



## **Diseño y valoración económica de una PTAP portátil alimentada con energía solar**

Omer Morante-Hernández<sup>1</sup>, Jorgelina Pasqualino<sup>1</sup>, Jesús Turizo-Dávila<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Bolívar. Km 1 Vía Turbaco, Colombia

[\\*Autor de correspondencia: omermoranteh@gmail.com](mailto:omermoranteh@gmail.com)

Recibido 16 de agosto de 2020; aceptado 29 de septiembre de 2020

### **RESUMEN**

Los habitantes de una comunidad ubicada a orillas del Canal del Dique, en la región Caribe de Colombia, han sido desplazados por la violencia y afectados por el invierno en varias ocasiones. Actualmente, cuentan con diversas problemáticas que afectan su calidad de vida, entre ellas la falta de agua potable, la cual los ha llevado a captar directamente el agua del canal, en el cual también se arrojan desechos de todo tipo, para luego, consumirla después de un tratamiento mínimo. El acceso a agua de mala calidad influye negativamente en la salud, la seguridad alimenticia, los medios de subsistencia y las oportunidades de educación para las familias en situación de vulnerabilidad en todo el mundo.

Debido a lo anterior, es evidente la necesidad de ejecutar proyectos encaminados a la mejora de la calidad del agua principalmente en la zona rural, minimizando así los riesgos a la salud pública. Dichos proyectos deben considerar las limitaciones geográficas, hidrológicas, disponibilidad de mano de obra y servicios, vías de acceso, además del nivel cultural y socioeconómico de la población (Resolución 0330, 2017). El presente proyecto propone una alternativa viable de potabilización de agua, la cual es compacta, portátil y utiliza energía solar como la fuente de generación eléctrica que requiere el sistema. Adicionalmente, se realizó la valoración económica del recurso hídrico para fijar una

tarifa que permita garantizar la sostenibilidad del proyecto y a la vez crear conciencia sobre la importancia del agua para el medio ambiente y el bienestar de las comunidades.

**PALABRAS CLAVE:** Potabilización, Energía solar fotovoltaica, Valoración contingente, Calidad del agua.

### **ABSTRACT**

The inhabitants of a community located on the banks of the Canal del Dique, in the Caribbean region of Colombia, have been displaced by violence and affected by winter on several occasions. Currently, they have various problems that affect their quality of life, including the lack of drinking water, which has led them to directly capture the water from the canal, where waste of all kinds is also thrown, and then consume it after a minimal treatment. Access to poor quality water negatively impacts health, food security, livelihoods, and educational opportunities for vulnerable families around the world.

Due to the above, the need to carry out projects aimed at improving water quality, mainly in rural areas, is evident, thus minimizing risks to public health. These projects must consider the geographical and hydrological limitations, availability of labor and services, access routes, as well as the cultural and socioeconomic level of the population (Resolution 0330, 2017). This project proposes a viable alternative for water purification, which is compact, portable and uses solar energy as the source of electricity generation required by the system. Additionally, the economic valuation of the water resource was carried out to estimate a fare that allows guaranteeing the sustainability of the project and at the same time creating awareness about the importance of water for the environment and the well-being of the communities.

**KEY WORDS:** Purification, Photovoltaic solar energy, Contingent valuation.

## **INTRODUCCIÓN**

El acceso al agua potable se considera un derecho, el cual está vinculado con otros como la vida, la dignidad humana y la salud. Sin embargo, de acuerdo a cifras de la ONU (2015), 663 millones de personas en el mundo todavía carecen de dicho acceso, de los cuales más de 180 millones se encuentran en los países afectados por la violencia e inestabilidad. Además, la OMS & UNICEF (2017), reportaron que en el año 2015, 2100 millones de personas en el mundo carecían de agua potable en el hogar, de los cuales 263 millones dedicaban más de 30 minutos al día en ir a buscar agua, 159 millones bebían agua de fuentes de agua superficiales y 844 millones no disponían de servicios básicos de suministro de agua para consumo. Una de las comunidades dentro de esta cifra se encuentra ubicada a orillas del Canal del Dique, en el Departamento de Bolívar (Colombia), la cual está habitada por indígenas zenúes y afrocolombianos desplazados de diferentes departamentos del país.

El canal del Dique es una bifurcación artificial del río Magdalena donde los habitantes captan el agua para uso doméstico y la consumen luego de un tratamiento mínimo. Este cuerpo de agua representa una fuente

significativa para el abastecimiento del recurso hídrico en la comunidad, pero que representa al mismo tiempo, un riesgo a inundaciones. Las afectaciones más alarmantes se presentaron con el fenómeno de la niña en 2010 y 2011, obligando a las familias a desalojar sus casas y refugiarse a orillas de la carretera durante días.

Ante la imperante necesidad de acceder al agua potable, es necesario proponer diferentes alternativas de potabilización que sean simples, replicables y económicamente viables (Alvarado, P. 2013). El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una Planta de Tratamiento de Agua Potable – PTAP que tenga en cuenta los criterios técnicos, ambientales, socioculturales y económicos, según lo establecido en la Resolución 0330 del 2017.

Dado el deficiente acceso a la energía eléctrica en la comunidad, el proyecto pretende utilizar energía solar como fuente de generación eléctrica, aprovechando los altos niveles de radiación solar en la Costa Caribe. Por último, se valorará económicamente el agua luego de su mejora, utilizando el Método de Valoración Contingente (MVC) para calcular la DAP (disponibilidad a pagar) de los habitantes y analizar la importancia que este recurso tiene en el bienestar de la comunidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación es de tipo descriptiva y se desarrolló con base en información primaria y secundaria, teniendo en cuenta el Reglamento Técnico para Saneamiento y Agua Potable - RAS y el comportamiento de parámetros físico-químicos y microbiológicos para proponer una alternativa viable de potabilización. Posteriormente, se dimensionó el sistema fotovoltaico y se valoró económicamente la PTAP. La metodología fue llevada a cabo en un período de seis meses (enero-junio del 2019), de acuerdo con las siguientes etapas:

1. Selección del área de estudio y puntos de muestreo.

La investigación se desarrolló en una comunidad en la región caribe de Colombia, que como se observa en la Figura 1, se encuentra asentado a orillas del canal de Dique. Como fase inicial, se seleccionaron nueve puntos de muestreo para analizar las características físicas, químicas y microbiológicas del agua. El punto 1 corresponde al sitio de captación de agua cruda y los demás puntos de muestreo fueron tomados en viviendas.



**Figura 1.** Vista satelital comunidad ( $10^{\circ} 9'46.56''$ ,  $75^{\circ}17'48.28''$ ) y puntos de muestreo

**Fuente:** Modificado de Google Earth

2. Diagnóstico de la calidad del agua.

En la Tabla 1 se presentan los métodos usados en el diagnóstico de la calidad del agua:

**Tabla 1.** Métodos utilizados para el diagnóstico de la calidad del agua

Parámetro	Método
pH	Sonda multiparamétrica
Turbiedad (UNT)	Nefelométrico
OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Sonda multiparamétrica
Conductividad (μS/cm)	Sonda multiparamétrica
SD (ppm)	Sonda multiparamétrica
Salinidad (PSU)	Sonda multiparamétrica
CO <sub>2</sub> (mg/L)	Volumétrico
NO <sub>3</sub> (mg/L)	Colorimétrico
NO <sub>2</sub> (mg/L)	Colorimétrico
PO <sub>4</sub> (mg/L)	Colorimétrico
Alcalinidad total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Volumétrico
Amonio (mg/L)	Colorimétrico
C. totales (NMP/100mL)	Tubos múltiples
C. fecales (NMP/100mL)	Tubos múltiples

**Fuente:** autores

### 3. Alternativa propuesta de potabilización.

De acuerdo a información obtenida por las diferentes pruebas de laboratorio realizadas a las muestras de agua tomadas directamente del canal del Dique, se eligieron los procesos y operaciones unitarias más adecuadas para tratar el agua.

### 4. Diseño del sistema de potabilización.

Para el dimensionamiento de las diferentes estructuras hidráulicas, fue fundamental considerar las especificaciones técnicas que establecen la Resolución 0330 del 2017 y otros autores como Romero (1999) y Mackenzie & Cornwell (2012).

#### 4.1 Dosis óptima de coagulante:

Se realizó el Test de Jarras de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 3903 para hallar la dosis óptima de coagulante y las condiciones de mezclado.

#### 4.2 Diseño del sistema de coagulación o mezcla rápida:

Para la primera operación unitaria, se escogió la unidad hidráulica de *Vertedero Rectangular de Lámina Delgada sin Contracciones*. Para ello es necesario el dimensionamiento del canal de

acceso, y verificar que el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y el Gradiente de Mezcla Rápida (G) estén entre los rangos establecidos por la Res. 0330 del 2017, de igual forma que el número adimensional de Froude se encuentre entre 4,5 y 9.

#### 4.3 Diseño de sistema de floculación o mezcla lenta:

Para la segunda unidad de tratamiento, se escogió el *Floculador Hidráulico de Flujo Horizontal*, para el cual se deben determinar todas las dimensiones, las pérdidas de energía hidráulica, además, verificar los valores del TRH y el G según la Res. 330 del 2017 y las recomendaciones de Arboleda (1974) para las velocidades de flujo.

#### 4.4 Diseño del sistema de sedimentación:

Para la tercera operación de tratamiento, se escogió un *Sedimentador de Alta Tasa de Módulos Angostos*, para el cual se deben dimensionar cuatro zonas: zona de entrada, zona de sedimentación, zona de lodos y zona de salida.

#### 4.5 Diseño del sistema de filtración:

Para la cuarta unidad de tratamiento, se escogió el *Filtro Rápido de Arena de flujo Descendente*. Para el cual se asume un valor de Carga superficial (SLR). Con el valor del SLR, se calcula el área superficial ( $A_s$ ), asumiendo medidas cuadradas, debido a que Romero (1999), sugiere

que se obtienen mayores porcentajes de remoción de turbiedad en filtros de dimensiones cuadradas.

#### 4.6 Dosis óptima de cloro:

Se seleccionó el método de cloración como el indicado para realizar el proceso de desinfección en la alternativa propuesta, teniendo en cuenta que el cloro es de los desinfectantes más utilizados debido a su bajo costo, eficiencia, fácil aplicación y la formación de un cloro residual libre si se aplica la dosis suficiente. Este residual protege el agua de la re-contaminación en su paso por tuberías o almacenamiento.

Para determinar la dosis de desinfección apropiada, se realizó la curva de demanda de cloro a partir del ensayo de laboratorio “breakpoint” o punto de quiebre (WEF-ASCE, 1992). Para las mediciones de Cloro, se hizo uso del instrumento POCKET Colorimeter II.

El tipo de desinfectante utilizado para la prueba fue el Hipoclorito de sodio (NaClO) con una concentración del 4,5%.

#### 5. Diseño del sistema fotovoltaico:

El bombeo solar fotovoltaico hace referencia al uso del sol para generar la energía eléctrica requerida por equipos cuya finalidad sea extraer recursos hídricos

(Mogrovejo y Quizhpe, 2007). Los componentes principales que lo constituyen son: un arreglo de paneles solares que permiten transformar la radiación solar en energía eléctrica, un controlador, una bomba (superficial o sumergible) y un tanque de almacenamiento, del cual posteriormente se distribuye el agua a sus usos (Rochín et al., 2000).

La información necesaria para realizar el cálculo de bombeo solar directo es la siguiente:

- Caudal diario (m<sup>3</sup>/día).
- Altura total de bombeo (altura manométrica) en metros.
- Ubicación del proyecto.

La altura total de bombeo o altura dinámica total se obtiene al sumar la carga estática (distancia vertical) y la carga dinámica. Para el cálculo de esta última, se utilizó la ecuación de Hazen- Williams:

$$h_f = 10,67 * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} * \frac{L}{D^{4,87}}$$

Donde  $h_f$  corresponde a la pérdida de carga por fricción o carga dinámica (m), Q es el caudal (m<sup>3</sup> /s), C es el coeficiente adimensional de rugosidad, L es la longitud de la tubería (m) y D es el diámetro interno de la tubería (m).

Después de conocer el caudal a suministrar y la altura dinámica total, se consultan las Horas Solar Pico disponibles (kWh/m<sup>2</sup>) en el mapa de radiación solar de Colombia, luego se procede a calcular el caudal horario (Qh) y la demanda energética total del sistema para determinar el número de paneles requeridos. Para realizar el cálculo, se utilizaron paneles policristalinos de 330W de potencia nominal.

6. Valoración económica:  
Según las metodologías para la valoración económica de bienes, servicios ambientales y recursos naturales presentados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en diciembre de 2003, el Método de Valoración Contingente (MVC) es el método más popular para estimar los beneficios derivados de los bienes y servicios no mercadeables. En el MVC se utiliza una encuesta como instrumento para la simulación de un mercado hipotético de demanda y oferta (Farré, 2003).

Para el presente caso de estudio, se utilizó el Método de Valoración Contingente Referéndum (MVCR), en el que se usa una variable dependiente binaria que toma valores de cero o uno; siendo uno la respuesta positiva y cero la respuesta negativa a pagar por un valor previamente fijado al encuestado.

Por último, se utilizó un modelo econométrico para analizar el comportamiento de diferentes variables obtenidas en la encuesta frente a la DAP, para realizar esto, se tomaron tres variables (sexo, etnia e ingresos) y se analizaron mediante la prueba de  $\chi^2$  de Pearson.

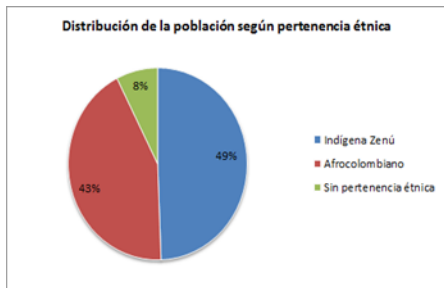
Para la prueba Chi Cuadrado ( $\chi^2$ ) de Pearson, se escogió un margen de error de 0,05 y las hipótesis se definieron de la siguiente manera:

- Ho: No influye la variable en la DAP
- Hi: Sí influye la variable en la DAP

## RESULTADOS

Inicialmente, se presenta el diagnóstico de la población luego de las visitas a campo y la aplicación de las encuestas.

7. Diagnóstico de la población  
De acuerdo a unas encuestas socioeconómicas realizadas el 18 de mayo de 2019 a toda la comunidad, fue posible obtener los porcentajes de distribución según pertenencia étnica (Figura 2). Los habitantes de la comunidad son en su mayoría (49%) indígenas pertenecientes a la etnia Zenú, además, también hay una presencia significativa de afrocolombianos (43%).



**Figura 2.** Distribución de la población según pertenencia étnica

**Fuente:** autores

Igualmente, se obtuvo la distribución de la población por sexo, edad y nivel de escolaridad de los miembros de la comunidad. La proporción entre hombres y mujeres de la comunidad es equivalente, y la gran parte de la población (53%) se encuentra entre los 18 y 59 años de edad. En cuanto al nivel de escolaridad, el 21% de la población reportó no haber completado ningún grado escolar mientras que el 29% se encuentra estudiando actualmente, además, sólo el 3% de la población ha logrado acceder a la educación superior. Con respecto al componente económico, las encuestas permitieron obtener el promedio de ingresos mensuales por familia, encontrándose que el 43% obtiene en promedio menos de 70 USD para sus gastos mensuales y que sólo el 9% recibe más de un salario mínimo. Además, mediante información obtenida por observación, se determinó que los materiales que

predominan en la construcción de las viviendas son: madera para las paredes (51%), tejas de zinc para el techo (96%) y cemento para el piso (56%).

Entre otros aspectos se encuentra que la comunidad no cuenta con conexión a los servicios básicos de acueducto, alcantarillado y gas. De igual modo, la cobertura de señal de telefonía es baja y no se tiene acceso a internet. En cuanto al servicio de electricidad, la comunidad tiene acceso por medio de conexiones irregulares, lo cual representa un riesgo para los habitantes. Esto evidencia la necesidad de utilizar energías alternativas, como la solar, para generar la energía eléctrica que se requiera.

Teniendo en cuenta que la comunidad no cuenta con una red de distribución de agua, se eligió una pila pública de suministro que se encuentre en una ubicación estratégica lo más cercana posible a los beneficiarios (ver Figura 3).



**Figura 3.** Alternativa de ubicación de la PTAP

**Fuente:** Modificado de Google Earth

## 8. Diagnóstico de la calidad del agua



Como se muestra en la Figura 4, el agua captada directamente desde el canal del Dique presenta alta turbiedad. El único tratamiento que los habitantes de la comunidad realizan, es la adición del coagulante Sulfato de Aluminio tipo B (alumbre), sin conocer la dosis adecuada. El alumbre es luego mezclado con el agua de forma manual.



**Figura 4.** Agua captada del Canal del Dique

**Fuente:** autores

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de agua tomadas en la comunidad, se encuentran en la Tabla 2.



**Figura 5.** Medición en campo con HI 98194

**Fuente:** autores

2115. Muestra 1: Agua de la fuente. Muestras adicionales: Agua tratada en viviendas.

Muestra	Parámetro	Resultado	Res. 2115
1	pH	7,29	Cumple
	Turbiedad (UNT)	356	No cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	3,22	*
	Conductividad (μS/cm)	141	Cumple
	SD (ppm)	70	*
	Salinidad (PSU)	0,06	*
	CO <sub>2</sub> (mg/L)	9,8	*
	NO <sub>3</sub> (mg/L)	44,3	No cumple
	NO <sub>2</sub> (mg/L)	0	Cumple
	PO <sub>4</sub> (mg/L)	<1	Cumple
	A. total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	80	Cumple
	Amonio (mg/L)	2	*
	C. totales (NMP/100mL)	2300	No cumple
	C. fecales (NMP/100mL)	780	No cumple
2	pH	6,56	Cumple
	Turbiedad (UNT)	2,54	No cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	2,3	*
	Conductividad (μS/cm)	180	Cumple
	SD (ppm)	90	*
	Salinidad (PSU)	0,08	*
	CO <sub>2</sub> (mg/L)	13,4	*
	NO <sub>3</sub> (mg/L)	0	Cumple
	NO <sub>2</sub> (mg/L)	0	Cumple
	PO <sub>4</sub> (mg/L)	>5	No cumple
	A. total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	50	Cumple
	Amonio (mg/L)	1,5	*
	C. totales (NMP/100mL)	61	No cumple
	C. fecales (NMP/100mL)	61	No cumple
3	pH	7,03	Cumple
	Turbiedad (UNT)	2,83	No cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	2,97	*
	Conductividad (μS/cm)	192	Cumple
	SD (ppm)	96	*
	Salinidad (PSU)	0,09	*
4	pH	5,79	Cumple
	Turbiedad (UNT)	3,13	No cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	3,79	*
	Conductividad (μS/cm)	178	*
5	SD (ppm)	89	*
	Salinidad (PSU)	0,08	*
	pH	7,08	Cumple
	Turbiedad (UNT)	1,05	Cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	2,22	*
	Conductividad (μS/cm)	176	Cumple
	SD (ppm)	88	*
	Salinidad (PSU)	0,08	*
	CO <sub>2</sub> (mg/L)	9,3	*
	NO <sub>3</sub> (mg/L)	0	Cumple
NO <sub>2</sub> (mg/L)	0	Cumple	
PO <sub>4</sub> (mg/L)	2	No cumple	
A. total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	95	Cumple	

**Tabla 2.** Resultados comparados con Resolución

	Amonio (mg/L)	1,5	*
6	pH	5,46	No cumple
	Turbiedad (UNT)	4,14	No cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	2,81	*
	Conductividad (μS/cm)	177	Cumple
	SD (ppm)	89	*
	Salinidad (PSU)	0,08	*
7	pH	5,43	No cumple
	Turbiedad (UNT)	1,78	Cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	1,48	*
	Conductividad (μS/cm)	208	Cumple
	SD (ppm)	104	*
	Salinidad (PSU)	0,1	*
8	pH	6,6	Cumple
	Turbiedad (UNT)	72,9	No cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	2,69	
	Conductividad (μS/cm)	167	Cumple
	SD (ppm)	84	*
	Salinidad (PSU)	0,08	*
	CO <sub>2</sub> (mg/L)	6,8	*
	NO <sub>3</sub> (mg/L)	0	Cumple
	NO <sub>2</sub> (mg/L)	0	Cumple
	PO <sub>4</sub> (mg/L)	1	No cumple
	A. total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	80	Cumple
	Amonio (mg/L)	1,5	*
	C. totales (NMP/100mL)	170	No cumple
C. fecales (NMP/100mL)	170	No cumple	
9	pH	6,24	Cumple
	Turbiedad (UNT)	4,16	No cumple
	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	3,73	*
	Conductividad (μS/cm)	176	Cumple
	SD (ppm)	88	*
	Salinidad (PSU)	0,08	*

**Fuente:** autores

Al comparar los resultados de laboratorio con la legislación colombiana (Tabla 2), es posible afirmar que los habitantes de la comunidad están consumiendo agua de mala calidad, debido, principalmente, a la turbiedad y la presencia de coliformes fecales y totales. La adición de alumbre mejoró notablemente la turbiedad del agua en las viviendas, sin embargo, en algunas la dosis no fue

suficiente para no sobrepasar el límite permisible que indica la normatividad. También se evidenciaron concentraciones de fosfato (PO<sub>4</sub>) en las muestras tomadas en las viviendas, las cuales no cumplen con la normatividad.

Con respecto a los coliformes fecales (que indican contaminación por materia fecal), se nota que, luego de haberle añadido el alumbre, se logró una reducción considerable de coliformes, aunque no se garantiza la eliminación completa de los mismos. El alumbre, por sí solo, no es un desinfectante; sin embargo, ayuda a disminuir las partículas (especialmente las coloides) en el agua, en las cuales algunos microorganismos (entre esos los coliformes) están adheridos debido a su menor tamaño. Estos resultados iniciales corroboran la necesidad de proponer alternativas de potabilización que permitan convertirla en apta para su consumo.

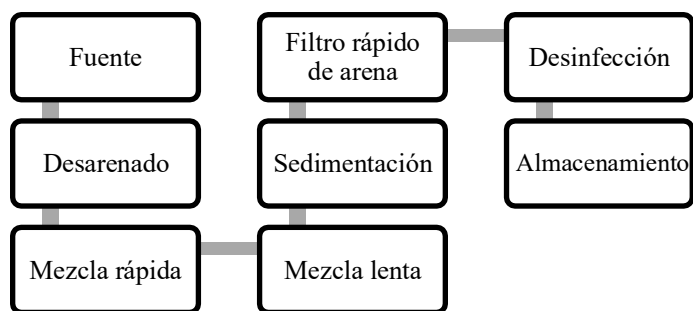
En la encuesta realizada el día 18 de mayo de 2019, se preguntó a 67 personas cabezas de familia, su percepción sobre la calidad del agua que consumen. El 58% de las personas encuestadas no cree que el agua que toman es de buena calidad, debido a que se han presentado vómitos y eventos diarreicos agudos atribuidos al consumo de agua y el 42% restante considera que sí lo es, porque, a muchas

personas de la comunidad no les hace daño, pues piensan que sus organismos se han adaptado a las condiciones medioambientales, por otro lado, comentan que cada vez que llega un visitante y la consume, le produce malestares estomacales.

Por otro lado, el 100% de la comunidad se mostró interesada en aportar sus habilidades y conocimientos en caso de la implementación de algún proyecto relacionado con el mejoramiento de la calidad del líquido.

#### 9. Alternativa propuesta de potabilización del agua

A continuación, se presenta un diagrama con la alternativa de potabilización que se propone para el caso de estudio:

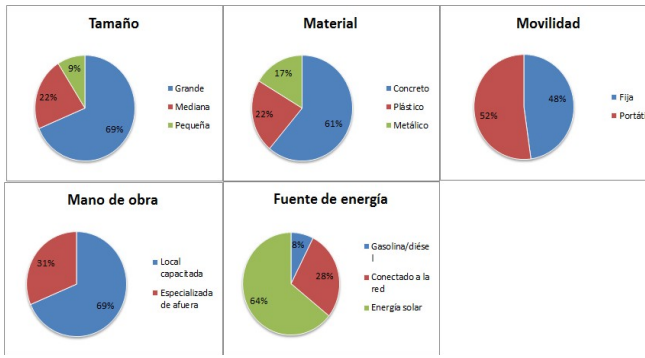


**Figura 6.** Tren de tratamiento propuesto  
Fuente: autores

Adicionalmente, la planta de tratamiento de agua potable debe cumplir con las siguientes características propuestas:

- Costos bajos de construcción, operación y mantenimiento en comparación con las alternativas convencionales
- Fácil operación y mantenimiento
- Portátil, modular y compacta
- Uso de energía solar fotovoltaica para producir la electricidad que requieren los equipos para su funcionamiento
- Generación de empleo a nivel local con el operario que se encargará del funcionamiento y mantenimiento de la planta

Para definir lo anterior, se tuvo en cuenta tanto el estudio de la localización del proyecto que establece la Res. 0330 de 2017, así como la opinión de los habitantes sobre cómo ellos imaginan una planta de potabilización para su comunidad. En la Figura 7, se muestra que para solucionar el acceso a agua potable, la comunidad considera que es necesaria una planta de tratamiento de gran tamaño, construida en concreto, que sea portátil, genere mano de obra local y funcione con energía solar. Sin embargo, para lograr que sea portátil, se propone un sistema compacto que pueda ocupar el espacio de un contenedor metálico de 20 pies de largo, 8 pies de ancho y 8 pies con 6 pulgadas de alto.



**Figura 7.** Características de la planta pensada por la comunidad

Fuente: autores

## 10. Dimensionamiento y diseño del sistema

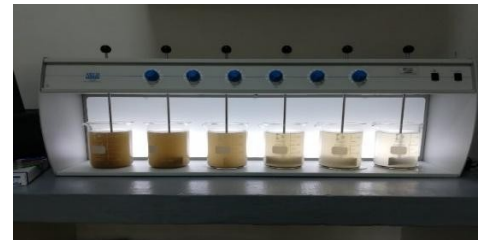
De acuerdo a información obtenida por las diferentes pruebas de laboratorio realizadas a muestras de agua tomadas directamente del canal del Dique, se eligieron los diferentes procesos y operaciones unitarias para tratar el agua.

### 10.1 Selección del caudal de diseño

Se tomó como base una población de 253 personas y un consumo diario de agua por cada persona de 70 L/hab\*día, este consumo se definió considerando la dotación neta máxima que dicta el RAS (140 L/hab\*día), sin embargo, se optó por tomar la mitad de este valor debido a que la comunidad no cuenta con alcantarillado. Lo anterior permitió establecer un caudal de diseño de 17,71 m<sup>3</sup>/día equivalentes a 3,54 m<sup>3</sup>/h, considerando que la planta funcionará durante el día,

aprovechando las 5 horas pico solar en la zona. Cabe agregar que este caudal definido (17,7 m<sup>3</sup>/día) es superior al obtenido en las encuestas realizadas a los habitantes (9,86 m<sup>3</sup>/día).

### 10.2 Test de jarras:



**Figura 8.** Test de Jarras

Fuente: autores

Como se muestra en la Tabla 3, el volumen óptimo de dosificación fue 8 mL, la concentración del coagulante es 10 mg/mL y el volumen de agua cruda tomada para cada jarra fue de 0,9 L. Aplicando la fórmula de dosis óptima de coagulación, se obtuvo como resultado 90 mg/L de sulfato de aluminio tipo B (coagulante).

**Tabla 3.** Valores de dosis y turbiedad

Nº Beaker	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Volumen añadido (mL)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4,5	6	8	10
Dosis (mg/L)	6	11	17	22	28	33	50	67	90	111
Turbidez (NTU)	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510

Turbidez f. (NTU)	398	371	312	194	165	89	41	4,17	2,13	2,29
Remoción (%)	22	27,3	38,8	62,	67,6	82,5	92	99,2	99,6	99,6

Fuente: autores

Es importante aclarar, que la dosis óptima del coagulante varía dependiendo de la composición del agua cruda, por esta razón, se requiere realizar ensayos de jarras periódicos que permitan determinar la dosis óptima de coagulante y así realizar un proceso de coagulación eficaz.

### 10.3 Diseño del vertedero rectangular de lámina delgada sin contracciones

Para la primera unidad hidráulica, se obtuvieron las medidas y valores que se muestran en la Figura 9. Esta estructura cumple con los requisitos técnicos de Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), Gradiente de Mezcla Rápida (G) y el número adimensional de Froude. Para lo cual el TRH, es de 0,25 s, el G es de  $1939,87 \text{ s}^{-1}$ , y 8,17 para el número de Froude, garantizando así la estabilidad del resalto hidráulico.

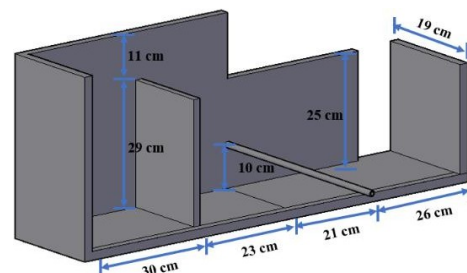


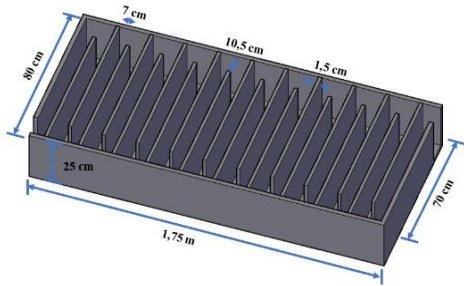
Figura 9. Medidas del vertedero rectangular de lámina delgada sin contracciones

Fuente:  
autores

### 10.4 Diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal

Para la segunda unidad de tratamiento, se asumió una velocidad de flujo de 0,12 m/s de acuerdo a Arboleda (1974), un TRH de 2 min, a pesar de que la Res. 0330 del 2017 en el artículo 112, establece unos rangos diferentes para TRH y para el Gradiente de mezcla lenta. No obstante, se tomó un TRH de 2 min, debido a que en el proceso de floculación las variables de velocidad de flujo y gradiente de mezcla lenta tienen un mayor cumplimiento a los rangos establecidos por dichas referencias.

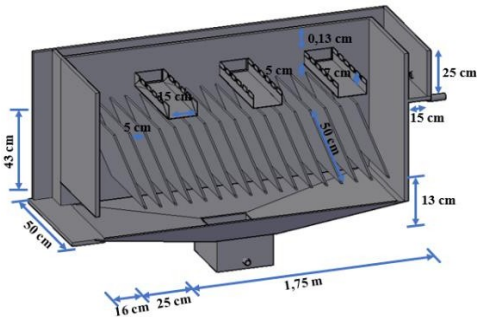
Finalmente, se calcularon todas las dimensiones necesarias, obteniendo una longitud de recorrido del agua (L) de 14,4 m. La Figura 10 muestra las medidas del floculador.



**Figura 10.** Dimensionamiento del floculador hidráulico de flujo horizontal

**Fuente:** autores

10.5 Diseño del sedimentador de alta tasa  
Para la tercera operación de tratamiento se asumió un valor de área superficial y se calcularon las dimensiones de las cuatro zonas. La Figura 11 muestra las medidas del sedimentador.



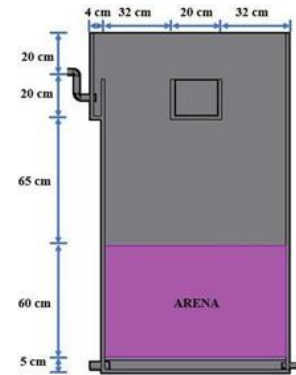
**Figura 11.** Dimensiones del sedimentador de alta tasa

**Fuente:** autores

10.6 Diseño del filtro de arena de flujo descendente

Para la cuarta unidad de tratamiento, se asumió un valor de  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  de Carga superficial (SLR), de acuerdo a lo establecido en el Art. 114 de la Res. 0330 del 2017.

La Figura 12 muestra las dimensiones calculadas.



**Figura 12.** Dimensiones del filtro rápido de arena

**Fuente:** autores

10.7 Dosis óptima de cloro

Las muestras de aguas utilizadas para el ensayo fueron obtenidas luego del proceso óptimo en el test de jarras. Posteriormente, se aplicó una dosis de cloro diferente a cada muestra y se midió el cloro total en cada uno de los frascos con el POCKET Colorimeter II (Figura 13).

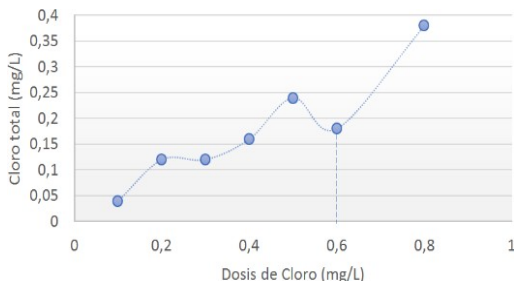


**Figura 13.** POCKET Colorimeter II

**Fuente:** autores

La Figura 14 muestra los valores obtenidos de cloro total en función de la dosis de cloro suministrada y se

determinó que el punto de quiebre es igual a 0,6 mg/L, este se presenta una vez el amoniaco y las cloraminas han reaccionado con el cloro, dando paso a la producción de cloro residual libre. Según el RAS, el valor aceptable de cloro residual libre para consumo humano debe estar comprendido entre 0,3 y 2,0 mg/L, por lo que se sugiere una dosis óptima entre 0,9 y 2,6 mg/L.



**Figura 14.** Determinación del breakpoint

**Fuente:** autores

Para el presente caso de estudio, se propone un clorinador en línea ubicado entre el filtro rápido y el tanque de almacenamiento final. Este consiste en un sistema práctico y confiable para la dosificación controlada de cloro sólido (en pastillas) de forma continua.

### 10.8 Diseño del sistema fotovoltaico

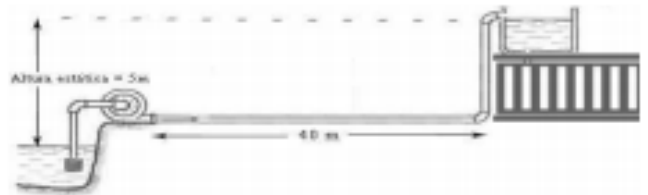
La mayor parte del funcionamiento de la planta es de tipo hidráulico, pero también requiere de energía

eléctrica para el funcionamiento de las bombas dosificadoras, para bombear el agua cruda desde la fuente hasta un tanque de almacenamiento inicial con capacidad de 2m<sup>3</sup> y para bombear el agua desde el último tratamiento hasta el almacenamiento final con capacidad de 5 m<sup>3</sup>, ambos tanques con sus respectivos sensores de nivel. Teniendo en cuenta el potencial solar en la zona, se propone un sistema fotovoltaico como la fuente principal de generación eléctrica que requiere la planta.

Luego de conocer el caudal que deseamos suministrar (17,7 m<sup>3</sup>/día) y teniendo en cuenta que en la localización se estima en promedio 5 Horas Solar Pico (kWh/m<sup>2</sup>) diario, se obtuvo un caudal horario (Qh) de 3,54 m<sup>3</sup>/h.

La altura total de bombeo o altura dinámica total se obtiene al sumar la carga estática y la carga dinámica, para el caso de estudio se definió una carga estática de 5 m (ver Figura 15), y la carga dinámica se calculó utilizando la fórmula de Hazen-Williams anteriormente descrita:

$$h_f = 10,67 \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \cdot \frac{L}{D^{4,87}} = 10,67 \cdot \left(\frac{9,83 \times 10^{-4}}{150}\right)^{1,852} \cdot \frac{45}{0,0381^{4,87}} = 0,98m$$



**Figura 15.** Altura estática y longitud de tubería

**Fuente:** autores



Ahora bien, al sumar la carga estática y la carga dinámica, se obtiene que la altura total de bombeo es igual a 6 m.

Luego de conocer el Qh y la altura dinámica total es posible obtener la potencia (W) de la bomba con las curvas de Caudal-Potencia que suministra el fabricante. Para el presente caso de estudio se seleccionó una bomba de captación superficial de referencia Lorentz PS600 CS-17-1 con potencia de 170W y voltaje nominal de 48V. Además, se seleccionó la misma bomba, pero con una potencia de 110W para llevar el agua hasta el tanque de almacenamiento.

El sistema de dosificación constituye el eje central del proceso de coagulación, esta dosificación será realizada por medio de una bomba magnética de desplazamiento de referencia HANNA Instruments BL 10-X, la cual presenta un consumo máximo de 200W y permite alcanzar un caudal máximo de dosificación de 10,8 litros por hora.

La Tabla 4 muestra los elementos que consumen energía eléctrica en el sistema y la demanda total de energía, teniendo en cuenta la potencia, el número de horas de uso de cada elemento y considerando un porcentaje de pérdidas dependiendo de la eficiencia de los equipos,

longitud y calibre del cableado, entre otros.

**Tabla 4.** Cuadro de cargas

Consumos energéticos	Cantidad	Potencia (W)	h/día	Wh/día
Bomba captación	1	170	5	850
Bomba dosificación	1	200	5	1000
Bomba almacenamiento	1	110	5	550
Pérdidas (%)	30			720
Demanda total de energía (Wh/día) =				3120

**Fuente:** autores

Considerando la demanda total de energía y las HSP, se requieren dos módulos fotovoltaicos de 330W de potencia nominal. Para aprovechar mejor la radiación solar incidente en la zona, se recomienda colocar los dos paneles solares conectados en paralelo con orientación hacia el sur y una inclinación aproximada de 10°.

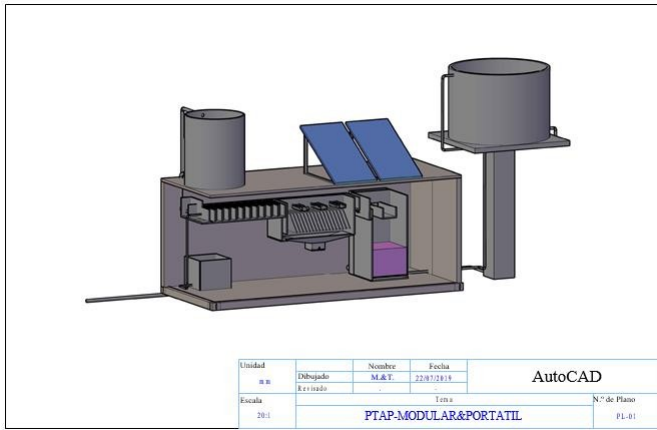
$$\# \text{ paneles} = \frac{\text{Demanda } \left(\frac{Wh}{\text{día}}\right)}{\text{Potencia (W)} \cdot \text{HSP}} = \frac{3120}{300 \cdot 5} = 1,89 \approx 2 \text{ paneles}$$

Adicional a los paneles solares, se debe instalar un regulador que permita controlar el paso de la corriente eléctrica desde los paneles solares hacia las bombas.

Teniendo en cuenta el dimensionamiento del sistema de potabilización y del sistema fotovoltaico, se diseñó en AutoCAD la planta de potabilización propuesta (ver



Figura 16).



**Figura 16.** Diseño de PTAP

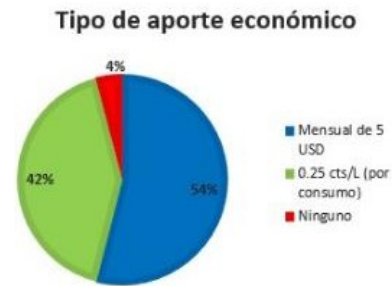
**Fuente:** autores

usted dispuesto a pagar la suma mensual de 5 USD para garantizar el mantenimiento y la operación de esta planta? Un 54% respondió de forma afirmativa mientras un 46% respondió de forma negativa, sin embargo, a quienes respondieron de forma negativa se les preguntó si preferían pagar de acuerdo al consumo un valor de 0,25 centavos por litro, a lo cual respondieron de forma afirmativa, excepto un 4% que no prefiere ningún tipo de aporte económico (Figura 17).

11. Método de valoración contingente

Como fase inicial, se realizó una encuesta preliminar a una muestra de 5 familias, con el objetivo de establecer un valor inicial de la DAP y reducir sesgos. Se propusieron diferentes valores de cuota mensual y por consumo, para determinar hasta qué valor las familias estaban dispuestas a pagar, las 5 familias escogieron las opciones más bajas, 5 USD si la cuota es mensual y 0,25 centavos por litro en caso de ser variable.

Posteriormente, se aplicaron las encuestas definitivas a las 67 familias que habitan en la comunidad. A la pregunta, si existiera la posibilidad de financiar la construcción de una planta de tratamiento para mejorar la calidad del agua que actualmente consume, ¿estaría



**Figura 17.** Preferencias en tipo de aporte económico  
**Fuente:** autores

Teniendo en cuenta las hipótesis y variables definidas para la prueba  $\chi^2$  de Pearson, se obtuvo que para la variable “etnia”, se rechaza  $H_1$  y se acepta  $H_0$ , es decir, no influye en la DAP.

**Tabla 5.** Prueba  $\chi^2$  para la variable de sexo

OBSERVADO	ESPERADO	CHI CUADRADO
-----------	----------	--------------

ETNIA	SI	NO	TOT	SI	NO	TOT	SI	NO	TOT
AFRO	19	13	32	17,1	14,8	32	0,190	0,220	0,410
ZENÚ	16	15	31	16,6	14,3	31	0,026	0,030	0,056
OTRA	1	3	4	2,1	1,8	4	0,615	0,714	1,328
<b>TOTAL</b>	<b>36</b>	<b>31</b>	<b>67</b>	<b>36</b>	<b>31</b>	<b>67</b>	<b>0,830</b>	<b>0,964</b>	<b>1,794</b>

Fuente: autores

Se realizó el mismo ejercicio con la variable “sexo” y se determinó que tampoco tiene peso en la respuesta positiva de la DAP. Sin embargo, los resultados de la prueba  $\chi^2$  de Pearson, mostraron que la variable ingreso familiar sí influye en la Disponibilidad a Pagar por el servicio de agua potable, como era de esperarse.

Teniendo en cuenta el costo mensual de la operación y mantenimiento de la PTAP, en donde se incluyó principalmente la mano de obra del operario (1 SMMLV), compra de insumos químicos (30 L hipoclorito de sodio y 50 Kg sulfato de aluminio tipo B), compra de diésel para el sistema de respaldo (10 galones), un porcentaje para el mantenimiento (10%) y otros costos operativos (20%), se obtuvo un valor promedio de 320 USD al mes. Si se elige la opción de un aporte de 5 USD por familia, al mes se obtiene un total de 335 USD, suficiente para garantizar la operación mensual de la PTAP. Ahora bien, si se elige la opción por consumo de 0,25 centavos por litro, sólo bastaría la venta de 4.100 litros diarios durante todo el

mes para poder obtener 320 USD al final, garantizando también que se pueda cubrir el costo mensual anteriormente descrito. Se recomienda que independientemente de la forma de pago a elegir, se acompañe con campañas de sensibilización a los usuarios sobre uso eficiente del agua y cultura de pago. Igualmente, es importante la creación de un comité u organización comunitaria, cuyo objetivo fundamental sea administrar, operar y mantener el servicio de agua potable.

## CONCLUSIONES

Al evaluar las características físicas, químicas y microbiológicas de las muestras de agua tomadas tanto en el Canal del Dique como en algunas de las viviendas de la comunidad, es posible afirmar que los habitantes actualmente están consumiendo agua de mala calidad debido a que algunos parámetros medidos no cumplen con lo establecido por la Resolución 2115 del 2007, para agua potable. Para Turbiedad, se obtuvieron valores entre los 1,05 – 72,9 NTU, con un valor promedio de 11,6 NTU; para Fosfato (PO<sub>4</sub>), valores que fluctúan entre los 5 – 1 mg/L (promedio de 2,7 mg/L); Para Coliformes Totales, con intervalos de 61 – 170 UFC (promedio de 65,5 UFC); y para Coliformes Fecales, en intervalos de 61 – 170 NTU

(Con un promedio de 65,5 NTU). En caso de implementación del proyecto, se recomienda adquirir equipos de análisis in-situ que permitan llevar un control de calidad en todo el sistema. Los parámetros mínimos que deben ser medidos son turbiedad y coliformes fecales, por tanto se recomienda adquirir un turbidímetro portátil y un kit colorimétrico para detectar presencia de coliformes.

De acuerdo a lo establecido por la Resolución 0330 del 2017 y con base en los resultados físicos, químicos y microbiológicos del agua cruda del canal de Dique, se propuso una alternativa de potabilización portátil (ocupa poco espacio para su instalación y se puede movilizar de un lugar a otro), modular (dependiendo de la fuente de captación, sea superficial o subterránea, se pueden agregar o eliminar procesos de tratamiento). Para garantizar la operación y mantenimiento de la planta, se recomienda la contratación y capacitación de un encargado local.

Los requisitos técnicos establecidos por el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS, la Resolución 0330 del 2017 y autores como Romero (1999) y Mackenzie y Cornwell (2012), fueron las guías para el dimensionamiento de la Planta

de Tratamiento de Agua Potable.

Adicionalmente, se logró obtener el diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico necesario para alimentar los equipos que requieren conexión eléctrica. Se destaca que la zona de localización del proyecto cuenta con alto potencial solar, este tipo de energía es cada vez más utilizado, sobre todo en zonas rurales aisladas de la red eléctrica, debido a sus beneficios ambientales y sociales.

Por último, se valoró económicamente el agua luego de los tratamientos propuestos para poder establecer una tarifa por el servicio de acueducto, en caso de implementación del proyecto. De esto, se obtuvieron dos posibles formas de pago (5 USD de forma mensual o 0,25 centavos por litro consumido), además, los resultados de la prueba  $\chi^2$  de Pearson mostraron que la variable ingreso familiar influye en la Disponibilidad a Pagar por el servicio de agua potable, a diferencia de otras variables como el sexo y la etnia, las cuales no influyen en la respuesta positiva de la DAP. Cabe agregar que el Método de Valoración Contingente puede presentar distintos tipos de sesgos, algunos de ellos pueden ser por parte del entrevistador o el entrevistado, el entrevistador puede presionar o influir en la respuesta a su favor, y el

entrevistado casi siempre opta por el valor más bajo.

## BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, P. (2013). Estudios y diseños del sistema del agua potable del barrio San Vicente, parroquia Nambacola, Cantón Gonzanamá (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.

Arboleda (1974). Hydraulic control system of constant and declining flow rate in filtration. AWWA. Vol. 66, pp. 87.

Farré, M. (2003). El valor de uso recreativo de los espacios naturales protegidos. Una aplicación de los métodos de valoración contingente y del coste del viaje. Estudios de economía aplicada, 21(2), pp. 297-320. ISSN 1133-3197

LORENTZ (2016). Productos y tecnología. Recuperado de: <http://www.lorentz.de.es/>

Mackenzie y Cornwell (2012). Introduction to Environmental Engineering. 5<sup>th</sup> edition, Science Engineering & Math.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial . (22 de Junio de 2007).

*MinAmbiente*. Recuperado de MinAmbiente: <http://www.minambiente.gov.co/images/Gestio>

n

[IntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](IntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf)

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Diciembre de 2003). MinAmbiente. Recuperado de MinAmbiente: [http://www.minambiente.gov.co/images/NegociosVerdesysostenible/pdf/569\\_guiavaloracion.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/NegociosVerdesysostenible/pdf/569_guiavaloracion.pdf)

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo (2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096 del 2000, 0424 del 2001, 0668 del 2003, 1459 del 2005, 1447 del 2005 y 2320 de 2009. Resolución 0330. República de Colombia.

Mogrovejo, P., & Quizhpe, D. (2007). Diseño y construcción de un sistema prototipo para el bombeo de agua mediante energía solar (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.

OMS & UNICEF (2017). Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene. Informe de actualización de 2017 y línea de base de los ODS.

ONU (2015). Agua y Saneamiento, ODS. Recuperado

de:

<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

[w](#)ater-and-sanitation/

Rochín, J., & Ortiz, S. (2000). Energía solar para bombeo de agua: Experiencias con ranchos sustentables en Baja California Sur. Recuperado de: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Rochin-SolarBombeo.pdf>

Romero, J. (1999). Potabilización del Agua. 3ª Edición. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.

UNICEF (2017). Más de 180 millones de personas carecen de agua potable en países en conflicto. Recuperado de: [https://www.unicef.org/elsalvador/media\\_36899.html](https://www.unicef.org/elsalvador/media_36899.html)

WEF-ASCE (1992). Design of Wastewater Treatment Plants.