

## I-026 - COBERTURA DE SERVICIOS DE AGUA POTABLE EN COMUNIDADES INDÍGENAS DE BAJOS INGRESOS CON UNA POBLACION DE 250 HABITANTES

**Neyla Carolina Camacho Guzmán<sup>(1)</sup>**

Ingéniero Químico, Universidad Simón Bolívar. Diplomado en Tratamiento de Aguas Especiales. Diplomado en Gerencia de Proyectos. En estudio Maestría en Ingeniería Sanitaria mención calidad del Agua, por culminar Tesis de Grado. Profesional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el área de Química y Ambiente en la Fundación Instituto de Ingeniería.

**Nora Expósito Lorenzo**

Lic. en Biología, Maestría en Ingeniería Sanitaria. Fundación Instituto de Ingeniería

**Raúl Enrique Romero Barrera**

Ingéniero Mecánico. Fundación Instituto de Ingeniería

**Raúl Enrique Ángel**

Ingéniero Mecánico. Fundación Instituto de Ingeniería

**Jorge Tabiscarí Fleitas**

Ingéniero Mecánico. Tesista de la Fundación Instituto de Ingeniería

**Dirección<sup>(1)</sup>:** Fundación Instituto de Ingeniería, Carretera Nacional Hoyo de La Puerta – Baruta, Urbanización Monte Elena II, Sartenejas, Baruta, Estado Miranda, Apartado Postal 40200, Caracas 1040 - Venezuela - Tel: +58 (212) 903.4723 - Fax: +58 (212) 903.4785 - e-mail: [nccamacho@gmail.com](mailto:nccamacho@gmail.com)

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue desarrollar tecnología propia para dotar de agua potable a comunidades indígenas del bajo Delta del Orinoco con una población de 250 habitantes, que están alejadas de los centros poblados y carecen de servicios de agua y de energía eléctrica. La planta de potabilización involucra las operaciones convencionales de: coagulación, floculación, sedimentación, filtración en medio granular y desinfección con hipoclorito de calcio. Las unidades de tratamiento (canaleta Parshall, coagulador-floculador, sedimentador de alta tasa, filtro horizontal y lecho de secado) están conectadas en serie de forma que el agua circule por gravedad. La succión del agua del río Orinoco se puede realizar con una bomba a gasolina (motobomba) o con una bomba eléctrica conectada a paneles solares. La mezcla del proceso de coagulación-floculación, se efectúa en dos modalidades: fuerza motora humana con una bicicleta o energía fotovoltaica suministrada por paneles solares. Luego de la desinfección el agua tratada es conducida por una motobomba a un tanque elevado, donde se almacena para ser distribuida a cada palafito utilizando una bomba de golpe de ariete. El sistema opera por cargas de 4000 litros, se obtiene una dotación mínima de 11 l/persona/día de agua potable para consumo y cocción de alimentos realizando cinco tratamientos semanales. Se recomienda usar una dosis de sulfato de aluminio de 180 mg /l en sequía y de 200 mg/l en lluvia; en el caso de la dosis de cal debe ser 85 mg/l en época de lluvia y 140 mg/l en época de sequía, para la desinfección deben emplearse 12 mg/l de hipoclorito de calcio al 65%. Todos los insumos químicos pueden ser suministrados por el gobierno regional y por el Ministerio del Ambiente. Estos reactivos se añaden en estado sólido en dosificadores diseñados para las características socio-culturales y ambientales de los Warao. Se tiene planificado realizar campañas de capacitación entre los miembros de la comunidad para crear conciencia en el uso y manejo del agua potable y para entrenarlos en la operación y mantenimiento del sistema de potabilización, con el fin de lograr su sustentabilidad. Como resultado de este proyecto, se está desarrollando un paquete tecnológico eficiente que puede ser implementado fácilmente en comunidades indígenas de 250 habitantes en zonas inundables.

**PALABRAS CLAVES:** Indígenas, Caracterización, Potabilización, Energía Solar.

### INTRODUCCION

Los Warao, indígenas que en su mayoría habitan en el estado Delta Amacuro de Venezuela, tienen una población estimada de 26.000 habitantes, viven en palafitos o janokos (estructuras elevadas a 1,5 m del nivel del agua construidas de madera y techo de palma), y se dedican a labores primarias como la pesca, caza, agricultura y artesanía. Estas comunidades de bajos ingresos, se encuentran dispersas en zonas de muy difícil acceso y en la

mayoría de los casos no cuentan con servicios básicos de agua potable. Para cubrir las necesidades de agua de consumo y de aseo usan el río Orinoco, el cual no cumple con los requerimientos exigidos por las normas venezolanas de calidad del agua potable. Los problemas sanitarios de estas comunidades se reflejan en los índices de morbilidad aportados por el Ministerio del Poder Popular para la Salud<sup>(1)</sup> en los cuales se indica que la tercera causa de muerte de esta población son las enfermedades de origen hídrico (diarrea y gastroenteritis), donde el 76% de las muertes corresponde a niños en edades comprendidas entre 0 y 4 años.

Para mejorar las condiciones sanitarias y garantizar un ambiente sano en estas comunidades se prepara la presente propuesta, la cual contempla el diseño, construcción e instalación de sistemas de potabilización de agua para comunidades de 250 habitantes. Estos sistemas, de fácil operación y mantenimiento, serán adaptados a las condiciones socio-culturales y ambientales de los pobladores; promoviendo de esta forma la participación ciudadana y el disfrute de los derechos sociales de forma equitativa.

## OBJETIVOS

**Objetivo General.** Mejorar las condiciones sanitarias y de salud pública de comunidades indígenas aisladas con población de 250 habitantes, dotándolas de una planta de potabilización centralizada, de fácil manejo y sencilla operación adaptada a las condiciones ambientales y socioculturales de la zona.

**Objetivos Específicos.** 1) Diseñar y construir las unidades que componen el sistema de potabilización convencional tomando en consideración los conocimientos ancestrales de los Warao sobre construcción en zonas inundables. 2) Incentivar la adquisición de buenas prácticas de higiene y aseo personal entre los pobladores, al utilizar el agua potable para aseo básico, cocina y bebida. 3) Incentivar el uso de energía solar en el proceso de coagulación-flocculación y en las etapas de succión y distribución.

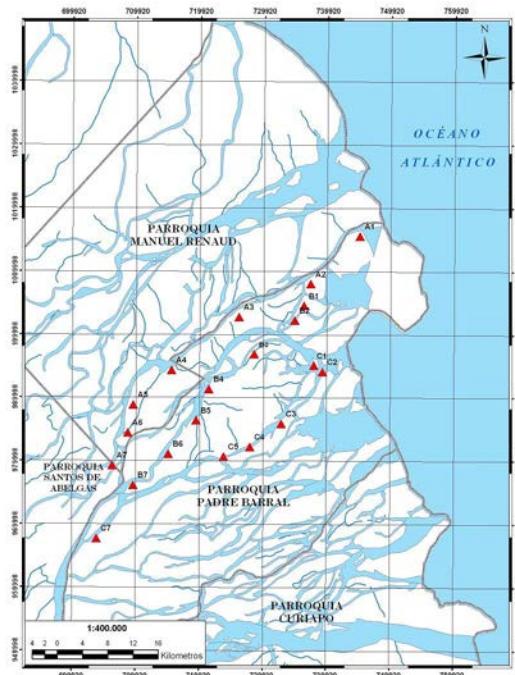
## ETAPAS DESARROLLADAS

**1. Muestreo y Caracterización del Río Orinoco.** Se realizaron dos campañas de muestreo, en épocas de lluvia (Junio a Diciembre) y de sequía (Febrero a Abril), para caracterizar tres caños cercanos a la población de San Francisco de Guayo, en el Municipio Antonio Díaz, ubicados en las Parroquias Manuel Renaud y Padre Barral del estado Delta Amacuro, en el bajo delta del Orinoco en Venezuela, en esta zona se instalarán los sistemas de potabilización.

Los caños fueron diferenciados con las letras A, B y C como se muestra en la Figura 1 y en cada uno de ellos se ubicaron siete estaciones de muestreo desde la divisoria de los caños principales Merejina y Janeida hasta la desembocadura. Se captaron muestras instantáneas, a 50 cm de profundidad y 50 metros del margen del río para evitar la influencia de la resuspensión de sedimentos en las orillas y de la presencia de lanchas sobre la calidad del agua.

Se efectuaron los análisis bacteriológicos y fisicoquímicos señalados en las “Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos”<sup>(2)</sup> y las “Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable”<sup>(3)</sup>. Estas pruebas se realizaron siguiendo la metodología establecida en el “Standard Methods For The Examination Of Water and Wastewater”<sup>(4)</sup>. En la determinación de metales se aplicó cromatografía por ICP (Inductively Coupled Plasma) con los métodos ASTM C-29, E-350 y C-25.

Adicionalmente se realizaron pruebas de tratabilidad en muestras compuestas para la determinación de las dosis de hidróxido de cal y sulfato de aluminio adecuadas (pruebas de jarro), e hipoclorito de calcio al 65% (demanda de cloro). Se realizaron pruebas de filtración para establecer eficiencia en la remoción de color y turbiedad, después de realizada la coagulación – flocculación - sedimentación.



**Figura 1: Puntos de Muestreo en el Bajo Delta del Orinoco**

Los equipos utilizados en la caracterización fueron los siguientes:

- ✓ Espectrofotómetro de absorción atómica, Marca: Varian, Modelo: SpectrAA-20 Perkin Elmer Lambda 3b UV/VIS Spectrophotometer;
- ✓ Cromatógrafo iónico, Marca: Dionex, Modelo: ICS-2000;
- ✓ Turbidímetro, Marca: Hach, Modelo: 2100P;
- ✓ Multiparámetro, Marca YSI, modelo 556;
- ✓ Medidor de oxígeno disuelto, Marca YSI Environmental, Modelo 550<sup>a</sup>;
- ✓ Espectrofotómetro portátil, Marca: Hach, Modelo: DR/2400;
- ✓ ICP. Marca Thermo Scientific, Modelo iCAP 6000 series;
- ✓ Sellador Sealer Quanta Try
- ✓ Test de Jarras, Velp Scientifica, Modelo FC6S.

En las Tablas 1 y 2 se presenta un resumen de la caracterización fisicoquímica y bacteriológica realizada.

**Tabla 1: Características fisicoquímicas del agua del río Orinoco**

| PARÁMETRO                                        | SEQUIA  | LLUVIA  | NORMA <sup>(*)</sup> |
|--------------------------------------------------|---------|---------|----------------------|
| pH                                               | 6,5     | 6,5     | 6,5 - 8,5            |
| Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )            | 9,8     | 9,6     | -                    |
| Nitratos (mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N) | 0,21    | 0,33    | < 45                 |
| Nitritos (mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N) | 0,017   | 0,007   | < 0,01               |
| Color ( U Pt-Co)                                 | 20      | 34      | < 15                 |
| Turbiedad (UNT)                                  | 12      | 48      | < 5                  |
| Salinidad (%)                                    | 0,01    | 0,01    | -                    |
| Temperatura (° C)                                | 26,9    | 29,1    | -                    |
| Sólidos Disueltos Totales (mg/l)                 | 20      | 13      | < 1.000              |
| Aluminio (mg/l)                                  | 0,15    | 0,15    | 0,2                  |
| Arsénico (mg/l)                                  | < 0,01  | < 0,01  | 0,01                 |
| Bario (mg/l)                                     | < 0,02  | < 0,02  | -                    |
| Cadmio (mg/l)                                    | < 0,001 | < 0,001 | 0,003                |
| Cromo (mg/l)                                     | < 0,01  | < 0,01  | 0,05                 |

**Tabla 1 (continuación): Características fisicoquímicas del agua del río Orinoco**

| PARÁMETRO        | SEQUIA  | LLUVIA  | NORMA <sup>(*)</sup> |
|------------------|---------|---------|----------------------|
| Hierro (mg/l)    | 0,34    | 0,80    | 0,3                  |
| Manganeso (mg/l) | 0,01    | 0,02    | 0,5                  |
| Mercurio (mg/l)  | < 0,001 | < 0,001 | -                    |
| Sodio (mg/l)     | 2,00    | 0,60    | 200                  |
| Plata (mg/l)     | < 0,01  | < 0,01  | 0,05                 |
| Plomo (mg/l)     | < 0,01  | 0,01    | 0,01                 |
| Selenio (mg/l)   | < 0,01  | < 0,01  | -                    |

**Tabla 2: Características biológicas del agua del río Orinoco**

| ORGANISMOS COLIFORMES (NMP/100 ML) | SEQUIA | LLUVIA | NORMA <sup>(*)</sup>      |
|------------------------------------|--------|--------|---------------------------|
| Totales                            | 20.000 | 11.200 | Ausentes 95% de los casos |
| Fecales                            | 2.030  | 77     | Ausentes                  |

(\*) Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable

Al evaluar las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua en estudio se observó que parámetros como coliformes totales y fecales, hierro, aluminio, plomo, color, turbiedad y pH no cumplieron con los límites establecidos en las “Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable” (artículos 9 y 14), especialmente en época de lluvia. En consecuencia, estas fuentes de agua no son aptas para ser destinadas al consumo humano de forma directa sin previo tratamiento. La existencia de coliformes indican la potencial presencia de bacterias y protozoarios patógenos que ocasionan enfermedades entéricas, específicamente, los resultados indican una concentración de coliformes termo-resistentes lo que se atribuye al aporte continuo de material fecal. Los elevados valores de color y turbiedad son ocasionados por los sólidos suspendidos y coloidales presentes en el río, producto del arrastre de sedimentos. El color se origina del lavado del material vegetal, con la consecuente disolución de ácidos húmicos en el agua. La presencia de hierro y aluminio puede atribuirse a aportes naturales de los suelos limo-arcillosos de la zona. Los valores de plomo posiblemente se originen por contribuciones antropogénicas provenientes de la gasolina de las lanchas, transporte común de la región.

Según las “Normas para la Clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos” (artículos 3 y 4), esta fuente se clasifica como agua Tipo 1 y Subtipo 1B, las cuales se definen como: “Tipo 1. Aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o subproducto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él”, “Sub -Tipo 1B: Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración”.

En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran los resultados de las pruebas de tratabilidad.

**Tabla 3: Dosis de Sulfato de aluminio e hidróxido de cal necesarias para el tratamiento del agua**

| SUSTANCIA                 | SEQUIA | LLUVIA |
|---------------------------|--------|--------|
| Sulfato de Aluminio(mg/l) | 180    | 200    |
| Hidróxido de Cal(mg/l)    | 140    | 85     |

**Tabla 4: Color y turbiedad en la prueba de filtración**

| PARAMETRO       | ENTRADA | SALIDA |
|-----------------|---------|--------|
| Color (U Pt-CO) | 20      | 5      |
| Turbiedad (UNT) | 2,46    | 0,96   |

**Tabla 5: Dosis de Cloro necesarias para la desinfección del agua**

| Cl <sub>2</sub> AGREGADO (mg/l) | Cl RESIDUAL <sup>(*)</sup> (mg/l) |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 0,5                             | 0,05                              |
| 1                               | 0,2                               |
| 1,5                             | 0,5                               |
| 2                               | 0,5                               |
| 2,5                             | 0,4                               |
| 3                               | 0,5                               |
| 4,5                             | 1                                 |
| 6                               | 2                                 |

(\*) Despues de 30 minutos de tiempo de contacto

La normativa venezolana indica que el efluente de la planta de potabilización debe tener 1 mg/l de cloro residual de manera que se deben añadir 4,5 mg/l de cloro puro al agua. El desinfectante a utilizar en el campo es hipoclorito de calcio en polvo al 65%, realizando las pruebas en el sitio se determinó una equivalencia de dosificación de 12 mg/l para obtener el residual deseado.

**2. Diseño y Construcción del Sistema de Potabilización.** Con la caracterización obtenida en los muestreos y tomando en consideración el entorno socio-cultural y ambiental de la región se definieron las especificaciones técnicas de cada una de las unidades de la planta de tratamiento, y se procedió a su construcción.

Las unidades se han diseñado tomando en consideración la simplicidad y la facilidad de manejo, y los conocimientos ancestrales Warao para construcción en zonas inundables. El sistema opera por cargas de 4000 litros, se obtiene una dotación mínima de 11 l/persona/día de agua potable para consumo y cocción de alimentos, realizando cinco tratamientos semanales. Sin embargo, al ser un proceso por carga los habitantes de la comunidad beneficiada pueden tener una mayor dotación al aumentar el número de tratamientos que realizan diariamente. El agua cruda se impulsa haciendo uso de un sistema dual con una motobomba o bomba eléctrica dependiendo del suministro de energía disponible en la zona. El agua luego circulará a través de las unidades de tratamiento por diferencia de carga hidráulica, se almacenará en un tanque de 12 m<sup>3</sup> donde es desinfectada y con otra bomba a gasolina es almacenada en un tanque elevado a poca altura, de 36 m<sup>3</sup>. Para distribuir el agua tratada a cada uno de los palafitos o “janokos” se utilizará una bomba de golpe de ariete. El mezclado en el proceso de coagulación-flocculación, se puede realizar a través de la fuerza motora humana con una bicicleta modificada o a través de energía fotovoltaica suministrada por paneles solares.

El diagrama general del proceso para la potabilización de agua en comunidades indígenas de 250 habitantes es presentado en la Figura 2. La secuencia de tratamiento se describe a continuación:

- ✓ succión de agua del río a la cajuela reguladora de caudal, con una motobomba (bomba a gasolina) o con una bomba eléctrica conectada a paneles solares
- ✓ regulación del caudal de entrada de agua a la canaleta Parshall mediante una cajuela de control de velocidad que garantiza la turbulencia del fluido para realizar la mezcla del hidróxido de calcio
- ✓ proceso de acondicionamiento del agua mediante el mezclado de cal con el agua cruda en una canaleta Parshall de 120 cm de longitud y 3”de ancho de garganta,
- ✓ proceso de coagulación-flocculación en un tanque de 4000 litros, de base rectangular construido en fibra de vidrio reforzado, cuyas paletas de agitación son de madera autóctona. La coagulación se realiza mediante mezcla rápida por 1 minuto y la flocculación mediante mezcla lenta por 20 minutos. Las paletas pueden ser accionadas en dos modalidades: fuerza motora humana a través de una bicicleta engranada a los ejes de agitación o un motoreductor, que utilizan energía fotovoltaica de paneles solares. En este proceso se dosifica sulfato de aluminio para la coagulación.
- ✓ sedimentación en un sedimentador de lamelas de alta tasa, construido en acero al carbono con recubrimiento epóxico, que mide aproximadamente 220 cm x 110 cm x 62 cm
- ✓ filtración en un filtro horizontal tubular de PVC y de fibra de vidrio, es de tasa declinante con capas de gravilla, antracita, arena gruesa y arena fina, tiene un diámetro 14” y una longitud de 130 cm,
- ✓ luego del proceso de filtración el agua tratada es almacenada en un tanque 12 m<sup>3</sup> de capacidad. En este tanque se le adicionará hipoclorito de calcio al 65% para realizar la desinfección, luego mediante una

motobomba se almacenará nuevamente en un tanque elevado de poca altura de  $36\text{ m}^3$ , para luego ser distribuida.

- ✓ distribución del agua potable, mediante una bomba de golpe de ariete, a tanques de almacenamiento de 220 litros de capacidad, ubicados en cada uno de los palafitos de la comunidad.

Se han diseñado dosificadores para realizar la adición de sustancias químicas (cal, sulfato de aluminio e hipoclorito de calcio) en las etapas de coagulación-floculación y desinfección del proceso de potabilización. Adicionalmente se diseñará un lecho de secado para recoger los lodos generados en la coagulación-floculación, en la sedimentación y en la filtración (producto de la limpieza o retrolavado).

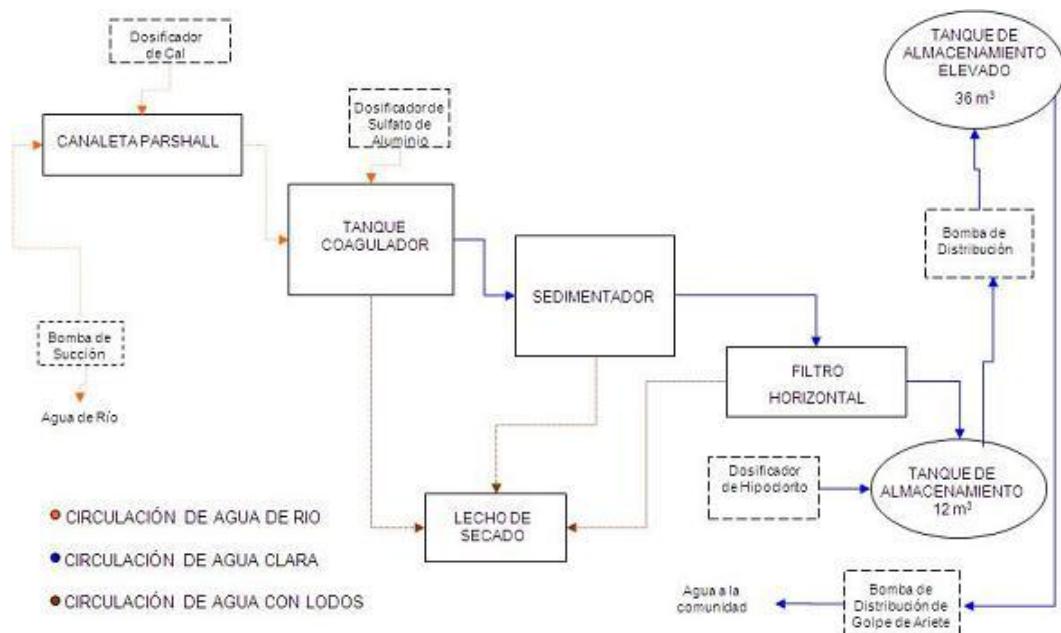


Figura 2: Diagrama del proceso de potabilización

Las características generales del sistema se describen a continuación:

- **Cajuela Reguladora de caudal.** Esta unidad trabaja en un rango que permite tiempos de llenado del tanque coagulador-floculador entre 5 y 20 minutos, es decir, la cajuela opera a caudales entre 0,00333 y 0,01333  $\text{m}^3/\text{s}$ . Su volumen total es de  $4\text{ m}^2$ .

La cajuela funciona básicamente a partir de un caudal de entrada ( $Q_e$ ) el cual es dividido en un caudal de salida útil ( $Q_{su}$ ) y un caudal de salida sobrante ( $Q_{ss}$ ). Su funcionamiento general se describe a continuación: el  $Q_e$  es suministrado por una motobomba que succiona el agua del río Orinoco y la descarga en un sistema de amortiguamiento. A través de una abertura rectangular ubicada en la parte inferior de esta cámara de amortiguamiento el agua fluye a la sección de mayor volumen de la cajuela, donde se encuentran con dos vertederos triangulares. El vertedero móvil controla el  $Q_{ss}$  y por el vertedero fijo suministra el  $Q_{su}$  hacia el mezclador hidráulico o canaleta Parshall (ver Figura 3). El vertedero móvil conduce el agua a otros compartimientos de la cajuela dotados de orificios, por los cuales el agua sobrante pueda regresar al río. El control de la altura de los vertederos de salida sobrante, se realiza por medio de unas placas. Al subir las placas, se reduce el área de salida sobrante, y de esta manera, al alcanzar estado estacionario y un nivel de agua constante, la cajuela aumentará el caudal de salida útil. Al bajar las placas podrá pasar mayor flujo de salida sobrante y disminuiría el de salida útil.

La cajuela se construirá en fibra de vidrio y su piso posee una inclinación de  $1,5^\circ$  respecto a la horizontal para que el agua fluya hacia un punto específico y facilitar su vaciado.

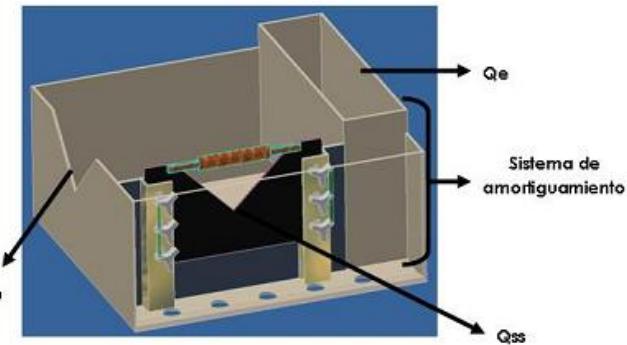


Figura 3: Vista general de la cajuela reguladora de caudal

- **Canaleta Parshall.** El Canal Parshall es empleado como un mezclador rápido, en la cual se dosifica el hidróxido de calcio antes del resalto hidráulico de la canaleta (zona de turbulencia). La cal se añade con el fin de acondicionar el agua hacia el proceso de coagulación-floculación.

La unidad prototipo se construyó con láminas de acero pulido, pero la versión definitiva será de fibra de vidrio. Sus dimensiones son estándar para una canaleta Parshall de tres pulgadas (3") de ancho de garganta y 120 cm de longitud. En la fabricación de la canaleta se tomó en consideración que el acabado de la superficie debe ser lo más liso posible, para minimizar las perdidas de energía hidráulica debido a rugosidad, además de facilitar el recorrido del agua en la unidad (ver Figura 4).

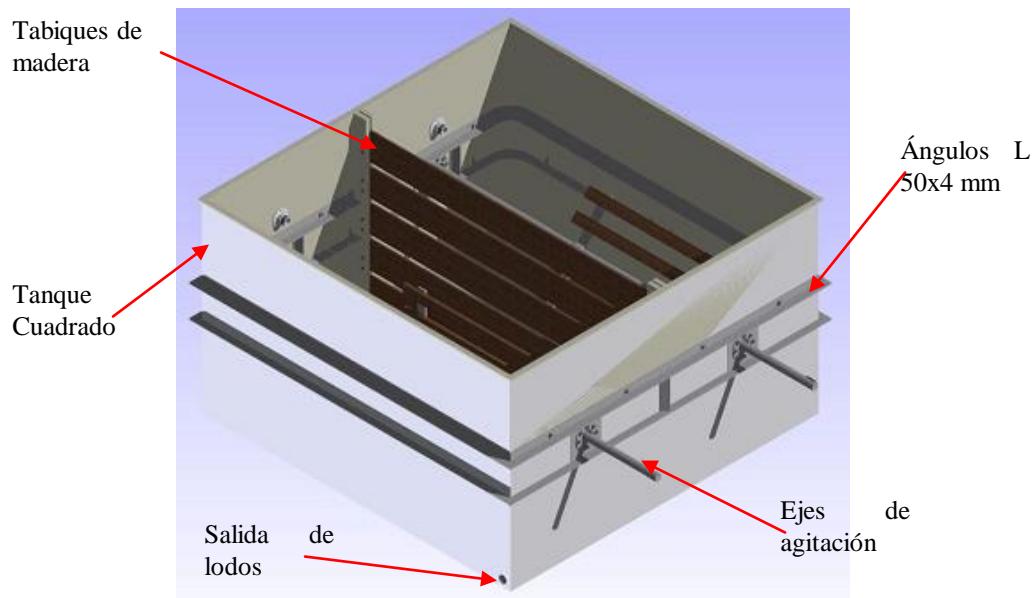
La canaleta se compone de cuatro partes principales: transición de entrada, sección convergente, garganta y sección Divergente. En la transición de entrada, el piso se eleva sobre el fondo original del canal, con una pendiente suave y las paredes se van cerrando en línea recta. En la sección convergente el fondo es horizontal. En la garganta el piso está inclinado, inicialmente, de forma descendente, y después cambia a forma ascendente. A lo largo de todo el canal la sección transversal es siempre rectangular.



Figura 4: Vista general de la canaleta Parshall construida

- **Tanque coagulador-floculador.** La unidad de Coagulación-Floculación es un tanque cuadrado de fibra de vidrio y resina de poliéster con un volumen de  $4\text{m}^3$ , posee dos ejes para realizar la agitación con paletas horizontales. Sus características son las siguientes:

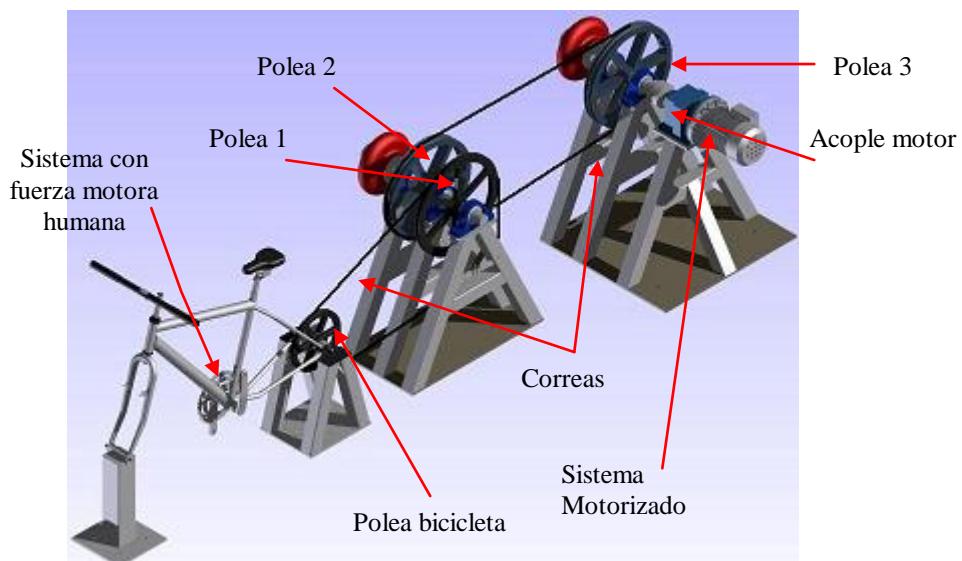
- Estructura del tanque (ver Figura 5),
  - ✓ Dimensiones internas  $2 \times 2 \times 1,2 \text{ m}$
  - ✓ Tiene ángulos en "L" (50 x 4 mm) tanto internos como externos para reforzar las paredes
  - ✓ Posee tabiques de madera en su interior para aumentar la eficiencia de la mezcla
  - ✓ Tiene un doble fondo o piso falso con inclinación para facilitar la extracción de lodos
  - ✓ Dispone de dos (2) ejes de acero inoxidable con agitadores de madera para realizar las mezclas requeridas



**Figura 5: Vista general del tanque coagulador**

b) Sistema de transmisión. Se emplean poleas de 16 pulgadas, correas tipo V y chumaceras Sy 111. Las bases para poleas y chumaceras están construidas con perfiles cuadrados de acero estructural 60 x 60 mm (ver Figura 6). La transmisión se puede realizar de dos formas:

- ✓ Motorizado compuesto de un motor trifásico de 1 hp de potencia y 1670 rpm, con energía fotovoltaica proveniente de un conjunto de paneles solares
- ✓ Con fuerza motora humana accionado mediante una bicicleta compuesta por una bicicleta comercial rin 20



**Figura 6: Sistema de transmisión del tanque coagulador**

Se llena el tanque coagulador-floculador con agua acondicionada proveniente de la Canaleta Parshall. Se inicia el proceso de agitación, en primer lugar la mezcla rápida a razón de 100 rpm durante 1 minuto y

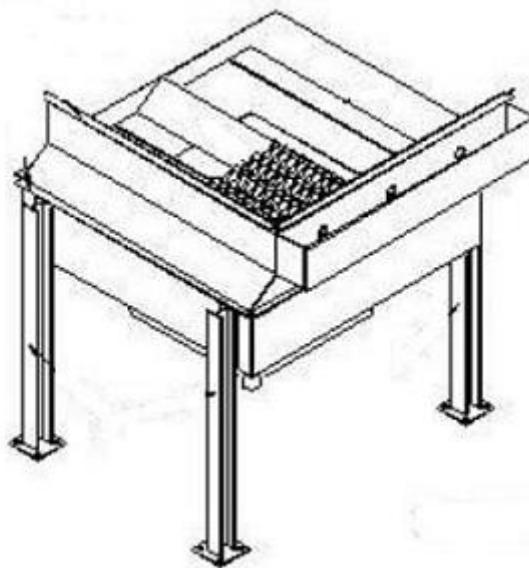
posteriormente la mezcla lenta a 20 rpm por 20 minutos. Las mezclas se pueden realizar utilizando la dualidad del sistema de transmisión: fuerza motora humana o con el motor trifásico.

Para realizar la agitación con el motor se debe desacoplar el sistema manual liberando la tensión de la correa que une la polea de la bicicleta y la polea 1 del sistema de transmisión, luego se enciende el motor a través del accionamiento del tablero de control eléctrico. Dentro del tablero de control se encuentra el variador de frecuencia y los controladores de tiempo que automatizan la secuencia de ejecución de las mezclas (velocidad y tiempo de mezclado).

Para efectuar el proceso de agitación utilizando la fuerza motora humana se debe desacoplar el sistema motorizado liberando el acople que une al eje del motor y la polea 3 del sistema de transmisión, luego el operador se sube a la bicicleta y comienza a pedalear. La correa que une la polea de la bicicleta a la polea 1 transmite la potencia generada por el operador a los ejes de agitación.

Una vez concluido el proceso de agitación se abren las válvulas de la paso de agua hacia la unidad de sedimentación, donde se efectúa la siguiente fase del proceso de potabilización

- **Sedimentador de alta tasa.** Un sedimentador de alta tasa, es un método económico para separar sólidos de los líquidos, debido a la gravedad. Tiene una zona no turbulenta, donde las flóculos más pesadas del agua proveniente del tanque coagulador-flocculador se separan por acción de la gravedad, y resbalan en placas inclinadas (lamelas) que se encuentran a 60° de con respecto a la horizontal y sedimentan en el fondo. Se construyó en acero al carbono ASTM A-36, con recubrimientos epóxicos internos y externos. La unidad mide 220 cm x 110 cm x 62 cm (ver Figura 7).



**Figura 7: Vista general del sedimentador de lamelas**

El proceso de sedimentación de alta tasa se basa en el choque de partículas suspendidas en el agua con las lamelas inclinadas (láminas de fibra de vidrio o acrílico). Entre cada lamela el espacio es pequeño y la velocidad es baja, dando tiempo a que los flóculos caigan, reposen y se acumulen en las láminas hasta que por el efecto del peso rueden al fondo del equipo, y se compacten en la tolva para ser desalojados a un lecho de secado de lodos. Por ser los flóculos de baja densidad, se requiere que las placas inclinadas sean colocadas a un ángulo de 60°, para inducir a las partículas a que resbalen. Para partículas más pesadas, como por ejemplo la arena, es suficiente un ángulo de 45°.

También es necesario, suficiente espacio entre la tolva y el área lamelar para prevenir turbulencias y acumulaciones excesivas, que provoquen el arrastre de sólidos a la superficie. Los sólidos depositados en la tolva se almacenarán hasta alcanzar el volumen máximo de diseño. La purga de los lodos se realizará desde

la parte inferior del equipo por medio de una válvula y se depositará en el lecho de secado. El agua clarificada asciende lentamente hacia un vertedero superior que posee tres aberturas y circula finalmente hacia un filtro.

- **Filtro horizontal.** El filtro tubular diseñado es mostrado en la Figura 8. Su funcionamiento consiste en hacer circular el agua por carga a través de un cilindro que contiene diferentes materiales filtrantes separados por secciones. Las secciones tienen punto tomas donde se colocan manómetros para la medición de la variación de la presión por unidad de longitud.

Los filtros horizontales presentan como ventaja principal el aprovechamiento de la fuerza de gravedad para su funcionamiento sin necesidad del uso de bombas eléctricas o motobombas, aplicable en zonas muy alejadas de centros poblados que carecen de servicio eléctrico continuo y suministro constante de gasolina.

El filtro horizontal construido es de PVC y de fibra de vidrio, es de tasa declinante con capas de gravilla, antracita, arena gruesa y arena fina, tiene diámetro 14" y una longitud de 130 cm (ver Figura 9). La separación de las diferentes secciones del filtro se logró utilizando bridas de plexiglás, que contienen en su parte interna una lámina perforada de acero inoxidable y cedazo. El acoplamiento del filtro en su totalidad se logró a través de barras roscadas

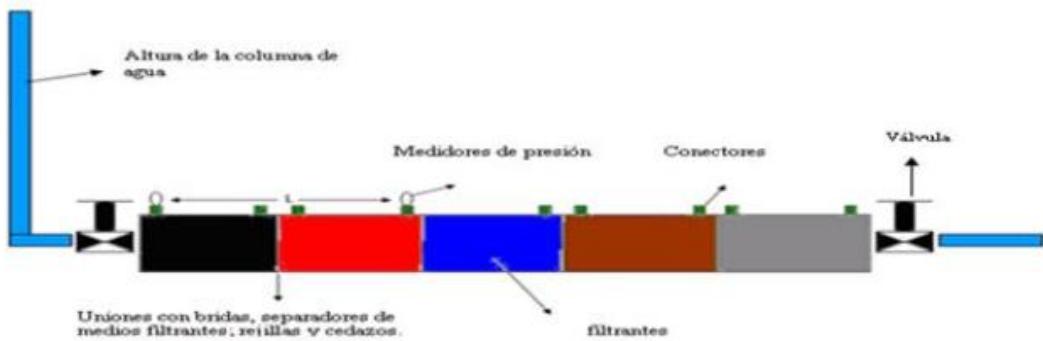


Figura 8: Filtro horizontal diseñado



Figura 9: Filtro horizontal construido

El filtro construido se está evaluando de forma experimental y su comportamiento se está simulando con el programa CFX, para determinar:

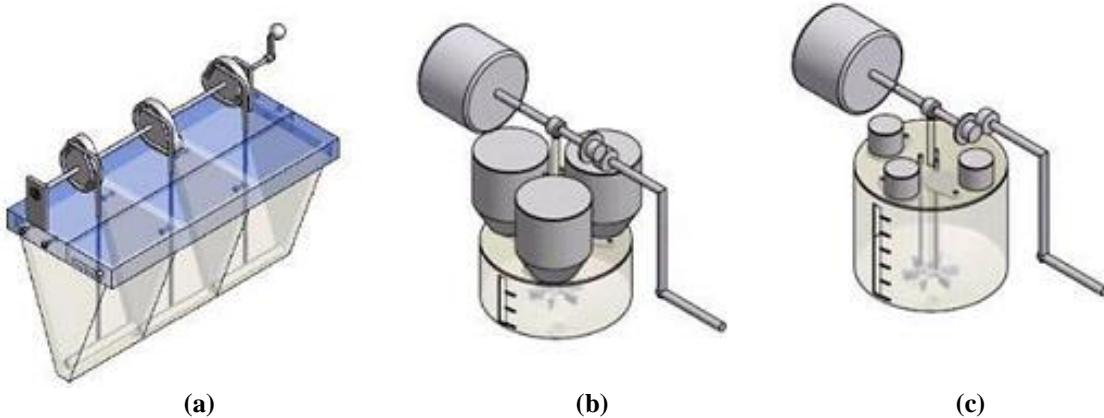
- ✓ la eficiencia del funcionamiento en función de la potencia suministrada al agua o velocidad de filtración, longitud y porosidad del medio, y características de color y turbiedad del agua para diferentes configuraciones del medio filtrante: Gravilla-Antracita-Arena Gruesa, Antracita-Arena Gruesa-Arena Fina, Gravilla-Arena Gruesa-Arena Fina

- ✓ la carrera de filtración (período en el cual el filtro alcanza la máxima pérdida de carga) y cálculo de la cantidad de agua que puede procesar en un tiempo determinado.
- ✓ la frecuencia y duración del retrolavado para la limpieza del filtro.

La simulación en el programa CFX se realiza de la siguiente forma: se modela la geometría del filtro, se hace el mallado de la misma y se aplica el método de los volúmenes finitos para resolver la ecuación de continuidad y la ecuación de momento (Navier-Stokes). Simultáneamente se escoge el modelo de turbulencia y el efecto del medio filtrante para la concentración de partículas, después se vuelve a procesar la información para verificar los perfiles de presión y velocidad en el filtro.

Los resultados obtenidos en la simulación computacional se compararán con el estudio experimental del mismo, de forma de optimizar su funcionamiento y conocer en detalle los factores que afectan la eficiencia del proceso de filtración en unidades horizontales y para optimizar el diseño del filtro horizontal a tasa declinante.

- **Dosificadores de sustancias químicas.** En la Figura 10 se presenta una vista general de los dosificadores diseñados.



**Figura 10: Dosificadores prototipo (a) hidróxido de calcio, (b) sulfato de aluminio, (c) hipoclorito de calcio**

El equipo dosificador de hidróxido de calcio (Cal) se diseñó para controlar la dosis de cal en la estabilización del agua del río para los procesos de coagulación-floculación y lograr una mezcla óptima del compuesto con el agua. La dosificación se realiza sobre la base de la canaleta Parshall, que se utiliza como unidad de mezcla rápida.

Para evitar la compactación de la cal, ocasionada por condiciones ambientales del Bajo Delta: elevadas humedad relativa y temperatura, se diseñó y construyó un primer prototipo con las siguientes características:

- ✓ Compartimientos separados con forma de pirámide truncada para llenado individual y por carga de tratamiento
- ✓ Paredes lisas de acero inoxidable
- ✓ Incorporación de dos vibradores tipo celular a las paredes que se activarán solo al momento de la dosificación para ahorrar energía
- ✓ Sistema de levas angulares con cierre para la apertura de cada compartimiento
- ✓ Guías de nylon en contactos con las levas
- ✓ Tapa dividida en dos piezas : una móvil deslizable para agregar la cal en cada compartimiento y otra fija para evitar exposición de la cal

Cada compartimiento tiene el volumen necesario para la cantidad de cal requerida (360 g) al tratar 4 m<sup>3</sup> de agua de río, se pueden realizar tres dosificaciones por día con esta unidad. La descarga de cal se realiza a través de un área reducida con una especie de válvula tipo aguja. Esta válvula consta de un tope con la geometría de la parte inferior de la pirámide truncada para regular la caída y una varilla que comunica dicho tope a la parte superior de cada compartimiento para controlar la apertura y cierre.

Al momento de la dosificación, solo la tolva o compartimiento activo permanece abierto y los demás permanecen cerrados. Para controlar las posiciones de apertura y cierres de los compartimientos, se diseñó un sistema de levas angulares las cuales presentan un canal por donde pasa la guía de una varilla que cierra la descarga de la tolva o compartimiento. Para controlar la altura de la apertura y asegurar la correcta dosificación, las tres levas se encuentran desfasadas 120 grados entre sí, de forma que la geometría de las mismas permitan la descarga de un compartimiento mientras que los demás están cerrados, en cada giro de 60 grados los tres compartimientos quedan bloqueados.

Se evaluó el prototipo en cuanto a funcionamiento y se determinó que la descarga de cal, bajo las condiciones de diseño, fue baja debido a la aparición de grumos en cada comportamiento. En consecuencia se decidió realizar los cambios que a continuación se detallan, los cuales se encuentran actualmente en ejecución:

- ✓ Disminuir el espesor de las paredes
- ✓ Cambiar del sistema de levas por un sistema tipo gatillo, eliminar en lo posible el uso de tornillería en cada compartimiento
- ✓ Incorporar sistemas dual de vibración eléctrica y mecánica, esta ultima a través de un sistema tipo pianola que golpea suavemente las paredes de cada compartimiento
- ✓ Colocar tres vibradores de 10 V en la pared de cada compartimiento
- ✓ Colocar gomas o recubrimientos de silicona en la cara interior de la abertura inferior del compartimiento para evitar fugas del material.
- ✓ Cambiar el seguro que mantiene la posición abierta de cada compartimiento por otro que gire en el eje Z y no en el eje X, modificar la ranura en la varilla para que tenga una pequeña inclinación hacia adentro, esto elimina la necesidad de un resorte para facilitar la construcción
- ✓ Construir una base con resortes de tal forma que se pueda amortiguar los movimientos producidos por el vibrador
- ✓ Incluir una especie de aspa móvil en el eje de cada compartimiento para evitar que se compacte la cal a medida que se dosifica

Al momento de probar el prototipo optimizado la velocidad de dosificación fue de 2,4 g/s, el tiempo de dosificación fue menor a 5 minutos.

Los dosificadores de hipoclorito de calcio y sulfato de aluminio presentan similares características a la unidad de cal, solo se diferencian en la capacidad del recipiente de mezcla y forma de dosificación. El mezclador es de tipo turbina con “stator” para una elevada eficiencia de homogeneización del compuesto en polvo y el agua de forma de dosificar en líquido.

La potencia del motor requerida para la agitación es de 0,05 Hp (37,9 W), el motor mueve el eje del mezclador el cual está en funcionamiento tres veces al día en intervalos de dos horas. El movimiento del mezclador no solo es automático también puede ser manual a través de un sistema de transmisión mecánico que comprende una manivela y un multiplicador de velocidad. Las paredes del recipiente de mezcla son de acero al carbono con recubrimiento epóxico y fondo marino. Para que los mezcladores funcionen de forma automática se utilizará energía fotovoltaica proveniente de paneles solares.

La dosificación del sulfato de aluminio es rápida y la descarga se realiza a través de una manguera con válvula de cerrado rápido, mientras que la dosificación de hipoclorito de calcio se realiza por goteo empleando un sistema similar al usado en los hospitales para el suministro de sueros.

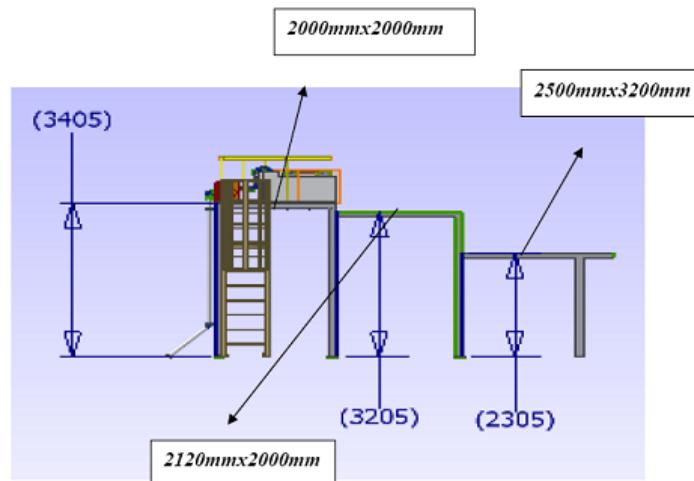
- **Estructura de soporte de las unidades de tratamiento.** El sistema de soporte tiene 3 pisos o niveles (ver Figura 11). En el nivel más alto se coloca la cajuela reguladora de caudal y la bomba de succión, en el siguiente nivel se ubica la canaleta Parshall, y en el último y más bajo se ubica el tanque coagulador-floculador. Las siguientes unidades del sistema potabilizador no requerirán de espacio en el sistema de soporte porque se colocaran a nivel del piso.



**Figura 11: Esquema general de la plataforma de soporte**

Tanto la estructura de soporte, como la escalera de acceso a la misma serán construidas en acero al carbono tratado con “sandblasting” (desgaste con arena) y pintura epóxica para evitar la corrosión ante las condiciones ambientales del Bajo Delta del Orinoco.

Para el análisis del sistema de soporte se utilizó el método de los elementos finitos con el “Autodesk Inventor”, a fin de conocer los esfuerzos que resistirá la estructura por los pesos a soportar. Las restricciones dadas al sistema de soporte, se basaron en modelar sus 8 patas como empotradas al suelo. Se priorizó el estudio de los esfuerzos de Von Mises, de las deformaciones, y del factor de seguridad. En la Figura 12 se presenta las dimensiones generales (en mm) de la estructura de soporte



**Figura 12: Dimensiones de la estructura de soporte**

## ETAPAS A DESARROLLAR

**1. Capacitación y entrenamiento de los miembros de la comunidad.** Una vez elegida, por las autoridades competentes, la comunidad donde se instalará el sistema de potabilización, se debe establecer un contacto directo y continuo con los indígenas y realizar campañas educativas y talleres de sensibilización con el fin de a) crear conciencia en el uso y manejo del agua potable para consumo y preparación de alimentos, b) capacitar en la operación y mantenimiento del sistema de potabilización, así como en el uso y prevención en el manejo de sustancias químicas y c) organizar a la comunidad para garantizar la gestión sostenible del sistema de potabilización.

**2. Culminación de Construcción e instalación del sistema de potabilización y del sistema de distribución.** Se debe concluir la construcción de las unidades que componen el sistema de potabilización, además de diseñar

y fabricar la unidad de secado de lodos. Después que las autoridades competentes seleccionen la comunidad beneficiaria del sistema de potabilización, se debe construir la estructura de soporte y el tanque de almacenamiento elevado con apoyo de los miembros de la comunidad. Se debe instalar la planta de potabilización y la bomba de golpe de ariete para realizar la distribución. La tubería de distribución debe instalarse debajo de la caminería principal de la comunidad, con aducciones a las viviendas o “janokos”, que contaran con un tanque de almacenamiento de 220 litros por cada 5 personas que habiten el palafito.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El sistema de potabilización diseñado permite obtener un agua de alta calidad, apta para consumo humano. Además este sistema es de fácil manejo, lo que facilita que los miembros de las comunidades indígenas puedan realizar los tratamientos que requieran para aumentar la dotación. La dualidad de funcionamiento (mecánico o eléctrico) acompañado con procesos de capacitación en operación y mantenimiento, le confiere a la planta de potabilización sustentabilidad y apropiación por parte de los Warao. Una vez elegida la comunidad donde se instalará el sistema es recomendable iniciar jornadas y talleres de educación ambiental para crear conciencia en el uso y manejo del agua potable para el consumo y preparación de alimentos, además se debe organizar a la comunidad para garantizar el buen uso del mismo. Se recomienda la réplica del sistema en diversas comunidades indígenas Warao del Delta del Orinoco con población de 250 habitantes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece la invaluable colaboración de los TSU Universitarios en Mecánica Javier Gómez y Angel Maíz.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Ministerio del Poder Popular para la Salud. Anuario de Mortalidad 2008. En: [http://www.bvs.org.ve/anuario/anuario\\_2008.pdf](http://www.bvs.org.ve/anuario/anuario_2008.pdf), 2010.
2. Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos Gaceta Oficial de la República de Venezuela nro. 5.201 extraordinaria. Año 123, mes 3, 1995.
3. Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. Gaceta Oficial de la República de Venezuela nro. 36.395. Año 125, mes 5, 1998.
4. Standard Methods For The Examination Of Water and Wastewater . 21va edición. America Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2005