por lo que algunas solo funcionan como canales naturales de drenaje que únicamente transportan caudal durante los periodos de lluvia [2].

2.1.2 Actividades económicas

Las actividades económicas representativas que se desarrollan en el municipio hacen parte del sector primario, en las que se destaca la producción agrícola, pecuaria y minera [2]. La actividad agrícola destaca el cultivo de tabaco, algunas hortalizas y frutas; por otro lado, la actividad pecuaria se basa en la crianza de bovinos, bufalinos, porcinos, equinos, ovinos, caprinos y aves. También el sector minero, siendo una de las principales fuentes de ingresos del municipio por su cantidad de producción y riqueza de minerales [3].

En el sector terciario de la economía de Los Santos se destaca el turismo, representado en las parcelaciones de tipo recreativo que se desarrolla en la llamada Mesa de Los Santos, en donde sus condiciones climáticas, tranquilidad y el paisaje han permitido que esta área se convierta en un lugar atractivo para la recreación y el descanso, atrayendo a habitantes del área metropolitana [3].

2.2 Oferta hídrica

Se refiere a la cantidad de agua que tras haberse precipitado sobre la cuenca y satisfacer con la demanda de evapotranspiración e infiltración del sistema (suelo y cobertura vegetal), fluye a través de los ríos principales y las corrientes superficiales. Esta porción de agua alimenta lagos, lagunas y reservorios, se junta con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar. La oferta hídrica de una cuenca corresponde también al volumen de agua disponible para cumplir con las necesidades hídricas generada por las actividades humanas, sociales y económicas [5]. La oferta

hídrica necesaria para satisfacer la demanda de agua en una zona está determinada por la precipitación, las corrientes de agua superficial y reservas subterráneas existentes [4].

2.3 Demanda hídrica

La demanda de agua estimada corresponde a la cantidad o volumen de agua usado por los sectores económicos y la población [9]. Corresponde a la sumatoria de las demandas sectoriales, en las que se incluyen: uso doméstico, sector primario (agrícola, pecuario, pesquero, minero, entre otras), sector secundario (industria y construcción), y terciario (servicios, comercio, transporte y comunicaciones).

2.4 Sistemas de malla de atrapanieblas

Los sistemas de malla de atrapanieblas son estructuras diseñadas para captar artificialmente el agua contenida en la niebla. Un prototipo de atrapanieblas está constituido por una malla de poliéster o polipropileno colocada verticalmente entre dos postes o soportes y orientada perpendicularmente a la dirección del viento. El agua se recoge a través de una canaleta que captura las gotas que fueron atrapadas por la malla y las almacena en depósitos a través de un sistema de tuberías [10].

El principio físico de este fenómeno no se basa en la condensación de las gotas sobre la malla del atrapanieblas, sino en que las partículas de agua al chocar con la malla se agrupan y forman gotas más grandes [10].

2.3.1 Factores externos

- Ubicación: un aspecto importante para la instalación es la ubicación que se le dé al atrapanieblas, ya que de ello depende el nivel de captación del sistema. La ubicación de la malla debe ser tal que el viento choque perpendicularmente con ella [10].
- Relieve: la diferencia topográfica crea los corredores a través de los cuales las masas de aire se desplazarán. A medida que se presenta una mayor altitud, la capacidad de interceptar las nubes y presentar menores temperaturas resulta en una mayor humedad perceptible en la niebla [13].
- Niebla: es una masa nubosa que se forma al nivel del suelo, compuesta por pequeñas gotas de agua menores a 40 micrones, que al no ser lo suficientemente pesadas para caer, permanecen suspendidas en el aire, siendo desplazadas por el viento [11].
- Viento: determina la dirección y velocidad de la niebla. Su origen se debe a las diferencias de temperatura en el aire, y por tanto de densidad entre dos regiones de la tierra [13]. Se considera que el rango óptimo de velocidad es de entre 3 y 10 m/s, debido a que si la velocidad del viento es demasiado baja no atravesaría la malla, y, por el contrario, si es muy alta, las gotas no se adherirán a ella [19].
- Temperatura: la variación se debe principalmente a los movimientos de traslación y rotación de la tierra, que posiciona a las superficies para recibir radiación solar, esto provoca que se calienten las masas de aire y se generen cambios de temperatura y presión, originándose los vientos [13]. Cuando la temperatura esta sobre los cero grados Celsius, el vapor se condensa en numerosas y pequeñas gotas de agua líquida; por el contrario, si esta fuese menor a cero grados, se formarían cristales de hielo por condensación sólida;

explicando así, la formación de agua atmosférica y como puede ser captada de forma líquida [19].

- Capacidad hídrica de la niebla: también conocida como humedad. Se conoce como la cantidad de presión de vapor de agua presente en la atmosfera o la proporción entre aire seco y aire húmedo [19].

2.4.2 Atrapanieblas aplicados en el mundo

Se han implementado sistemas de atrapanieblas en varios países, donde su ubicación generalmente presenta características en común: Son regiones extremadamente áridas, que son atravesadas por una corriente de aire fría, que produce vientos fuertes y húmedos, favoreciendo a la aparición de una densa neblina [12]. A continuación, algunos ejemplares de atrapanieblas que han tenido buenos resultados.

Chile. Corresponde a un importante exponente en la implementación de este sistema de captación, algunos ejemplos aplicados en este país son:

Tofo/Chungungo (1987-2002). Fueron el resultado de varios prototipos de atrapanieblas, este sistema generaba en promedio 15.000 litros de agua diarios, abasteciendo a más de 100 hogares. Por falta de reparaciones y mantenimiento se regresó al abastecimiento de agua convencional.

Falda verde (2001). Es una zona costera al norte del país que presenta bajas precipitaciones, se han usado estos colectores para aportar de 430 a 600 litros de agua diarios para abastecer la comunidad [11].

Península Árábica. Sultanato de Omán (1989-1990). Se implementó el sistema de mallas de atrapanieblas con un promedio de captación de 30m^3 diarios. Debido a la espesa niebla y fuertes vientos, se abandonó el proyecto en la zona [11].

Namibia. Soutriver, Tribu de los Topnaar (1996-201). Se colocaron varios atrapanieblas para abastecer la demanda de agua de la tribu y otras. Se registro una captación de 12m^3 diarios de agua potable [11].

Yemen. Hajja/Mabijan (2003-2005). Presenta una necesidad hídrica muy alta, por lo que la presencia de niebla ha impulsado a aprovechar esta tecnología. Se estima una captación de 180 litros de agua al día a la comunidad [11].

Colombia. Algunas aplicaciones importantes se realizaron en los siguientes municipios:

Ráquira, Boyacá (2016). Se realizó un estudio de prefactibilidad para la evaluar la posibilidad de implementar un sistema de atrapanieblas en este municipio, en el cual se pretende realizar un análisis de la viabilidad técnica, ambiental, social y económica. Este municipio tiene características que lo hicieron apropiado para el desarrollo de la investigación, debido a que sus condiciones ambientales favorecen la implementación de esta tecnología [13].

Arbeláez, Cundinamarca (2020). En la zona se presenta una climatología óptima la mayoría de los días, especialmente en las horas de la noche, para la captación de agua mediante atrapanieblas. Se estima una recolección de 20.570 litros de agua promedio mensuales [14].

Los Santos, Santander (2020). El municipio se declaró en calamidad pública debido a la ausencia de precipitaciones, esto ha provocado que se seque la quebrada Los Pozos, que surte al área urbana; y también la quebrada La Cañada, que abastece al área rural. En el municipio, se puede llegar a obtener una cantidad significativa de agua a partir de la captación por medio de atrapanieblas. Aunque lo que se obtenga no resolverá por completo las dificultades para el acceso

a este recurso, si será una alternativa importante que disminuya la presión sobre los medios tradicionales de agua para consumo y uso humano [16].

Paramo colombiano, Boyacá (2023). El páramo Pan de Azúcar es un páramo seco, que de acuerdo con sus características climáticas y meteorológicas es posible obtener un buen resultado al ejecutar un sistema de mallas de atrapanieblas, es por esto por lo que el estudio planteo la instalación de 60 captadores de mallas planas bidimensionales de tipo convencional [15]. La zona presenta una precipitación media anual de 1128 mm, una temperatura promedio de 8°C, con dos periodos de lluvia y dos periodos secos.

3. Método

3.1 Análisis de la metodología de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

La aplicación de un sistema de atrapanieblas se clasifica como investigación descriptiva, ya que implica la medición y evaluación de diversos aspectos meteorológicos, poblacionales y actividades económicas en el municipio de Los Santos. Esto se lleva a cabo con el objetivo de diseñar adecuadamente el sistema de atrapanieblas destinado para dicho municipio.

3.1.2 Diseño

Este proyecto se enmarca en un diseño de investigación no experimental longitudinal. Si bien se clasifica como no experimental, ya que no se manipularán las variables de estudio, las cuales son obtenidas de bases de datos confiables de estaciones meteorológicas. Por otra parte, se

califica como longitudinal dado que los datos se recopilan a lo largo del tiempo, lo que permite realizar inferencias acerca de las variaciones en el fenómeno en cuestión.

3.1.3 Enfoque

El estudio se orienta hacia un enfoque cuantitativo, ya que la utilización de estaciones meteorológicas posibilita la recopilación de datos numéricos precisos, para la realizar análisis estadísticos, permitiendo la identificación de variaciones, patrones o tendencias en los datos recopilados. El objetivo final es definir la viabilidad y eficiencia del sistema de atrapanieblas en relación con los factores climáticos, para que posteriormente se pueda cuantificar la cantidad de agua que es posible captar en condiciones óptimas. Esta cifra se compara con la demanda hídrica del municipio, con el fin de determinar el porcentaje que el sistema podría abastecer.

3.1.4 Variables

Las variables esenciales para implementar un sistema de atrapanieblas en el departamento de Santander son: humedad relativa, dirección y velocidad del viento, temperatura y pluviometría.

Los factores ambientales son cruciales para evaluar la viabilidad y eficacia del sistema. La humedad relativa afecta la capacidad de condensación del agua, mientras que la dirección y velocidad del viento determinan la cantidad de neblina capturada. La temperatura influye en la formación de la niebla y su capacidad de condensación. La pluviometría, aunque no es el foco del sistema, puede afectar su operación. La combinación y análisis de estas variables permiten determinar si las condiciones locales son adecuadas para la captación de agua mediante atrapanieblas, asegurando la eficiencia y éxito del sistema.

3.1.5 Muestra y muestreo

La muestra es no probabilística, ya que los datos requeridos para esta investigación están asociados a variables que se rigen por características o criterios específicos. La técnica de muestreo adoptada es intencional, puesto que se recopilan datos de las condiciones climáticas y ambientales en momentos específicos, en concordancia con los objetivos planteados.

3.1.6 Técnica de recolección

Se empleará la técnica de recolección de documentos y revisión de registros, ya que implica la recopilación de datos históricos a partir de plataformas que brindan información meteorológica.

Esta selección de datos se realiza con el propósito de ser aplicada exclusivamente dentro del alcance de la investigación, tomando como fuentes principales a las bases de datos de entidades como el ENA e IDEAM, así como las plataformas de la NASA y Global Weather. El enfoque está en conocer las particularidades y los contextos climáticos y atmosféricos que caracterizan a los diversos municipios de Santander.

3.1.7 Instrumentos de recolección

En lo que respecta al instrumento de recolección de información, se llevará a cabo la extracción de datos a partir de fuentes documentales. Esto conlleva la extracción de información pertinente de tesis, documentos e investigaciones que servirán como orientación y marco de referencia a lo largo del desarrollo del proyecto. Además, se llevará a cabo un proceso de revisión de registros, el cual se materializará mediante la descarga de datos históricos de los municipios que han sido elegidos para formar parte de esta investigación. Estos datos serán posteriormente organizados y sometidos a un análisis, siendo plasmados en tablas de Excel para una comprensión

y manipulación más efectiva. Esta metodología de recolección y análisis respaldará de manera sólida y confiable la investigación en su conjunto, asegurando la precisión y la relevancia de los resultados obtenidos.

3.1.8 Técnica de análisis

La técnica de análisis adoptada emplea enfoques estadísticos y aritméticos sencillos. Se explora en detalle la información meteorológica correspondiente a los municipios previamente designados, con el propósito de comprender las tendencias de las condiciones climáticas en cada mes del año, durante un periodo de tiempo definido para el estudio.

Mediante este análisis, se pueden determinar los períodos más secos y húmedos del año. Además, se procede a calcular, de manera mensual, el potencial volumen de captación de agua a partir de la eventual implementación de atrapanieblas.

En un paso subsiguiente, se establecen conexiones entre los datos recopilados y los resultados derivados de la carta psicrométrica. Este análisis más profundo permite extraer conclusiones sólidas sobre la factibilidad del proyecto en cada uno de los municipios seleccionados.

Este enfoque combina datos cuantitativos con perspectivas cualitativas, generando así un entendimiento integral de la viabilidad del proyecto en contextos climáticos y geográficos específicos. Esta técnica robusta de análisis garantiza una toma de decisiones informada y precisa, fundamentando las consideraciones futuras para la implementación exitosa de los atrapanieblas en los municipios objeto de estudio.

3.1.9 Resultados esperados

La meta es que, al culminar esta investigación, sea posible afirmar que la implementación de sistemas de atrapanieblas constituye una alternativa altamente eficiente y funcional para los municipios acogidos como foco de análisis.

Se busca demostrar cómo la instalación de atrapanieblas puede contribuir de manera efectiva a atenuar este desafío crítico. Al relacionar los resultados obtenidos con los objetivos establecidos, se aspira a establecer una clara correlación entre la implementación de atrapanieblas y el aumento del suministro hídrico en estos municipios.

3.2 Estimación de la demanda hídrica

En este caso de estudio, se determinará la demanda hídrica de la zona rural del municipio de Los Santos, con un enfoque específico en el uso doméstico, considerando el uso agrícola y pecuario del sector primario, excluyendo a la minería. Dado que el enfoque del proyecto está en la evaluación y aplicación de atrapanieblas para abastecer las necesidades hídricas en zonas rurales, se ha optado por omitir la demanda hídrica proveniente de la actividad minera en este cálculo debido a las diferencias substanciales en los requerimientos hídricos de este sector, que pueden requerir evaluaciones y enfoques específicos en investigaciones separadas.

3.2.1 Cálculo de la demanda hídrica de uso doméstico (Dd)

Para calcular la demanda de agua de uso doméstico se debe considerar la Tabla 1. Dotación de agua por habitante, en la cual se define la cantidad máxima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante de acuerdo con la altura de la zona de estudio. Esta

información es estipulada en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).

Tabla 1. *Dotación de agua por habitante.*

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación neta máxima (Lt/habitantes día)
> 2000 m.s.n.m	120
1000 - 2000 m.s.n.m	130
< 1000 m.s.n.m	140

Tomado de [22].

Posteriormente, se debe consultar la información disponible de los últimos censos poblacionales realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). A continuación, se presenta la Tabla 2, donde se registra información poblacional de los cuatro últimos censos nacionales.

Tabla 2. *Censo Nacional de Población y Vivienda.*

Fecha del Censo Nacional de Población y Vivienda	Tiempo transcurrido (años)	Número de habitantes
15 de octubre de 1985	-	8204
24 de octubre de 1993	8,024657534	6783
22 de noviembre de 2005	12,07945205	9334
30 de junio de 2018	12,60273973	12433

Nota. Los datos fueron tomados de los censos realizados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

En caso de que no esté actualizado, se debe realizar una proyección demográfica para obtener la población final proyectada (P_f) [4]. Para determinar la población final proyectada, se utiliza el método aritmético, el cual se calcula mediante la siguiente formula:

$$Pf = Puc + \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci} \cdot (Tf - Tuc) \quad (1)$$

Donde Puc es la población del último censo, Pci es la población del censo inicial, Tuc es el tiempo en años del último censo, Tci es el tiempo en años del censo inicial y Tf es el tiempo en años proyectado. Finalmente, la demanda hídrica de uso doméstico se calcula con la siguiente formula:

$$Dd = Pf \cdot Dt_{habitante} \quad (2)$$

3.2.2 Cálculo de la demanda hídrica de uso agrícola (Da)

Para calcular la demanda de agua de uso agrícola es necesario realizar una serie de pasos. En primer lugar, se debe determinar el área de los cultivos, la cobertura del suelo para las zonas de producción (A), y se definen los coeficientes de cultivo (Kc) para cada tipo de cultivo. A continuación, se presenta la Tabla 3, que identifica los cultivos predominantes en el municipio de Los Santos, indicando en qué veredas se ubica cada uno de ellos.

Tabla 3. Tipos de cultivos presente en los Santos y su cobertura del suelo.

Cultivo		Ubicación geográfica
Hortalizas	Tabaco	Tabacal, San Rafael, Salazar, Mojarra, La Peña, Pozo, La Fuente, Rosa Blanca, Guamito, Delicias, Los Teres, Garbanzal, Laguna, Paso Chico, Espinal, Regadero, Potreros, Llanadas y La Purnia.
	Tomate	La Purnia, El Verde, La Mesa, Tabacal, Carrizal, La Fuente, Rosablanca, Guamito, Delicias, El Pozo, Los Teres.
	Pimentón	La Purnia, La Mesa, El Pozo, Los Teres.
	Habichuela y pepino	Delicias, Guamito, Tabacal, Rosablanca, La Fuente, La Purnia
	Yuca	La Purnia, San Rafael, Salazar, Mojarra, Garbanzal, Teres, Lagunas y Potreros
	Maíz	Todas las veredas

Cultivo		Ubicación geográfica
Frutales	<i>Frijol</i>	Delicias, Guamito, La Fuente, Rosablanca y Tabacal
	<i>Piña</i>	El Guamito, Delicias, El Pozo, La Fuente y Rosablanca
	<i>Patilla</i>	Guamito, Delicias, El Pozo, Los Teres, Laguna y Espinal

Adaptado de [3].

Luego, se deben identificar estaciones meteorológicas para definir la evapotranspiración potencial promedio anual (*ETP*), y calcular sus requerimientos hídricos [4]. Finalmente, la demanda hídrica de uso agrícola se calcula con la siguiente formula:

$$Da = \left[\sum_{i=1}^n (Kc_i \cdot A_i) \right] \cdot ETP \quad (3)$$

3.2.3 Cálculo de la demanda hídrica de uso pecuario (*Dp*)

Para calcular la demanda de agua de uso pecuario se debe seguir este proceso. Se debe tomar como referencia el censo más reciente de especies pecuarias del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), para determinar el número de animales presentes de cada especie (*N especie*). Luego, basándose en información bibliográfica se asigna una dotación de consumo de agua diaria a cada una de las especies (*Dt especie*) [4]. En la Tabla 4, se detallan las especies animales presentes en el municipio de Los Santos, con su respectiva cantidad y consumo de agua diario asociado a cada una de ellas.

Tabla 4. *Inventario de especies y su consumo de agua diario.*

Especie	Cantidad	Consumo diario (Lt/día)
<i>Bovinos</i>	5919	100

<i>Bufalino</i>	40	100
<i>Porcino</i>	1152	24
<i>Aviar</i>	4692655	0,1
<i>Equino</i>	198	63
<i>Ovino</i>	800	7
<i>Caprino</i>	810	8

Adaptado de [8].

Finalmente, la demanda hídrica de uso pecuario se calcula con la siguiente formula:

$$Dp = \sum N_{especie} \cdot Dt_{especie} \quad (4)$$

3.3 Estimación del volumen de agua captado por el sistema de atrapanieblas

Para obtener la información meteorológica necesaria, se descargaron los datos a través de la plataforma Giovanni de la NASA. Este procedimiento requiere de parámetros climatológicos esenciales como la humedad relativa (HR , %), la dirección y velocidad del viento (V , m/s), la temperatura (T , °C) y el punto de rocío (Td , °C) [20]. La recolección de estos datos se llevó a cabo durante las horas nocturnas, período en el cual se observan condiciones óptimas para el funcionamiento eficiente del atrapanieblas.

Teniendo en cuenta esta información, se implementó el modelo matemático propuesto en el documento “Development of a mathematical model for the quantification of fog-collection resources”, diseñado para determinar el potencial volumen de captación de agua de niebla por hora. Se estima con la siguiente ecuación:

$$Fw = fc \cdot FPI \cdot HR \cdot f(W) \cdot Ac \quad (5)$$

Donde Fw es el volumen de agua niebla esperado, fc es el coeficiente de colección de niebla dependiente del material de la malla, FPI es el índice potencial de niebla que depende de la

diferencia entre el punto de rocío y la temperatura del aire, HR es la humedad relativa, $f(W)$ es la función de velocidad del viento y A_c es el área de la malla colectora [20].

El índice potencial de niebla indica la aparición de niebla, es decir, la ocurrencia de la captación de agua atmosférica. Se define que la niebla se forma cuando $FPI > 0$. Este fenómeno ocurre cuando las temperaturas oscilan entre 1°C y $2,5^\circ\text{C}$ [20]. Se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$FPI = (Td - T + 2,5) \cdot 2,6 \quad (6)$$

Donde Td es el punto de rocío y T la temperatura del aire. El punto de rocío es calculado utilizando la formula recomendada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA):

$$Td = \frac{243,5 \cdot \ln\left(\frac{e_a}{6,112}\right)}{17,67 - \ln\left(\frac{e_a}{6,112}\right)} \quad (7)$$

Se define e_a como la presión de vapor de agua actual, la cual es calculada con la ecuación:

$$HR = 100 \cdot \frac{e_a}{e_s} \rightarrow e_a = HR \cdot \frac{e_s}{100} \quad (8)$$

El parámetro e_s es la presión de vapor saturado, el cual es calculado con la ecuación:

$$e_s = 6,112 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot T}{T+243,5}\right)} \quad (9)$$

Para definir la velocidad del viento se presenta una hipótesis basada en la suposición de que una vez la niebla se forma, el entorno pierde más aire que humedad. Una baja velocidad facilita el reemplazo del aire del entorno con nuevo aire cargado de humedad, lo que favorece la continua formación de nieblas. Sin embargo, si la velocidad del viento supera los 4m/s , la formación de nieblas se verá obstaculizada por la fuerte velocidad de viento, causando una reducción en la

cantidad de agua captada [20]. Teniendo en cuenta esta explicación, la función del viento está condicionada de la siguiente manera:

$$f(W) = \begin{cases} \text{si } V > 4\text{m/s} \rightarrow 0,4 \cdot V \\ \text{si } V < 4\text{m/s} \rightarrow 3/V \end{cases} \quad (10)$$

4. Resultados

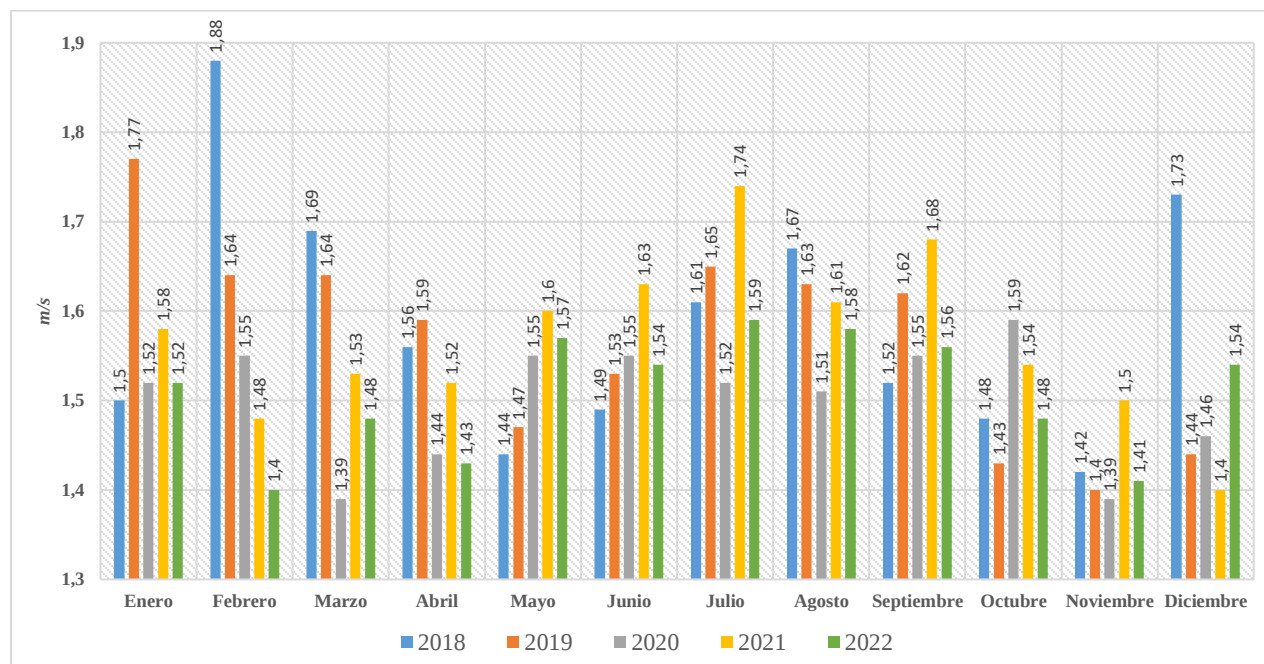
4.1 Fase 1. Análisis de las condiciones meteorológicas

Se llevo a cabo una revisión de las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, centrándose en el análisis de la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, variables necesarias para estimar la demanda hídrica y el volumen de agua captado por el sistema de atrapanieblas. Dicha revisión se realizó en un periodo de tiempo que abarca desde el 1 de enero del 2018 hasta el 31 de diciembre de 2022, totalizando cinco años de estudio.

Es importante mencionar que los datos utilizados para el estudio fueron seleccionados específicamente con información climática correspondiente a las horas nocturnas, debido a que es en estas horas que se ofrece un ambiente óptimo para la captación de agua atmosférica.

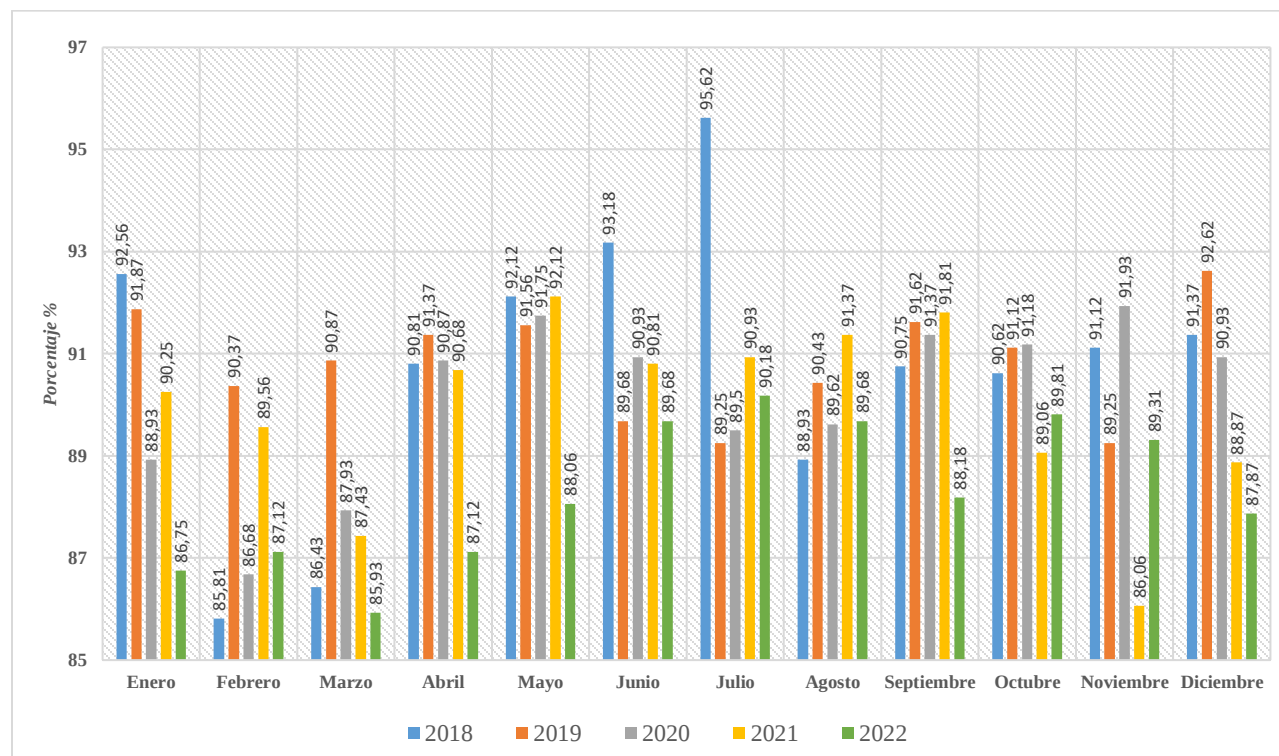
A continuación, se muestran tres diagramas de barras que brindan información sobre cada parámetro, que representa los promedios mensuales y permiten visualizar tendencias y/o patrones de su comportamiento.

En la Figura 2, se presentan las velocidades promedio mensual del viento durante el periodo de estudio. Se observa que las velocidades más altas se registran durante los trimestres de diciembre, enero, febrero y junio, julio, agosto; mientras que las velocidades más bajas se evidencian en los trimestres de marzo, abril, mayo y septiembre, octubre, noviembre. En el tiempo de estudio, se muestra que las velocidades registradas se mantienen entre 1,39 m/s y 1,88 m/s.

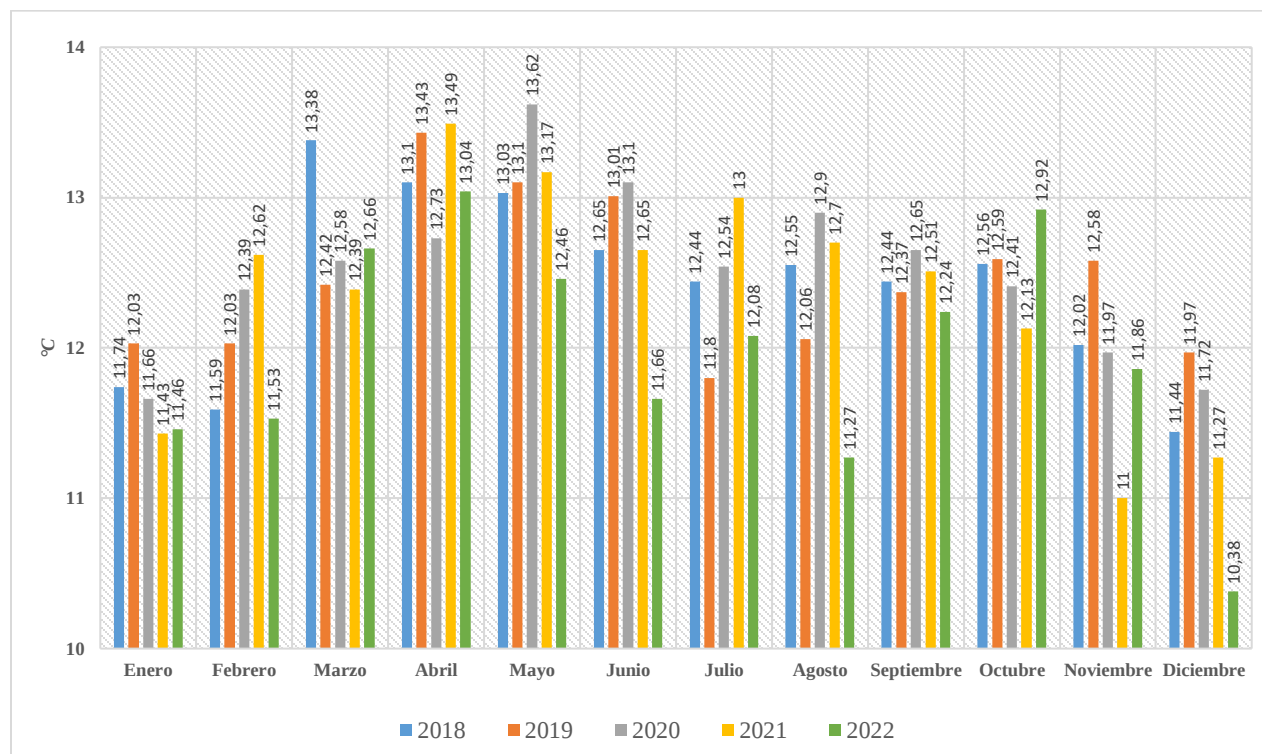
Figura 2. Velocidad del viento promedio mensual.

Nota. Los datos que son representados en la figura se descargaron del software de Giovanni NASA.

En la Figura 3, se presenta la humedad relativa promedio mensual durante el periodo de estudio. Los datos revelan que los trimestres con humedad relativa más alta son diciembre, enero, febrero y junio, julio, agosto, mientras que los trimestres con una humedad relativa más baja se observaron en marzo, abril, mayo y septiembre, octubre, noviembre. Los valores oscilan entre 85,81% y 95,62%.

Figura 3. *Humedad relativa promedio mensual.*

En la Figura 4, se presenta la temperatura promedio mensual durante el periodo de estudio. Se observan las temperaturas más bajas en los trimestres de diciembre, enero, febrero y junio, julio, agosto, mientras que las temperaturas más altas se registran en marzo, abril, mayo y septiembre, octubre, noviembre. La temperatura máxima registrada fue de 13,62 °C y la mínima de 10,38 °C.

Figura 4. *Temperatura promedio mensual.*

El análisis de los parámetros de velocidad del viento, humedad relativa y temperatura proporciona información importante para determinar si la propuesta de implementación de atrapanieblas es viable. En las Figuras 3, 4 y 5, se observa coherencia en los datos de los tres parámetros mencionados, debido a que los meses con las características más óptimas coinciden en todos ellos. Los trimestres con mayores velocidades de viento, humedades relativas más altas y menores temperaturas, son aquellos en los que se presentan las condiciones más favorables, lo que sugiere que se pueden obtener mejores resultados en la captación de agua.

Los trimestres que presentan mejores resultados son diciembre, enero, febrero y junio, julio, agosto; en los trimestres de marzo, abril, mayo y septiembre, octubre, noviembre, la captación de agua será posible pero menos efectiva en comparación con los primeros meses mencionados. A

continuación, se presenta la Tabla 5, con los promedios mensuales de cada una de las variables analizadas.

Tabla 5. *Promedio mensual de las variables analizadas.*

Mes	Velocidad del viento (m/s)	Humedad Relativa (%)	Temperatura (°C)
Enero	1,578	90,072	11,664
Febrero	1,59	87,908	12,032
Marzo	1,546	87,718	12,686
Abril	1,508	90,17	13,158
Mayo	1,526	91,122	13,076
Junio	1,548	90,856	12,614
Julio	1,622	91,096	12,372
Agosto	1,6	90,006	12,296
Septiembre	1,586	90,746	12,442
Octubre	1,504	90,358	12,522
Noviembre	1,424	89,534	11,886
Diciembre	1,514	90,332	11,356

Nota. Los datos que se muestran en la tabla fueron analizados e interpretados a partir de información extraída del software de Giovanni NASA.

De acuerdo con el proceso del modelo matemático para la cuantificación de la recolección de la niebla, se determina que las condiciones climáticas caracterizadas por velocidades menores a 4 m/s, humedades relativas que rondan el 90-100% y bajas temperatura representan un comportamiento climático óptimo para la captación efectiva de agua atmosférica.

4.1 Fase 2. Cálculo para la estimación de la demanda hídrica

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos de la estimación de la demanda hídrica de la zona rural del municipio de Los Santos. Para llevar a cabo este cálculo, se consideraron tanto la demanda hídrica de uso doméstico como la del sector primario, abarcando solo uso agrícola y pecuario.

4.2.1 Cálculo de la demanda de uso domestico

Como primer paso, se debe establecer la dotación neta máxima diaria de agua por habitante. Para ello, se consulta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2017). Considerando la Tabla 1, que menciona la dotación de agua por habitante, y conociendo que la altitud a la que se encuentra el municipio de Los Santos es de 1.327 m.s.n.m, se define que la dotación correspondiente es de 130 litros de agua por habitante al día, es decir:

$$Dt_{habitante} = \frac{130 \text{ litros}}{\text{habitante} \cdot \text{día}}$$

Como siguiente paso, se determina el número de habitantes en la zona rural del municipio. Como se indica en la Tabla 2, que expone información demográfica consultada en el Censo Nacional de Población y Vivienda para los últimos cuatro censos nacionales realizados por el DANE, la información indica que el último fue efectuado en el año 2018. Por esta razón, se procede a realizar una proyección demográfica con el fin de obtener una población aproximada para el año 2023. Para la proyección demográfica, se optó por realizarla por el método aritmético, ya que solo se busca una estimación de la información en un corto periodo de tiempo, considerando un aumento constante e independiente. A continuación, se definen las variables:

$Pf = \text{población final proyectada}$

$Puc = \text{poblacion del ultimo censo} \rightarrow Puc = 12.433 \text{ habitantes}$

$Pci = \text{población del censo inicial} \rightarrow Pci = 8.204 \text{ habitantes}$

$Puc - Pci = \text{diferencia de habitantes entre censo final e inicial}$

$Pd = Puc - Pci = 12.433 \text{ habitantes} - 8.204 \text{ habitantes}$

$Pd = 4.229 \text{ habitantes}$

$Tuc = \text{tiempo en años del ultimo censo} \rightarrow Tuc = 30 \text{ junio } 2018$

$Tci = \text{tiempo en años del censo inicial} \rightarrow Tci = 15 \text{ octubre } 1985$

$$T_t = T_{uc} - T_{ci} = \text{Tiempo en años transcurrido entre ambos censos}$$

$$T_t = T_{uc} - T_{ci} = 30 \text{ junio } 2018 - 15 \text{ octubre } 1985 \rightarrow T_t = 32,71 \text{ años}$$

$$T_f = \text{año al que se desea proyectar}$$

$$T_p = T_f - T_{uc} = \text{tiempo en años proyectado}$$

$$T_p = T_f - T_{uc} = 1 \text{ enero } 2023 - 30 \text{ junio } 2018 \rightarrow T_p = 4,51 \text{ años}$$

Luego de tener todas las variables definidas, se procede a realizar el cálculo para conocer la población final proyectada. Se soluciona de la siguiente manera aplicando la Ecuación 1:

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_d}{T_t} \cdot T_p = 12.433 \text{ habitantes} + \frac{4.229 \text{ habitantes}}{32,71 \text{ años}} \cdot 4,51 \text{ años}$$

$$P_f = 13.016 \text{ habitantes}$$

Teniendo como resultado que, para la fecha proyectada, se estima que habrá 13.016 habitantes en la zona rural del municipio de Los Santos. Con los datos de dotación neta máxima diaria por habitante y el resultado del cálculo de la proyección demográfica se puede estimar la demanda hídrica de uso doméstico, aplicando la Ecuación 2.

$$D_d = P_f * D_{t_{habitante}} = 13016 \text{ habitantes} * \frac{130 \text{ litros}}{\text{habitante} \times \text{día}}$$

$$D_d = 1.692,1 \text{ litros/día} \rightarrow D_d = 1.692,1 \text{ m}^3/\text{día}$$

Finalmente, se obtiene el resultado de la demanda hídrica para uso doméstico para la población rural del municipio, siendo de 1.692,1 metros cúbicos diarios.

4.2.2 Cálculo de la demanda de agua de uso agrícola

Como primer paso, se llevó a cabo la consulta de los principales cultivos que se producen en el municipio de Los Santos, con su respectiva área y coeficiente de cultivo. Según el Esquema

de Ordenamiento Territorial municipal, se identificaron cultivos de gran importancia como el tabaco, algunas hortalizas y frutas.

Como se especifica a continuación, en la Tabla 6 se plasma la información sobre el área de cobertura del suelo (A) y el coeficiente de cultivo (K_c) para cada uno de los principales cultivos que se destacan en el municipio de Los Santos.

Tabla 6. *Especificaciones para cada cultivo.*

Cultivo		Área (Ha)	Coeficiente de cultivo (K_c)
Tabaco		600	0,735
Hortalizas	Tomate	70	0,8
	Pimentón	70	0,9
	Habichuela y pepino	25	0,67
	Yuca	125	0,4
	Maíz	70	0,475
	Frijol	30	0,35
Frutales	Piña	50	0,4
	Patilla	40	0,75

Adaptado de [6], [7].

El siguiente paso es la identificación de la estación meteorológica. En este caso, se decidió obtener la información histórica meteorológica de la plataforma especializada Giovanni Nasa, la cual proporciona datos climáticos satelitales. La Tabla 7 presenta información general sobre la estación satelital AIRS, de la cual se obtuvo la información climática.

Tabla 7. *Información de la estación meteorológica satelital.*

Información estación meteorológica	
Plataforma	Giovanni Nasa
Tipo	Satelital (AIRS)
Coordenada norte	6,8750

Información estación meteorológica	
Coordenada sur	6,7300
Coordenada este	-73,0115
Coordenada oeste	-73,1203
Fecha inicial	1 de enero de 2018
Fecha final	31 de diciembre de 2022

Se consultaron las temperaturas promedio nocturnas mensuales desde 2018 hasta 2022. Se decidió enfocarse en las temperaturas nocturnas debido a la observación de que las temperaturas más bajas se registran entre las 8 pm y las 6 am, momentos en los que no hay radiación solar directa. La Tabla 8 muestra las temperaturas promedio nocturnas para cada mes durante el periodo de cinco años considerado en este estudio.

Tabla 8. *Temperatura promedio mensual nocturna 2018-2022 (°C).*

Año \ Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2018	11,74	11,59	13,38	13,1	13,03	12,65	12,44	12,55	12,44	12,56	12,02	11,44
2019	12,03	12,03	12,42	13,43	13,1	13,01	11,8	12,06	12,37	12,59	12,58	11,97
2020	11,66	12,39	12,58	12,73	13,62	13,1	12,54	12,9	12,65	12,41	11,97	11,72
2021	11,43	12,62	12,39	13,49	13,17	12,65	13	12,7	12,51	12,13	11	11,27
2022	11,46	11,53	12,66	13,04	12,46	11,66	12,08	11,27	12,24	12,92	11,86	10,38

A continuación, se realiza el procedimiento para obtener la evapotranspiración potencial (*ETP*) por el método de Thornthwaite. El primer paso implica calcular el índice de calor (*i*) y el índice de calor anual (*I*) a partir de la información que brinda la Tabla 8. Temperatura promedio mensual nocturna 2018-2022, utilizando la siguiente fórmula:

$$i = \left(\frac{T_{promedio}}{5} \right)^{1,514} \quad (11)$$

$$I = \sum i \quad (12)$$

Se procede a determinar la evapotranspiración potencial sin corregir mediante la expresión:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 1,6 * \left(\frac{10 * T_{\text{prom}}}{I} \right)^a \quad (13)$$

Donde:

$$a = (6,75 \times 10^{-7} * I^3) - (7,71 \times 10^{-5} * I^2) + (0,017925 * I) + 0,49239 \quad (14)$$

Luego, para calcular la evapotranspiración potencial corregida, es necesario conocer la latitud de la zona de estudio para definir el número máximo de horas de sol (N), y el número de días de cada mes (d). Las coordenadas que se detallan anteriormente en la Tabla 7. Información meteorológica satelital, precisan la ubicación del cuadrante de estudio donde se encuentra el municipio de Los Santos.

A continuación, se muestra la Tabla 9, la cual permite definir el número máximo de horas de sol teniendo en cuenta la localización geográfica del municipio, específicamente con información sobre la latitud.

Tabla 9. Número máximo de horas de sol de acuerdo con la latitud.

Lat.N.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Lat.S.	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
50	8,5	10,1	11,8	13,8	15,4	16,3	15,9	14,5	12,7	10,8	9,1	8,1
48	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,1	8,3
46	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7
44	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14	12,6	11	9,7	8,9
42	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,9	11,1	9,8	9,1
40	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3
35	10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
30	10,4	11,1	12	12,9	13,6	14	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
25	10,7	11,3	12	12,7	13,3	13,7	13,5	13	12,3	11,6	10,9	10,6
20	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
15	11,3	11,6	12	12,5	12,8	13	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
10	11,6	11,8	12	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
5	11,8	11,9	12	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	12	11,9	11,8
0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
Interpolación	11,73	11,86	12,00	12,24	12,41	12,51	12,41	12,34	12,10	11,93	11,79	11,69

Adaptado de [21].

Los Santos está ubicado a una latitud norte de 6,8025° con respecto al meridiano de Greenwich. Al definirse como norte, los valores consignados corresponden a los meses que se mencionan en la primera línea de la tabla “*Lat.N.*”, como el municipio se ubica a una latitud de 6,8025°, es decir, que se encuentra entre el rango de 5° y 10°, es por esto por lo que se realizó una interpolación para determinar el número máximo de horas de sol diario para todos los meses.

Como paso siguiente, se debe calcular la evapotranspiración potencial corregida con la siguiente ecuación:

$$ETP_{corregido} = ETP_{sin\ corregir} \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{d}{30} \right) \quad (15)$$

A continuación, se presentan las tablas con los cálculos del procedimiento explicado para conocer la evapotranspiración potencial mensual. La Tabla 10 presenta de manera organizada el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual para el año 2018. Se observan valores que oscilan entre los 50,08 mm/mes y 67,08 mm/mes, con un promedio de 60,45 mm/mes y una sumatoria total de 725,35 mm/año.

Tabla 10. *Evapotranspiración potencial mensual 2018.*

Mes	Temperatura media (°C)	Índice de calor mensual (i)	ETP sin corregir (mm/mes)	Horas de sol diarias (N)	N° días del mes (d)	ETP corregido (mm/mes)
ENE	11,74	3,64	55,15	11,73	31	55,70
FEB	11,59	3,57	54,28	11,86	28	50,08
MAR	13,38	4,44	64,89	12,00	31	67,05
ABR	13,1	4,30	63,20	12,24	30	64,45
MAY	13,03	4,26	62,78	12,41	31	67,08
JUN	12,65	4,08	60,51	12,51	30	63,08
JUL	12,44	3,97	59,27	12,41	31	63,33
AGO	12,55	4,03	59,92	12,34	31	63,65
SEP	12,44	3,97	59,27	12,10	30	59,76
OCT	12,56	4,03	59,98	11,93	31	61,61
NOV	12,02	3,77	56,79	11,79	30	55,81

Mes	Temperatura media (°C)	Índice de calor mensual (i)	ETP sin corregir (mm/mes)	Horas de sol diarias (N)	N° días del mes (d)	ETP corregido (mm/mes)
DIC	11,44	3,50	53,40	11,69	31	53,77
	$\sum i$	47,57			$\sum ETP$	725,35
	a	1,24				

La Tabla 11 presenta de manera organizada el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual para el año 2019. Se observan valores que oscilan entre los 52,40 mm/mes y 67,48 mm/mes, con un promedio de 60,55 mm/mes y una sumatoria total de 726,60 mm/año.

Tabla 11. *Evapotranspiración potencial mensual 2019.*

Mes	Temperatura media (°C)	Índice de calor mensual (i)	ETP sin corregir (mm/mes)	Horas de sol diarias (N)	N° días del mes (d)	ETP corregido (mm/mes)
ENE	12,03	3,78	56,79	11,73	31	57,35
FEB	12,03	3,78	56,79	11,86	28	52,40
MAR	12,42	3,97	59,10	12,00	31	61,07
ABR	13,43	4,46	65,14	12,24	30	66,43
MAY	13,1	4,30	63,16	12,41	31	67,48
JUN	13,01	4,25	62,61	12,51	30	65,27
JUL	11,8	3,67	55,44	12,41	31	59,24
AGO	12,06	3,79	56,97	12,34	31	60,52
SEP	12,37	3,94	58,80	12,10	30	59,29
OCT	12,59	4,05	60,11	11,93	31	61,74
NOV	12,58	4,04	60,05	11,79	30	59,00
DIC	11,97	3,75	56,44	11,69	31	56,82
	$\sum i$	47,78			$\sum ETP$	726,60
	A	1,25				

La Tabla 12 presenta de manera organizada el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual para el año 2020. Se observan valores que oscilan entre los 55,03 mm/mes y 70,74 mm/mes, con un promedio de 61,09 mm/mes y una sumatoria total de 733,09 mm/año.

Tabla 12. *Evapotranspiración potencial mensual 2020.*

Mes	Temperatura media (°C)	Índice de calor mensual (i)	ETP sin corregir (mm/mes)	Horas de sol diarias (N)	N° días del mes (d)	ETP corregido (mm/mes)
ENE	11,66	3,60	54,49	11,73	31	55,03
FEB	12,39	3,95	58,80	11,86	29	56,20
MAR	12,58	4,04	59,94	12,00	31	61,93
ABR	12,73	4,12	60,83	12,24	30	62,03
MAY	13,62	4,56	66,21	12,41	31	70,74
JUN	13,1	4,30	63,06	12,51	30	65,73
JUL	12,54	4,02	59,70	12,41	31	63,78
AGO	12,9	4,20	61,85	12,34	31	65,70
SEP	12,65	4,08	60,35	12,10	30	60,86
OCT	12,41	3,96	58,92	11,93	31	60,52
NOV	11,97	3,75	56,32	11,79	30	55,34
DIC	11,72	3,63	54,85	11,69	31	55,22
	$\sum i$	48,21			$\sum ETP$	733,09
	A	1,25				

La Tabla 13 presenta de manera organizada el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual para el año 2020. Se observan valores que oscilan entre los 50,06 mm/mes y 68,04 mm/mes, con un promedio de 60,22 mm/mes y una sumatoria total de 722,62 mm/año.

Tabla 13. *Evapotranspiración potencial mensual 2021.*

Mes	Temperatura media (°C)	Índice de calor mensual (i)	ETP sin corregir (mm/mes)	Horas de sol diarias (N)	N° días del mes (d)	ETP corregido (mm/mes)
ENE	11,43	3,50	53,42	11,73	31	53,95
FEB	12,62	4,06	60,40	11,86	28	55,73
MAR	12,39	3,95	59,04	12,00	31	61,01
ABR	13,49	4,49	65,60	12,24	30	66,89
MAY	13,17	4,33	63,68	12,41	31	68,04
JUN	12,65	4,08	60,58	12,51	30	63,14
JUL	13	4,25	62,66	12,41	31	66,95
AGO	12,7	4,10	60,88	12,34	31	64,67
SEP	12,51	4,01	59,75	12,10	30	60,25
OCT	12,13	3,83	57,51	11,93	31	59,07
NOV	11	3,30	50,94	11,79	30	50,06
DIC	11,27	3,42	52,50	11,69	31	52,85
	$\sum i$	47,32			$\sum ETP$	722,62
	A	1,24				

La Tabla 14 presenta de manera organizada el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual para el año 2020. Se observan valores que oscilan entre los 48,52 mm/mes y 64,68 mm/mes, con un promedio de 58,44 mm/mes y una sumatoria total de 701,32 mm/año.

Tabla 14. *Evapotranspiración potencial mensual 2022.*

Mes	Temperatura media (°C)	Índice de calor mensual (i)	ETP sin corregir (mm/mes)	Horas de sol diarias (N)	N° días del mes (d)	ETP corregido (mm/mes)
ENE	11,46	3,51	54,29	11,73	31	54,83
FEB	11,53	3,54	54,69	11,86	28	50,47
MAR	12,66	4,08	61,21	12,00	31	63,25
ABR	13,04	4,27	63,43	12,24	30	64,68
MAY	12,46	3,98	60,05	12,41	31	64,16
JUN	11,66	3,60	55,44	12,51	30	57,78
JUL	12,08	3,80	57,85	12,41	31	61,81
AGO	11,27	3,42	53,21	12,34	31	56,52
SEP	12,24	3,88	58,77	12,10	30	59,26
OCT	12,92	4,21	62,73	11,93	31	64,43
NOV	11,86	3,70	56,58	11,79	30	55,60
DIC	10,38	3,02	48,19	11,69	31	48,52
$\sum i$		45,02			$\sum ETP$	701,32
A		1,20				

En la Tabla 15 se observa la evapotranspiración potencial anual para los años de estudio, se observa que el resultado más alto fue en el año 2020 con 733,09 mm/año, y el resultado más bajo fue en el año 2022 con 701,32 mm/año, obteniendo una ETP promedio de 721,79 mm/año.

Tabla 15. *Evapotranspiración potencial anual.*

Evapotranspiración potencial anual (mm/año)	
2018	725,35
2019	726,60

Evapotranspiración potencial anual (mm/año)	
2020	733,09
2021	722,62
2022	701,32
Promedio	721,79

En este punto, es posible realizar el cálculo de la demanda hídrica de uso agrícola, procedimiento de cálculo que esta consignado en la Tabla 16. Para realizarlo se tiene la cuenta la información proporcionada en la Tabla 6 sobre las especificaciones para cada cultivo, que incluye el área de cobertura del suelo (A) y el coeficiente de cultivo (K_c), siendo complementada con la Tabla 15, que menciona los valores de evapotranspiración potencial anual.

Tabla 16. *Cálculo de la demanda hídrica de uso agrícola.*

Evapotranspiración potencial promedio (m/año)			0,721
Cultivo	Área (Ha)	Coeficiente de cultivo (K_c)	Demanda agrícola (m³/día)
Tabaco	600	0,735	8720,9
Tomate	70	0,8	1107,4
Pimentón	70	0,9	1245,8
Habichuela y pepino	25	0,67	331,2
		0,75	370,8
Yuca	125	0,4	988,8
Maíz	70	0,475	657,5
Frijol	30	0,35	207,6
Piña	50	0,4	395,5
Patilla	40	0,75	593,3
Da			14618,8

Adaptado de [3], [6], [7].

La tabla anterior presenta la información necesaria estimar la demanda hídrica de uso agrícola siguiendo la Ecuación 3. Se calcula un total de 14.618,8 metros cúbicos de agua diarios.

4.2.3 Cálculo de la demanda de agua de uso pecuario

Para realizar el cálculo de la demanda hídrica de uso pecuario se tiene en cuenta la información consignada en la Tabla 4, que incluye un inventario de especies (*N especie*) y su respectivo consumo de agua diario (Lt/día). Siguiendo la fórmula propuesta en la Ecuación 4 se realiza dicho cálculo, el cual es consignado en la Tabla 17.

Tabla 17. Cálculo de la demanda hídrica de uso pecuario.

Especie	Cantidad	Consumo diario (Lt/día)	Demanda pecuaria (m3/día)
Bovinos	5919	100	591,9
Bufalino	40	100	4,0
Porcino	1152	24	27,6
Aviar	4692655	0,1	469,3
Equino	198	63	12,5
Ovino	800	7	5,6
Caprino	810	8	6,5
		Dp	1117,4

Adaptado de [8].

La tabla anterior presenta la información necesaria estimar la demanda hídrica de uso pecuario siguiendo la Ecuación 4. Se calcula un total de 1.117,4 metros cúbicos de agua diarios.

4.2.4 Cálculo de la demanda hídrica total

La demanda hídrica total en la zona rural del municipio de Los Santos, Santander, se compone de la suma de la demanda calculada para los usos doméstico, agrícola y pecuario. Seguidamente, se presenta la Tabla 18, que contiene el cálculo de la demanda hídrica total.

Tabla 18. *Cálculo de la demanda hídrica total.*

Uso	Demanda hídrica (m3/día)
Domestico	1692,1
Agrícola	14618,8
Pecuario	1117,4
Total	17428,3

La tabla anterior presenta los resultados de cada categoría, destacando que la cifra total alcanza los 17.428,3 metros cúbicos diarios.

4.3 Fase 3. Porcentaje de abastecimiento de la demanda hídrica

Se realiza el proceso de cálculo del modelo matemático diseñado para determinar el potencial volumen de captación de agua de niebla, empleando la Ecuación 5 como una guía, debido a que esta se plantea para el cálculo de volumen esperado para una hora de una unidad de malla de atrapanieblas, por eso, se modifica la ecuación original para incorporar factores adicionales, como el número de horas efectivas en las que las condiciones climáticas son óptimas para la captación (*H efectivas*) y la cantidad de atrapanieblas propuestos para satisfacer parte de la demanda hídrica de la zona de estudio (*Nº atrapanieblas*). A continuación, se presenta la ecuación modificada:

$$Fw = fc \cdot FPI \cdot HR \cdot f(W) \cdot Ac \cdot H_{efectivas} \cdot N^{\circ}_{atrapanieblas} \quad (16)$$

Para calcular el volumen diario esperado de captación de agua niebla, se establecen ciertas constantes. El material seleccionado para la malla colectora, siendo de polietileno, le corresponde un coeficiente de colección de niebla (*fc*) de 0,35. Así mismo, considerando que las condiciones óptimas para la captura de agua de presentan generalmente en un horario de 8 pm a 6 am, se define el número de horas efectivas (*H efectivas*) como 10 horas. La propuesta plantea la instalación de

3.018 atrapanieblas, cada uno con unas dimensiones de 8 metros de largo por 2,5 metros de alto, resultando en un área (A_c) de 20 metros cuadrados.

La cantidad de unidades de atrapanieblas se determinó en base al número de viviendas registradas por el DANE en el Censo Nacional de Población y Vivienda del 2018 (CNPV), específicamente para la población rural dispersa del municipio de Los Santos.

A continuación, se presentan tablas con el cálculo del volumen de agua diario esperado por el sistema de atrapanieblas consignado en la Ecuación 15, para los años analizados.

La Tabla 19 muestra el cálculo del volumen diario de agua esperado para el año 2018. Este procedimiento permitió determinar un volumen máximo esperado de agua de 615,58 metros cúbicos diarios en el mes de julio, un mínimo de 73,16 metros cúbicos diarios en febrero y un promedio de 321,92 metros cúbicos diarios.

Tabla 19. *Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2018.*

Mes	W (m/s)	HR (%)	T (°C)	Td (°C)	ea (hPa)	es (hPa)	FPI	f(W) (m/s)	Volumen (m ³ /día)
Enero	1,50	92,56	11,74	10,57	13,78	12,75	3,47	0,60	407,15
Febrero	1,88	85,81	11,59	9,30	13,64	11,71	0,54	0,75	73,16
Marzo	1,69	86,43	13,38	11,16	15,34	13,26	0,74	0,68	90,73
Abril	1,56	90,81	13,10	11,63	15,06	13,68	2,69	0,62	321,59
Mayo	1,44	92,12	13,03	11,78	15,00	13,81	3,25	0,58	364,53
Junio	1,49	93,18	12,65	11,58	14,63	13,63	3,71	0,60	435,40
Julio	1,61	95,62	12,44	11,76	14,43	13,80	4,73	0,64	615,58
Agosto	1,67	88,93	12,55	10,77	14,53	12,92	1,88	0,67	236,48
Septiembre	1,52	90,75	12,44	10,97	14,43	13,09	2,68	0,61	312,40
Octubre	1,48	90,62	12,56	11,07	14,54	13,18	2,62	0,59	296,97
Noviembre	1,42	91,12	12,02	10,62	14,03	12,79	2,85	0,57	311,75
Diciembre	1,73	91,37	11,44	10,08	13,51	12,34	2,97	0,69	397,28

La Tabla 20 muestra el cálculo del volumen diario de agua esperado para el año 2019. Este procedimiento permitió determinar un volumen máximo esperado de agua de 435,73 metros cúbicos diarios en el mes de enero, un mínimo de 213,67 metros cúbicos diarios en noviembre y un promedio de 327,30 metros cúbicos diarios.

Tabla 20. *Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2019.*

Mes	W (m/s)	HR (%)	T (°C)	Td (°C)	ea (hPa)	es (hPa)	FPI	f(W) (m/s)	Volumen (m3/día)
Enero	1,77	91,87	12,03	10,75	14,04	12,90	3,17	0,71	435,73
Febrero	1,64	90,37	12,03	10,50	14,04	12,69	2,53	0,66	316,68
Marzo	1,64	90,87	12,42	10,97	14,41	13,09	2,73	0,66	344,09
Abril	1,59	91,37	13,43	12,05	15,39	14,06	2,92	0,64	358,36
Mayo	1,47	91,56	13,10	11,76	15,06	13,79	3,01	0,59	342,35
Junio	1,53	89,68	13,01	11,36	14,98	13,43	2,20	0,61	254,76
Julio	1,65	89,25	11,80	10,09	13,83	12,34	2,05	0,66	255,20
Agosto	1,63	90,43	12,06	10,54	14,07	12,72	2,55	0,65	318,07
Septiembre	1,62	91,62	12,37	11,05	14,36	13,16	3,06	0,65	383,23
Octubre	1,43	91,12	12,59	11,18	14,57	13,28	2,83	0,57	312,16
Noviembre	1,40	89,25	12,58	10,86	14,56	13,00	2,02	0,56	213,67
Diciembre	1,44	92,62	11,97	10,81	13,99	12,96	3,49	0,58	393,36

La Tabla 21 muestra el cálculo del volumen diario de agua esperado para el año 2020. Este procedimiento permitió determinar un volumen máximo esperado de agua de 369,88 metros cúbicos diarios en el mes de mayo, un mínimo de 101,22 metros cúbicos diarios en febrero y un promedio de 276,69 metros cúbicos diarios.

Tabla 21. *Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2020.*

Mes	W (m/s)	HR (%)	T (°C)	Td (°C)	ea (hPa)	es (hPa)	FPI	f(W) (m/s)	Volumen (m3/día)
Enero	1,52	88,93	11,66	9,90	13,70	12,19	1,92	0,61	218,88
Febrero	1,55	86,68	12,39	10,23	14,38	12,46	0,89	0,62	101,22
Marzo	1,39	87,93	12,58	10,63	14,56	12,80	1,44	0,56	148,89

Mes	W (m/s)	HR (%)	T (°C)	Td (°C)	ea (hPa)	es (hPa)	FPI	f(W) (m/s)	Volumen (m3/día)
Abril	1,44	90,87	12,73	11,28	14,70	13,36	2,72	0,58	301,12
Mayo	1,55	91,75	13,62	12,30	15,58	14,30	3,08	0,62	369,88
Junio	1,55	90,93	13,10	11,65	15,06	13,70	2,74	0,62	326,13
Julio	1,52	89,50	12,54	10,86	14,52	13,00	2,13	0,61	245,36
Agosto	1,51	89,62	12,90	11,24	14,87	13,33	2,17	0,60	248,68
Septiembre	1,55	91,37	12,65	11,28	14,63	13,36	2,94	0,62	351,94
Octubre	1,59	91,18	12,41	11,01	14,40	13,13	2,87	0,64	351,10
Noviembre	1,39	91,93	11,97	10,70	13,99	12,86	3,20	0,56	345,33
Diciembre	1,46	90,93	11,72	10,29	13,76	12,51	2,78	0,58	311,71

La Tabla 22 muestra el cálculo del volumen diario de agua esperado para el año 2021. Este procedimiento permitió determinar un volumen máximo esperado de agua de 408,34 metros cúbicos diarios para el mes de septiembre, un mínimo de 73,73 metros cúbicos diarios para noviembre y un promedio de 280,77 metros cúbicos diarios.

Tabla 22. Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2021.

Mes	W (m/s)	HR (%)	T (°C)	Td (°C)	ea (hPa)	es (hPa)	FPI	f(W) (m/s)	Volumen (m3/día)
Enero	1,58	90,25	11,43	9,89	13,50	12,18	2,50	0,63	300,71
Febrero	1,48	89,56	12,62	10,95	14,60	13,07	2,16	0,59	241,70
Marzo	1,53	87,43	12,39	10,36	14,38	12,57	1,23	0,61	138,69
Abril	1,52	90,68	13,49	12,00	15,45	14,01	2,62	0,61	304,96
Mayo	1,60	92,12	13,17	11,92	15,13	13,94	3,25	0,64	404,60
Junio	1,63	90,81	12,65	11,19	14,63	13,28	2,70	0,65	337,68
Julio	1,74	90,93	13,00	11,55	14,97	13,61	2,74	0,70	366,50
Agosto	1,61	91,37	12,70	11,33	14,68	13,41	2,94	0,64	365,39
Septiembre	1,68	91,81	12,51	11,21	14,49	13,31	3,13	0,67	408,34
Octubre	1,54	89,06	12,13	10,38	14,14	12,59	1,96	0,62	226,73
Noviembre	1,50	86,06	11,00	8,76	13,12	11,29	0,68	0,60	73,73
Diciembre	1,40	88,87	11,27	9,50	13,36	11,87	1,90	0,56	200,19

La Tabla 23 muestra el cálculo del volumen diario de agua esperado para el año 2022. Este procedimiento permitió determinar volumen máximo esperado de agua de 296,25 metros cúbicos diarios para el mes de julio, un mínimo de 58,16 metros cúbicos diarios para marzo y un promedio de 185,40 metros cúbicos diarios.

Tabla 23. *Cálculo del volumen de agua diario esperado – 2022.*

Mes	W (m/s)	HR (%)	T (°C)	Td (°C)	ea (hPa)	es (hPa)	FPI	f(W) (m/s)	Volumen (m3/día)
Enero	1,52	86,75	11,46	9,33	13,52	11,73	0,96	0,61	107,33
Febrero	1,40	87,12	11,53	9,46	13,59	11,84	1,12	0,56	115,93
Marzo	1,48	85,93	12,66	10,37	14,64	12,58	0,54	0,59	58,16
Abril	1,43	87,12	13,04	10,95	15,01	13,07	1,06	0,57	111,72
Mayo	1,57	88,06	12,46	10,54	14,45	12,72	1,50	0,63	175,70
Junio	1,54	89,68	11,66	10,02	13,70	12,29	2,24	0,62	261,68
Julio	1,59	90,18	12,08	10,52	14,09	12,71	2,44	0,64	296,25
Agosto	1,58	89,68	11,27	9,64	13,36	11,98	2,26	0,63	270,03
Septiembre	1,56	88,18	12,24	10,34	14,24	12,56	1,57	0,62	181,98
Octubre	1,48	89,81	12,92	11,29	14,89	13,37	2,26	0,59	253,51
Noviembre	1,41	89,31	11,86	10,16	13,89	12,40	2,07	0,56	220,78
Diciembre	1,54	87,87	10,38	8,46	12,59	11,06	1,50	0,62	171,71

El sistema de atrapanieblas se propuso como una alternativa temporal y funcional para el suministro del recurso hídrico en el municipio de Los Santos, en caso de que su red principal de abastecimiento no pueda satisfacer la demanda hídrica. En la Tabla 24 se registra el volumen esperado promedio mensual de captación de agua.

Tabla 24. *Porcentaje de abastecimiento.*

Mes	Volumen promedio esperado (m3)	Abastecimiento pecuario (%)
Enero	293,96	26,31
Febrero	169,74	15,19
Marzo	156,11	13,97

Mes	Volumen promedio esperado (m3)	Abastecimiento pecuario (%)
Abril	279,55	25,02
Mayo	331,41	29,66
Junio	323,13	28,92
Julio	355,78	31,84
Agosto	287,73	25,75
Septiembre	327,58	29,32
Octubre	288,09	25,78
Noviembre	233,05	20,86
Diciembre	294,85	26,39

Para determinar qué porcentaje de la demanda puede ser cubierto por esta estructura, se decidió enfocar en el uso pecuario, debido a que es el que requiere menor cantidad de agua y podría abastecerse en mayor medida. Según los cálculos, es posible abastecer alrededor del 13,97% de la demanda en temporadas donde las condiciones climáticas no son tan favorables, y hasta un 31,84% cuando los parámetros de velocidad del viento, humedad relativa y temperatura son óptimos.

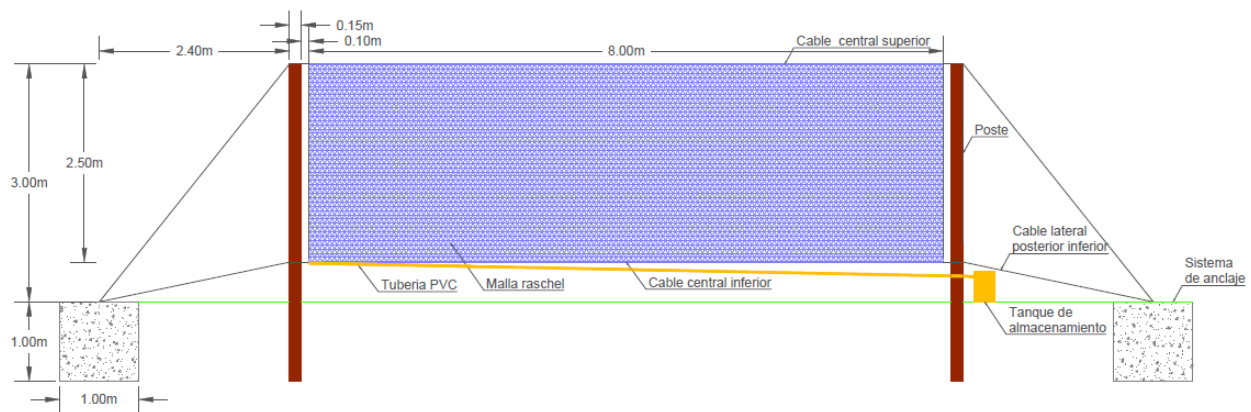
4.4 Fase 4. Propuesta de diseño del sistema de mallas de atrapanieblas

Una malla de atrapanieblas es una estructura vertical, compuesta básicamente de postes, cables, anclajes que sustentan una malla que es la que capta la niebla y una canaleta ubicada en la parte inferior, que recibe el agua desde la malla y la conduce mediante tuberías hasta un tanque de almacenamiento [19]. Se propuso un diseño para el sistema de atrapanieblas con dimensiones para su malla colectora de 8 metros de largo por 2,5 metros de alto, proporcionando una superficie de captura de 20 metros cuadrados.

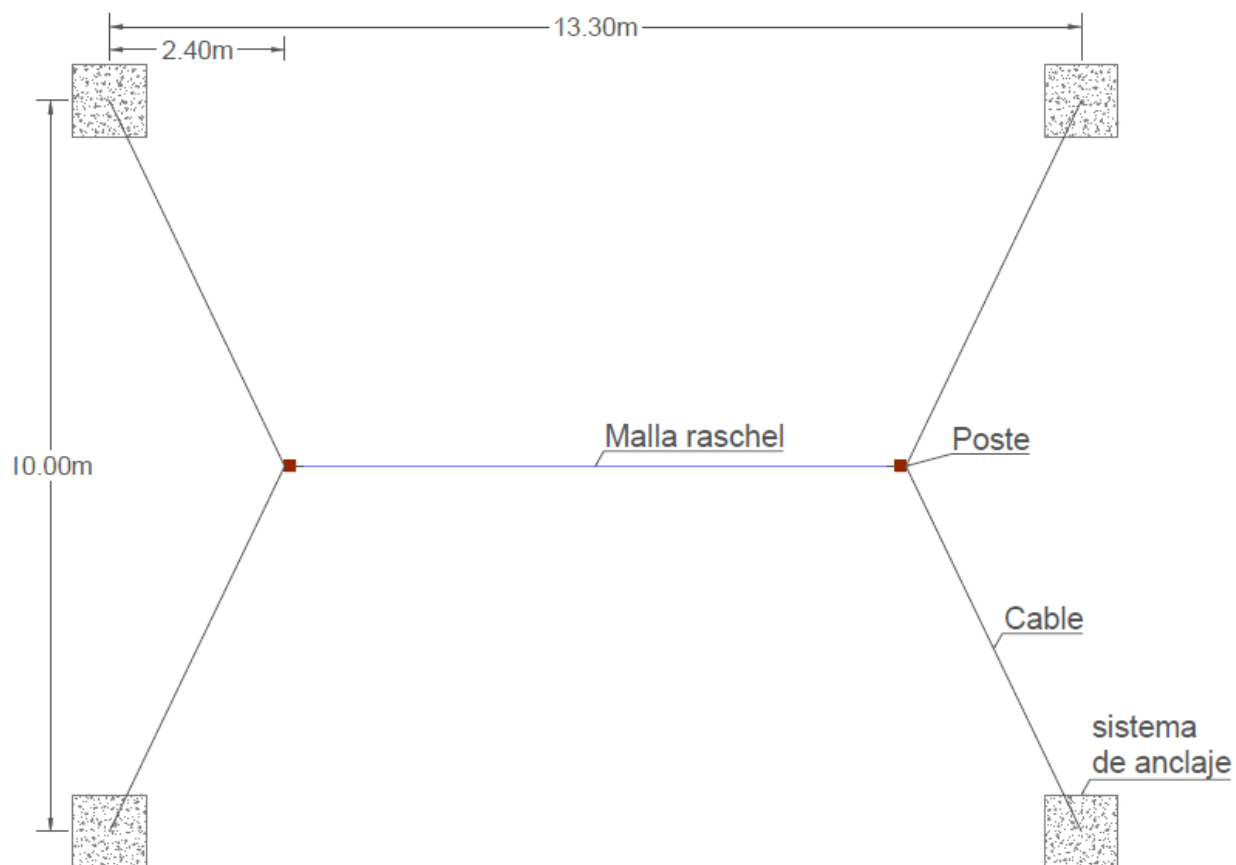
En la Figura 5 se puede observar la vista frontal de la propuesta, que consiste en una malla atrapanieblas con un diseño bidimensional. Esta estructura está compuesta principalmente por un par de pilares entre los cuales se encuentra dispuesta la malla Raschel. En este caso, se optó por

trabajar con un diseño de módulos simples, los cuales constan de una sola malla de captación sostenida por dos postes.

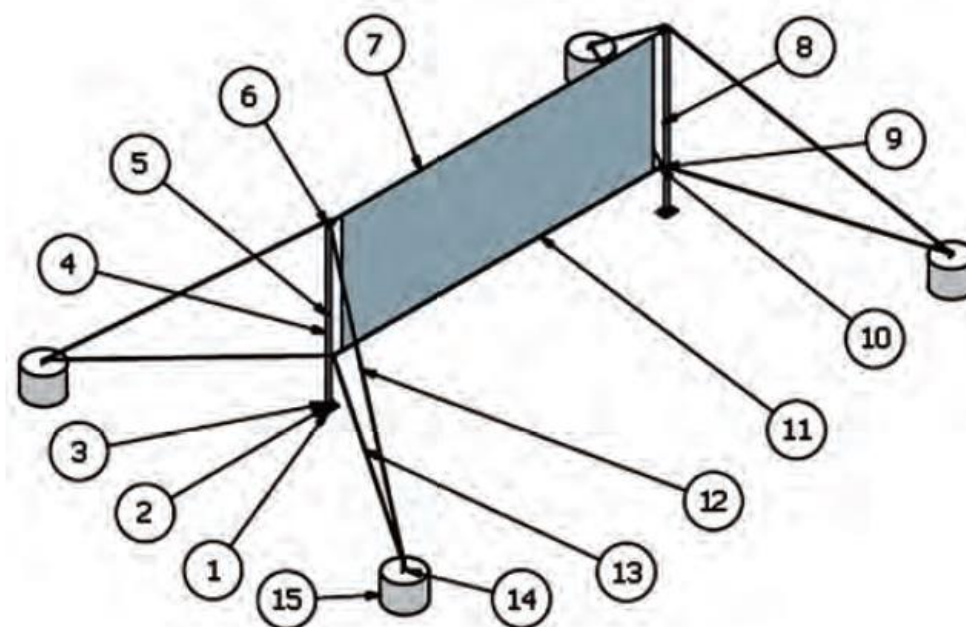
Figura 5. Estructura de la propuesta de un atrapanieblas – Vista frontal.



La Figura 6 muestra la vista superior del diseño propuesto para la estructura de una malla de atrapanieblas bidireccional. Se aprecia la disposición de los cuatro anclajes, separados horizontalmente por 13,30 metros y verticalmente por 10 metros. Cada anclaje está construido de hormigón y tiene un volumen de un metro cúbico. Para brindar estabilidad a la estructura, cada poste está conectado a dos anclajes mediante cables o cuerdas tensoras de acero, como se observa en la imagen.

Figura 6. Estructura de la propuesta de un atrapanieblas – Vista superior.

En total, la estructura está compuesta por 15 piezas, como se observa en la Figura 7, cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 25.

Figura 7. Piezas que componen un atrapanieblas

Tomado de [19].

Tabla 25. Descripción de las piezas y unidades requeridas.

Nº	Pieza	Cantidad
1	Soporte inferior rótula	2
2	Soporte superior rótula	2
3	Placa para enganche superior poste	2
4	Poste	4
5	Espiga de unión de poste	2
6	Placa para enganche superior poste	2
7	Cable horizontal superior	1
8	Cable vertical	2
9	Placa de sujeción de malla	2
10	Cable horizontal inferior	1
11	Malla raschel central	1
12	Cable enganche superior	4
13	Cable enganche inferior	4
14	Barra anclaje	4
15	Hormigón anclaje	4

Tomado de [19].

Una vez seleccionada la ubicación para instalar el atrapanieblas, se debe despejar una superficie de 14,3 metros por 11 metros, en los cuatro extremos van los sistemas de anclaje al suelo y en la línea central se ubican los puntos de apoyo de los postes, como lo muestra en la Figura 6. La orientación de la estructura debe ser perpendicular en su máxima longitud a la dirección del viento húmedo predominante para maximizar la eficiencia de captura [19]. Se consideran varias etapas para realizar el montaje de un atrapanieblas:

- Sistemas de anclajes: corresponde a cuatro estructuras de hormigón situadas en los extremos del rectángulo con un volumen de 1 m^3 excavado en el suelo, de los que sobresalen anclas metálicas que se conectaran las cuerdas tensoras [19].
- Puntos de apoyo de postes: corresponde a las bases de hormigón donde se empotran las placas de soporte de la rótula, las cuales tienen un volumen de $0,3 \text{ m}^3$ cada una, y están ubicadas en la base de los postes del atrapanieblas [19].
- Mástil o postes: son dos unidades que corresponden a tubos galvanizados de cinco pulgadas de diámetro por recomendación. En sus extremos, se acoplan las placas de enganche superior e inferior, y el último se apoya en la placa que soporta la rótula [19].
- Cuerdas tensoras: corresponden a los cables de acero que se emplean para asegurar los postes a los cuatro puntos de anclaje y también entre los postes, formando un rectángulo que permite mantener una estructura semi rígida, para la posterior instalación de la malla, pero lo suficientemente flexible para moverse frente a fuertes ráfagas de viento [19].
- Armado e izamiento de mallas: este procedimiento se realiza una vez las mallas estén unidas entre sí a los soportes de cable de acero. Esta nueva estructura se monta en los pilares y se eleva por ambos postes hasta alcanzar la altura deseada. Luego se aseguran las

cuerdas tensoras en los mástiles y finalmente en la base del rectángulo con broches de mayor resistencia [19].

- Postura de canaleta receptora: después de instalar la estructura de la malla en la base, se dispone una canaleta flexible que se orienta de manera paralela a la malla para recibir el agua capturada. Es esencial que esta canaleta tenga una pendiente mínima del 2% para facilitar el desplazamiento del agua mediante una tubería que la lleva hasta los tanques de acumulación [19].

5. Conclusiones

El presente proyecto, describe el análisis de la viabilidad técnica de un sistema de captación de agua a partir de mallas atrapanieblas en la zona rural del municipio de Los Santos, Santander. La propuesta del sistema ofrece un diseño tradicional bidimensional, que ha sido elegido con el fin de facilitarle a la comunidad adquirir esta tecnología, debido a que es económica y de fácil funcionamiento.

El análisis de las condiciones climáticas indica que la mayor captación de agua se produce en dos trimestres específicos: el primero comprende los meses de diciembre, enero y febrero, mientras que el segundo trimestre abarca junio, julio y agosto. Estos períodos son caracterizados por condiciones ambientales y atmosféricas favorables, con mayores velocidades de viento, humedades relativas más altas y temperaturas más bajas.

Se estudio la demanda hídrica del municipio, teniendo en cuenta las actividades económicas principales, que corresponden al sector primario. Para este análisis, se consideró el uso doméstico, agrícola y pecuario, con una demanda hídrica estimada de 1.692,1 m³/día, 14.618,8 m³/día y 1.117,4 m³/día respectivamente, sumando un total de 17.428,3 m³/día.

Es importante destacar que el diseño ofrece una propuesta de dimensiones y materiales para la construcción e implementación de esta tecnología, si bien podría no considerarse como una propuesta definitiva, debido a que se puede ajustar de acuerdo con preferencias y necesidades específicas. Esto implica la posibilidad de cambiar algún material, así como aumentar o disminuir alguna medida en la malla de captación. Además, dado que se basa en condiciones óptimas e ideales, es posible que los resultados varíen debido a cambios con las condiciones ambientales o intervenciones humanas durante el proceso de captación.

La propuesta incluye el uso de una malla raschel como medio de captación, el cual presenta unas medidas específicas de 8 metros de largo por 2,5 metros de alto, generando una superficie de captura de 20 metros cuadrados por unidad de atrapanieblas. En total, se contempla la instalación de 3018 unidades de atrapanieblas, correspondientes al número de viviendas rurales presentes en el municipio. Se estima que el agua recolectada puede satisfacer entre un 13,97% y un 31,84% de la demanda hídrica de uso pecuario, dado que este sector requiere menos agua y, por lo tanto, puede ser abastecido en mayor medida.

Referencias

- [1] Alcandía de Los Santos (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Los Santos, Santander*. Disponible:
<https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/23547/28009-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] Alcaldía Municipal de Los Santos (2023). *Información del municipio*. Disponible:
<https://www.lossantos-santander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- [3] Alcaldía de Los Santos (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Los Santos, Santander*”, documento diagnostico – componente económico. Disponible:
https://www.academia.edu/15567449/ESQUEMA_DE_ORDENAMIENTO_TERRITORIAL_MUNICIPIO_DE_LOS_SANTOS_SANTANDER
- [4] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2019), *Guía: Balance Oferta-Demanda de agua*. Disponible: <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2019-10/GU.0130.07%20V02%2020191007%20Balance%20oferta-demanda%20de%20agua.pdf>
- [5] Corporación Autónoma Regional de Nariño (2016), *Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico Quebrada Miraflores*. Disponible:
<https://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp3.pdf>
- [6] Ortega, O. (2019). *Estudio de los Requerimientos Hídricos del Cultivo de Tabaco Burley en el Municipio de Ovejas, Sucre*. Universidad Nacional de Colombia. Disponible:
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77370>

- [7] González, R., Montero, L., Duarte, C. (2009) *Respuesta de la habichuela al déficit hídrico controlado en condiciones de organopónico bajo cubierta protectora*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 18, núm. 4, 2009, pp. 54-58. Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez. La Habana, Cuba. Disponible:
<https://www.redalyc.org/pdf/932/93212367011.pdf>
- [8] Instituto Colombiano Agropecuario (2023). *Censo Pecuario Nacional*. Disponible:
<https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- [9] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2023). Demanda y uso.
- [10] Márquez, J (1993). *Atrapanieblas: una tecnología para la reforestación de las lomas costeras de Perú*. Revista Ingeniería Industrial, núm. 4, 1993, pp. 88-98.
- [11] Hidalgo, D (2016). *Captación de agua por medio de la técnica de atrapanieblas en las comunidades campesinas de Galte, Cantón Guamote, Provincia de Chimborazo, Ecuador*. Universidad de Las Fuerzas Armadas.
- [12] De la Cal, J (2003). *Pescar agua de la bruma*. Revista: Magazine, núm. 180, 2003. Disponible: <https://www.elmundo.es/magazine/2003/180/1047057668.html>
- [13] Huertas, J, Molina P (2016). *Estudio de prefactibilidad para la posible implementación de atrapanieblas en el municipio de Ráquira*. Tesis. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C. Disponible:
[https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3976/MolinaTorresPaulaAndre a2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3976/MolinaTorresPaulaAndre%20a2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [14] Mora, T (2020). *Análisis de viabilidad para la implantación de mallas atrapanieblas en la vereda San Antonio Bajo en el municipio de Arbeláez, Cundinamarca*. Tesis. Universidad

- Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C. Disponible:
<http://hdl.handle.net/11349/24305>
- [15] Cortés-Pérez, F.; Roa-Casas, O.M.; Villate-Suarez, C.A.; Hernández-Velandia, D.R.; Moreno-Mancilla, F.; Hernández- Pineda, L.L. 2023. *Captadores de niebla y recolección de agua en un ecosistema de páramo colombiano*. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica 26(1): e1994. Disponible:
<http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1994>
- [16] Amaya-Corredor, C., Hernández-Contreras, C., Vargas-Buitrago, A., Osorio-Tristancho, S., Duran-Ayala, S., Cala-Almeida, K (2020). *Propuesta de un sistema de “Atrapanieblas” como fuente de agua no convencional en la vereda La Fuente, municipio de Los Santos, departamento de Santander*. Unidades Tecnológicas de Santander.
- [17] Albornoz-Figueroa, F & Torres-Rojas, G (2019). *Determinación potencial de captación de agua de atrapanieblas como fuente alternativa de recursos hídricos para el desarrollo agrícola en un ecosistema con características árido-desérticas en la región Arica y Parinacota*. Tesis. Universidad de Tarapacá. Chile.
- [18] Guaman-Condolo, F (2021). *Eficiencia meteorológica, económica y ambiental de neblinómetros sintéticos y orgánicos en la cosecha de agua aplicados en La Loma de Ramos perteneciente a la comuna Pichikra de la parroquia San Lucas, cantón y provincia de Loja*. Tesis. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador.
- [19] Tapia C., Francisco, Meza A., Francisco, Hernández P., Pedro, Alfaro P., Rubén y Muñoz M., Carlos (2019) *Estrategia de riego para mitigar el estrés hídrico en olivos cultivados en Taltal, Desierto de Atacama*. La Serena: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 392. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6794>

- [20] Imteaz Monzur, Alam; Al- Hassan, Ghassan; Shanableh, Abdallah; Naser, Jamal (2011). Development of a mathematical model for the quantification of fog-collection resources. Revista. Conservation and Recycling.
- [21] San Román, F. J. S. (1993). *Hidrología e Hidrogeología*. Colombia. Universidad de Salamanca. Departamento de Geología. 1, 120-134. Disponible en:
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32270616/Hidrologia_e_Hidrogeologia_%28Libro%29.pdf20131109-9534-tueefr-libre-libre.pdf?1384008850=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DHidrologia_e_Hidrogeologia_Libro.pdf&Expires=1708121145&Signature=ekqRSLPJg3kJevSOgJKFB~9o-fSBYnC1ECAvdp5ZnrMFGatJ~XF6qbVeuGs0q71VPumyV31Qp7~bSg-NQwjzHhbuVstERYcdLrgAjFgLHNub3bDVfb7gixZrfeJiNpxQ2N~j9oe5fD-Un-rySiIJmaAhWmCLRMsKKIDkzLPsD5exYv5~aTxUGIXoVRJJlh-E20Uxx9H5SsFrX1gfHtV~Xfe5AIPzChhN1NabjEkwsYTf9-cXrlZuyXO4z4u2tuwJUrrLL6nkJE1Y6mPcLry9~ST1h2s5iN2U6YiFXGEezTW8U3I28gsYCpcEkC0p7yLDdKwaL2OtpAQ7v9Z-cnm4QQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [22] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico*.