

Diagnóstico y evaluación de una planta de tratamiento de agua potable: estudio de caso

Diagnosis and evaluation of a treatment plant for drinking water: case study

COLCIENCIAS TIPO 5. REPORTE DE CASO

RECIBIDO: DICIEMBRE 18, 2012; ACEPTADO: FEBRERO 1, 2013

Candelaria Tejada Tovar
candelariatejada@yahoo.com

Ángel Villabona Ortiz
angelvillabona@yahoo.es

Benjamín Buelvas Lidueñas
bbl72@hotmail.com

Universidad de Cartagena, Colombia

Resumen

El presente artículo contiene los resultados del diagnóstico, y evaluación técnica y operativa del sistema de tratamiento de agua potable de la Cabecera Municipal de Santa Cruz de Mompo, departamento de Bolívar. Se describen las características generales de la población tales como extensión, límites, climatología, hidrografía, usos del suelo, vías, aspectos socioeconómicos y disponibilidad de servicios públicos, y se realiza una descripción detallada de la infraestructura existente en los componentes que conforman el sistema de acueducto del casco urbano del municipio, detallando las características, estado, y uso de cada componente, complementado con recomendaciones, conclusiones del diagnóstico y evolución de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP).

Palabras Clave

Diagnóstico; planta potabilizadora; tratamiento de agua; unidad de tratamiento.

Abstract

This article contains the results of the diagnosis, and technical and operational evaluation of the treatment system drinking water from the municipal seat of Santa Cruz de Mompo, Bolivar (Colombia). It describes the general characteristics of the population such as extension, boundaries, climate, hydrograph, land use, roads, socio-economic and availability of public services, and a detailed description of the existing infrastructure at the components that make up the system aqueduct urban area, detailing the characteristics, status, and use of each component, complete with recommendations and conclusions of the diagnosis and evolution of plant water treatment (PTAP).

Keywords

Diagnosis; water treatment; water treatment plant; treatment units.

I. INTRODUCCIÓN

Las comunidades colombianas se enfrentan al reto de mejorar sus sistemas de potabilización de agua de acuerdo con el Decreto 475 de 1998 (normas técnicas de calidad del agua potable), el Decreto 1575 de 2007 (sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano), y la resolución 2115 de 2007 (características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano) (Restrepo, 2009).

La planta de tratamiento del acueducto de Santa Cruz de Mompo fue construida en 1946 y entró en funcionamiento en 1957; es un modelo de planta convencional, prototipo brasilero, diseñada para recibir y tratar aproximadamente 50 L/s, para suministrar agua a una población futura de 20.000 habitantes.

Actualmente la PTAP presenta un consumo promedio de agua potable de 98 L/s. Este desfase hace que la planta trabaje al doble de su capacidad de diseño, generando problemas en los procesos unitarios de floculación, sedimentación y filtración, y que el sistema se encuentre colapsado, presentando toda clase de problemas para el suministro. Por lo expuesto se han detectado deficiencias en el proceso como se describe a continuación.

II. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (NORMA RAS)

A. Cálculo de población

En caso que el diseño de un sistema de acueducto particular incluya un municipio o una zona de él, en la cual no sea posible realizar una proyección de demanda o de suscriptores, las dependencias encargadas de la planeación y comercialización de los proyectos de agua potable de la prestadora del servicio (o el diseñador, si ellas no existen), deben hacer la proyección y los ajustes de la población (Res. 1096, 2000).

Para la estimación de la proyección de la población se deben tener en cuenta los datos establecidos para la población por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], tanto para la definición del nivel de complejidad del sistema, como para la proyección de la población. El último dato de población establecido por el DANE para el municipio objeto del diseño debe tenerse en cuenta como un último censo a utilizarse para la proyección de la población (Res.2320, 2009).

B. Métodos de cálculo

El método de cálculo para la proyección de la población depende del nivel de complejidad del sistema según se muestra en la Tabla 1. Se calcula la población utilizando por lo menos los siguientes modelos matemáticos: aritmético, geométrico o exponencial, seleccionando el modelo que mejor se ajuste al comportamiento histórico de la población. Los datos de población deben estar ajustados con la población flotante y la migratoria. En caso de falta de datos se recomienda la revisión de los datos de la proyección con los disponibles en poblaciones cercanas que tengan un comportamiento similar a la del estudio (Res. 1096, 2000).

Tabla 1. Métodos permitidos /nivel de complejidad del sistema, para la proyección de la población (Res.2320, 2009)

Método de cálculo	Bajo	Medio	Medio Alto	Alto
Aritmético, geométrico y exponencial	x	X		
Aritmético + geométrico + exponencial + otros			x	x
Por componentes (demográfico)			x	x
Detallar por zonas y densidades			x	x
Gráfico	x	X		

1) Método Aritmético

Supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración. La ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

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

Donde:

- P_f = Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).
- P_{uc} = Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).
- P_{ci} = Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).
- T_{uc} = Año correspondiente al último año proyectado por el DANE.
- T_{ci} = Año correspondiente al censo inicial con información.
- T_f = Año al cual se quiere proyectar la información.

2) Método Geométrico

Es útil en poblaciones que muestran una importante actividad económica, que generan un apreciable desarrollo y que poseen importantes áreas de expansión que pueden ser dotadas de servicios públicos sin mayores dificultades.

La ecuación que se emplea es:

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

Donde:

r = tasa de crecimiento anual en forma decimal.

P_f = población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).

P_{uc} = población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes).

P_{ci} = población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

T_{uc} = año correspondiente al último año proyectado por el DANE.

La tasa de crecimiento anual se calcula de la siguiente manera:

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

3) Método exponencial

Su utilización requiere conocer por lo menos tres censos para poder determinar el promedio de la tasa de crecimiento de la población; el último censo corresponde a la proyección del DANE. Se recomienda su aplicación a poblaciones que muestren apreciable desarrollo y posean abundantes áreas de expansión. La ecuación empleada por este método es la siguiente:

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

Donde k es la tasa de crecimiento de la población, la cual se calcula como el promedio de las tasas calculadas para cada par de censos, así:

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

Donde:

P_{cp} = población del censo posterior (proyección del DANE).

P_{ca} = población del censo anterior (habitantes).

T_{cp} = año correspondiente al censo posterior.

T_{ca} = año correspondiente al censo anterior

Ln = logaritmo natural o neperiano.

C. Cálculo de la demanda de agua

1) Proyección de la demanda de agua

Para llevar a cabo la proyección de la demanda de agua, la persona prestadora del servicio debe contar con datos de demanda de los últimos diez años, con una frecuencia bimestral. Con esta información se debe hacer un análisis estadístico detallado con el fin de encontrar la curva que mejor ajuste el crecimiento de la demanda de agua en ese período. Una vez realizado el análisis, se debe proceder a proyectar la demanda de agua, siguiendo la misma curva, hasta el último año del período de diseño. En este caso, adicionalmente, es necesario cotejar dicha proyección de la demanda de agua con la demanda de agua para la población de saturación, de acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial [POT] del municipio o la zona del municipio objeto del diseño (Res. 2320, 2009).

2) Caudal medio diario

El caudal medio diario [Qmd], corresponde al promedio de los consumos diarios de caudal en un período de un año, proyectado al horizonte de diseño, el cual debe calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$Qmd = \frac{No. suscriptores \times d_{bruta}}{30 \times (1 - \%P_c)}$$

En esta última ecuación $\%P_c$ corresponde al porcentaje de las pérdidas comerciales. Adicionalmente, para esta ecuación la dotación bruta está dada en metros cúbicos/suscriptor·mes y 30 representa el número de días en el mes (Res. 2320, 2009).

3) Caudal máximo diario

El caudal máximo diario [QMD], corresponde al consumo máximo registrado durante 24 horas a lo largo de un período de un año. Se calcula multiplicando el caudal medio diario por el coeficiente de consumo máximo diario, k_1 , como se indica en la siguiente ecuación:

$$QMD = Qmd \times k_1$$

El coeficiente de consumo máximo diario [k_1], se obtiene de la relación entre el mayor consumo diario y el consumo medio diario, utilizando los datos registrados en un período mínimo de un año. En los sistemas nuevos, el coeficiente de consumo máximo diario [k_1] depende del nivel de complejidad del sistema (ver Tabla 2).

Tabla 2. Coeficiente de consumo máximo diario (k_1) / nivel de complejidad del sistema (Res. 2320, 2009)

Nivel de Complejidad	k_1
Bajo	1,30
Medio	1,30
Medio alto	1,20
Alto	1,20

4) Caudal máximo horario

El caudal máximo horario [QMH] corresponde al consumo máximo registrado durante una hora en un período de un año sin tener en cuenta el caudal de incendio. Se calcula como el caudal máximo diario multiplicado por el coeficiente de consumo máximo horario [k_2] según la siguiente ecuación:

$$QMH = QMD \times k_2$$

El coeficiente de consumo máximo horario con relación al consumo máximo diario [k_2], puede calcularse, para el caso de ampliaciones/extensiones de sistemas de acueducto, como la relación entre el caudal máximo horario [QMH] y el caudal máximo diario [QMD], registrados durante un período mínimo de un año, sin incluir los días en que ocurran fallas relevantes en el servicio.

En los sistemas de acueducto nuevos, el coeficiente de consumo máximo horario con relación al consumo máximo diario (k_2) es función del nivel de complejidad del sistema y del tipo de red de distribución (ver Tabla 3).

Tabla 3. Coeficiente de consumo máximo horario (k_2) / según el nivel de complejidad del sistema y tipo de red (Res. 2320, 2009)

Nivel de Complejidad	Red menor de distribución	Red secundaria	Red matriz
Bajo	-	1,60	1,40
Medio	-	1,60	1,40
Medio alto	-	1,45	1,30
Alto	1,70	1,45	1,30

III. MÉTODO

En el diagnóstico del sistema de tratamiento de agua potable del municipio de Santa Cruz de Mompo, se contó con la supervisión y colaboración de entidades oficiales (i.e., Servimompo, entidad prestadora del servicio de agua potable de la cabecera de municipal, y la Secretaría de Planeación e Infraestructura del municipio) y de los operarios actuales de la planta. El diagnóstico se llevó a cabo siguiendo esta estructura metodológica.

La bibliografía que permitió describir las características

geográficas, demográficas y sociales del municipio incluyó el plan de desarrollo y el POT del municipio, e información disponible en Internet.

Luego, se evaluó técnicamente el estado actual de la planta de tratamiento de la cabecera municipal con la recopilación de información sobre: planos, estado actual y diagnóstico de las estructuras hidráulicas existentes; población atendida, periodo de diseño inicial, problemas actuales de funcionamiento y record de análisis físico-químicos hechos en la planta los últimos meses. El diagnóstico del sistema de tratamiento de agua existente, incluyó el levantamiento topográfico de la PTAP; el reconocimiento del estado actual de las estructuras; el aforo del caudal de entrada a la PTAP; y la toma de muestras de turbiedad en cada uno de los elementos de los módulos de la planta, con el fin de determinar las eficiencias.

IV. DIAGNOSTICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

A. Diagnostico fisico operativo

Con base en la descripción de los distintos componentes del sistema de acueducto, se procedió a determinar el diagnóstico de los componentes, analizando su estado y su capacidad para atender las necesidades actuales y futuras de la población, teniendo en cuenta los lineamientos del Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico [RAS] (Res. 1096, 2000). La continuidad del servicio en el municipio de Mompo es de 18 horas; se bombea desde las 4:00 am hasta las 10 pm (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

1) Fuente de abastecimiento

La fuente de abastecimiento del acueducto es el denominado brazo de Mompo del río Magdalena. Con base en información suministrada por la estación 2502737 del *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* [IDEAM], ubicada sobre el brazo de Mompo en el municipio de Santa Ana (Bolívar, Colombia) se determina que este transporta caudales que oscilan entre 600m³/s –en época de verano– y 1200m³/s, volumen de agua suficiente para los requerimientos del acueducto municipal de Mompo (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

Esta fuente está garantizada para el suministro actual y futuro, dando estabilidad al suministro y seguridad a la población en cuanto a cantidad y continuidad; su calidad

en cambio, no es la mejor, pero con la optimización de la planta de tratamiento se puede obtener agua tratada de excelente calidad que alcance los parámetros de la norma, lo que asegura la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

Con el objeto de determinar las características físico-químicas y bacteriológicas del agua cruda captada, se tomaron muestras y se hicieron los análisis básicos solicitados en el decreto 2115 del 22 de Junio de 2007. De acuerdo con los resultados, aplicando la normatividad del RAS de 2000, se concluye que la fuente de abastecimiento presenta valores no permisibles de DBO5, turbiedad, coliformes totales y color, por lo que se hace necesario un tratamiento convencional, que consiste en desarenación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

2) Captación

La captación, por ser flotante, asimila la fluctuación de los niveles del río en las diferentes épocas del año. Consiste en una barcaza o planchón que alberga una bomba trifásica, en buen estado, acoplada a un motor nuevo, que aunque carece de algunos accesorios mecánicos y eléctricos, al igual que de ciertas válvulas, funciona bien, aunque presenta deficiencia en la manguera de succión, la cual carece de válvula de pie (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

La captación, a pesar de estar funcionando, presenta algunas limitaciones, ya que solo cuenta con una unidad de bombeo, lo que hace bastante vulnerable al sistema; otra limitante es la reducida zona de circulación para realizar maniobras, la que se debe ampliar (Consortio Plan Maestro de Bolívar (2009).

La barcaza es funcional, pero se podría optimizar, ampliándola, para operar holgadamente, y haciéndole mantenimiento oportuno que aminore los efectos corrosivos y alargue su vida útil (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

La bomba actual está bastante usada, lo que aumenta el grado de vulnerabilidad del sistema, por trabajar en forma continua bajo variaciones de voltaje; por tanto, se hace imperioso dotar a esta captación de un sistema eléctrico que garantice el funcionamiento pleno del equipo de impulsión, el cual quedaría totalmente garantizado si se instalara una bomba adicional que trabaje de manera alternada con la actual, con lo que se lograría, no solo reducir el esfuerzo a la bomba actual, sino aumentar el

grado de seguridad del sistema (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

La bomba de este equipo es una bomba centrífuga de una etapa, de aspiración simple horizontal y descarga vertical hacia arriba, succión en 8" y 8" en descarga. Esta bomba tiene un caudal de 120 L/s a una velocidad de 1.750rpm, con un motor acoplado de 50hp, pero está trabajando con un caudal de 71 L/s, el cual se determinó por las pruebas de presión que se realizaron es distintos puntos del municipio. Sin embargo, las proyecciones realizadas para 2009 indican que lo correcto es que esta bomba trabaje con un caudal de 105,68 L/s.

B. Conducción del agua cruda

La capacidad instalada actualmente para la tubería de Ø8" es de 60 L/s, lo que arroja una velocidad de operación de 1,85 m/s, valor fuera del rango de velocidad económica (1,25-1,50) m/s; mientras que el caudal real de operación es de 105 L/s, para una velocidad real de operación de 3,24 m/s; por tanto, se puede afirmar que este componente no fue instalado para operar bajo el criterio de velocidad económica, lo que ocasiona mayores gastos de operación. Se hace necesario el remplazo de la tubería existente por una de 14".

Como se observa en la Tabla 4, para tratar la demanda proyectada, dicha planta no sería suficiente, ya que a futuro (año 2034) se requiere tratar un caudal de 119,22 L/s. De esta forma, se requiere ampliar la capacidad de tratamiento para satisfacer el déficit existente al horizonte del proyecto, el cual se ubica en 59,22 L/s. (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

Tabla 4. Comparación de la capacidad instalada de la aducción con capacidad proyectada (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009)

Año	Capacidad de diseño	Capacidad real	Demanda proyectada L/s	Déficit L/s
2009			76,32	16,32
2014			83,44	23,44
2019	60 L/s	60 L/s	91,23	31,23
2024			99,74	39,74
2029			109,05	49,05
2034			119,22	59,22

1) Sistema de tratamiento

La planta de tratamiento de tratamiento de agua potable (PTAP) del Municipio es de tipo convencional. Inicialmente sus componentes incluían: captación, aducción, floculación hidráulica, sedimentadores

convencionales y filtración Rápida. Recientemente la administración municipal, a través de la empresa de servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo, realizó un proceso de optimización a la PTAP, anexándole una segunda captación, un desarenador convencional y, a la salida de los tres sedimentadores, láminas onduladas plásticas para que funcionen como placas inclinadas, quedando actualmente la planta con los siguientes componentes: captación No. 1 (Barcaza flotante con elevación mecánica); captación No. 2 (Captación fija con elevación mecánica); aducción No. 1 (Acople variable de 8" y Tubería de HD DE 8"); aducción No. 2 (Tubería HD de 8"); desarenador hidráulico tipo convencional; floculador hidráulico (tipo Alabama); sedimentador convencional (Tres unidades); filtración rápida (Tres unidades); y dosificación de sulfato y cloro gaseoso.

La calidad de agua suministrada por la PTAP actualmente presenta alta turbiedad, con valores que oscilan entre 13 y 14 NTU saliendo de PTAP, bajo cloro residual y presencia de coliformes fecales que exceden los valores del Decreto 475 de 1.998, en puntos tomados en los barrios occidentales, orientales y del sur del municipio, lo que genera una proliferación de enfermedades gastrointestinales con incidencia en la población infantil; esto se complementa con el deterioro que presentan los equipos de dosificación, tanto de sulfato de aluminio como de cloro, la no realización de monitoreo del caudal de entrada a la planta, y la no existencia de un laboratorio para realizar prueba de jarras y de sedimentación.

La planta funciona deficientemente en cuanto a capacidad instalada para cubrir la demanda actual y futura, es decir hidráulica y sanitariamente, por ende, es necesario optimizar y ampliar el sistema de tratamiento con el fin de reforzar las unidades y procesos actuales.

Se apunta a ampliar la capacidad instalada, hoy insuficiente, y a optimizar el proceso de tratamiento para reducir la vulnerabilidad y aumentar la seguridad del sistema, dotándolo con equipos de dosificación, para mezcla rápida y desinfección, y de laboratorio para pruebas fisicoquímicas –turbidímetro, floculador digital, medidor de temperatura y PH, conductímetro, colorímetro, tubos de ensayos, pipetas, buretas, probetas, erlenmeyer y matraz aforado– que permitan realizar un monitoreo diario de la PTAP y detectar fallas en la operatividad del sistema (Buelvas, 2009).

2) Evaluación de las unidades de tratamiento

El estudio de los parámetros hidráulicos de operación de la PTAP indica una perspectiva clara sobre la eficiencia de los procesos de tratamiento, ya que con ellos se determinan las condiciones de entrada y salida del agua en cada una de las unidades de tratamiento, así como del almacenamiento de lodos (Consortio Plan Maestro de Bolívar (2009).

La evaluación del proceso de tratamiento consistió en la realización de ensayos en los que se buscaba encontrar las condiciones o parámetros óptimos, con los que la PTAP debería estar operando, y compararlos con la situación actual, para así establecer el grado de eficiencia que de las unidades y obtener los parámetros básicos para el diseño de la optimización de la PTAP.

Actualmente la planta de tratamiento de agua potable trata un caudal de 106 L/s, pero debido a las pérdidas producidas en las válvulas solo produce un caudal de 100 L/s, lo que equivale a un volumen de 8640 m³/día (Consortio Plan Maestro de Bolívar, 2009).

3) Chequeo del caudal de entrada a la PTAP

La entrada del caudal a la PTAP se realiza por medio de un canal rectangular que comunica desarenador–mezcla rápida. Este se encuentra construido en concreto reforzado de 3.000 psi con una sección de 0,70 m de ancho, altura de 0,55 m y una longitud de 15,15 m. Los operarios no realizan la medición del caudal de entrada.

El canal rectangular presenta las siguientes medidas constructivas: ancho (b) = 0,70 m; altura (h) = 0,55 m; y longitud del canal (l) = 15,15 m.

Con base en estas medidas se calcularon los caudales de entrada a la PTAP en un monitoreo realizado durante un día de operación, colocando una regla metálica para medir la altura (m) del tirante en la parte final del canal, cada hora, para así tener una idea del comportamiento del caudal de entrada a las diferentes horas de consumo. La Tabla 5, muestra los resultados obtenidos.

El tiempo se calculó registrando el tiempo de recorrido que una bola de icopor gastó en desplazarse desde la salida del canal hasta el final, resultados registrados en la segunda columna., mientras que la velocidad se calculó dividiendo la longitud total del canal entre el tiempo de desplazamiento. Para efectos de cálculos se tomó la velocidad promedio de 0,41 m/s.

Tabla 5. Cálculo de la velocidad canal rectangular

Prueba	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1	37	0,41
2	38	0,4
3	36	0,42
4	37	0,41
5	37	0,41
6	37	0,41
7	36	0,42
8	38	0,4
9	37	0,41
10	36	0,42
Promedio velocidad m/s		0,41

Con la velocidad promedio del canal y la sección del canal se procede a calcular el caudal de ingreso a la PTAP monitoreada durante un día, lo que permite tener una idea del comportamiento del caudal a las diferentes horas de consumo. La Tabla 6 presenta el cálculo del caudal de ingreso a la PTAP a diferentes horas de consumo durante un día de operación.

Tabla 6. Caudal de entrada a la PTAP

Hora	Altura del tirante (m)	Área (m ²)	Q (m ³ /s)
6:00 a.m	0,38	0,27	0,111
7:00 a.m	0,38	0,27	0,111
8:00 a.m	0,38	0,27	0,111
9:00 a.m	0,37	0,26	0,107
10:00 a.m	0,38	0,27	0,111
11:00 a.m	0,36	0,25	0,103
12:00 p.m	0,36	0,25	0,103
01:00 p.m	0,36	0,25	0,103
02:00 p.m	0,37	0,26	0,107
03:00 p.m	0,37	0,26	0,107
04:00 p.m	0,37	0,26	0,107
05:00 p.m	0,37	0,26	0,107
06:00 p.m	0,38	0,27	0,111
07:00 p.m	0,38	0,27	0,111
08:00 p.m	0,37	0,26	0,107
09:00 p.m	0,36	0,25	0,103
10:00 p.m	0,35	0,25	0,103
11:00 p.m	0,35	0,25	0,103
12:00 p.m	0,35	0,25	0,103
01:00 a.m	0,35	0,25	0,103
02:00 a.m	0,35	0,25	0,103
03:00 a.m	0,36	0,25	0,103
04:00 a.m	0,37	0,26	0,107
05:00 a.m	0,37	0,26	0,107
Promedio caudal (m3/s)			0,106

Conociendo el caudal actual de PTAP se procede a calcular el caudal que realmente debe consumir la población del municipio con base en la proyección de la población, con un horizonte de 30 años, teniendo como punto de referencia los datos suministrados por el censo del DANE de 2005.

Tabla 7. Proyección población de Mompox

Año	Población promedio	Qmd (L/s)	QMD (L/s)	QMH
2009	23.858	33,41	43,43	69,49
2010	24.182	33,87	44,03	70,45
2011	24.508	34,32	44,62	71,39
2012	24.837	34,78	45,21	72,34
2013	25.170	35,25	45,83	73,33
2014	25.506	35,72	46,44	74,3
2015	25.844	36,19	47,05	75,28
2016	26.186	36,67	47,67	76,27
2017	26.531	37,16	48,31	77,3
2018	26.880	37,64	48,93	78,29
2019	27.232	38,14	49,58	79,33
2020	27.587	38,63	50,22	80,35
2021	27.945	39,14	50,88	81,41
2022	28.308	39,64	51,53	82,45
2023	28.673	40,16	52,21	83,54
2024	29.042	40,67	52,87	84,59
2025	29.415	41,19	53,55	85,68
2026	29.791	41,72	54,24	86,78
2027	30.171	42,25	54,93	87,89
2028	30.555	42,79	55,63	89,01
2029	30.943	43,33	56,33	90,13
2030	31.335	43,88	57,04	91,27
2031	31.730	44,44	57,77	92,43
2032	32.129	45,00	58,50	93,60
2033	32.533	45,56	59,23	94,77
2034	32.940	46,13	59,97	95,95
2035	33.352	46,71	60,72	97,15
2036	33.768	47,29	61,48	98,37
2037	34.188	47,88	62,24	99,58
2038	34.612	48,47	63,01	100,82
2039	35.041	49,07	63,79	102,06

De la Tabla 7 se pudo concluir que el caudal máximo diario (QMH) producido por la planta en 2009 fue de 69,49 L/s, operando en condiciones normales. La PTAP está diseñada para 50 L/s, lo que indica que si la planta operara en condiciones normales y la empresa prestadora del servicio minimizara las pérdidas técnicas, controlara los fraudes y cuantificara el consumo de agua potable en la población, la PTAP no estaría tan desfasada de la realidad.

El consumo de la PTAP para 2007 es de 106 L/s y para 2009, para una operación en condiciones normales, se calculó en 69,49 L/s, indicando una pérdida que supera casi el doble, un indicado de lo mal que está operando el sistema.

La capacidad de instalada de la PTAP es de 50 L/s y su capacidad real de operación es de 106 L/s, lo que demuestra que está operando al 212% de su capacidad instalada, afectando con ello los procesos y, por consiguiente, entregando agua de mala calidad, lo que se refleja en el alto grado de turbiedad del agua a la salida de

PTAP, con un valor que oscila entre 13 y 15 NTU, que está por encima del parámetro establecidos por el Decreto 475 de 1.998, que establece el límite superior en 5 NTU.

Los ensayos de tratabilidad realizados para la PTAP del municipio muestran los valores óptimos con los cuales deberían estar operando las unidades de tratamiento; de igual forma, dichos parámetros son los valores base que se deben tomar para realizar las ampliaciones de las unidades de tratamiento y de los diferentes procesos unitarios que realiza la PTAP (ver Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros óptimos de mezcla (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009).

Proceso unitario	Parámetro		
Dosificación	[Solución]	4,5 %	
	Dosis	1,5 ml/L	
Mezcla lenta	GRADIENTE	75 s ⁻¹	TIEMPO 30 s
			5 min
Coagulación-floculación	Zona 1	47,5 s ⁻¹	5 min
	Zona 2	39,5 s ⁻¹	15 min
	Zona 3	30,5 s ⁻¹	5 min
Sedimentación	Tiempo	15 min	
	Velocidad	0.0064 cm/seg	

C. Evaluación hidráulica de las unidades de tratamiento

Anteriormente se establecieron las variables fisicoquímicas de los procesos unitarios, a continuación se presentan los resultados concernientes a las características hidráulicas, como tipos de flujo predominantes, zonas muertas, cortocircuitos, y flujo de recirculación predominantes en las unidades de tratamiento.

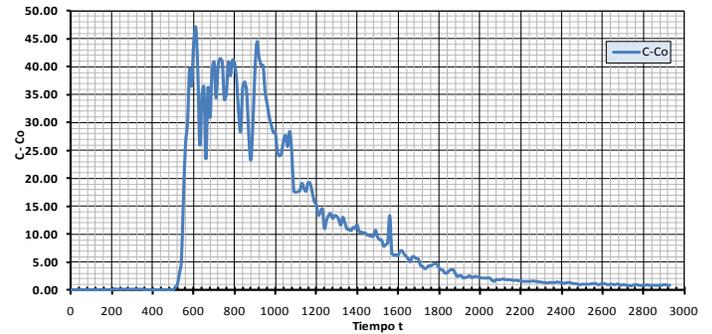
Para estas evaluaciones es importante determinar los tiempos de retención, teórico y real, de las unidades que ofrecen las pruebas con trazadores; el trazador que se utilizó para estas pruebas fue la sal común (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009).

1) Desarenadores

En esta unidad se sedimentan las partículas de gran tamaño (e.g., los sólidos inorgánicos); fue diseñada para un caudal de 60 L/s. Para evaluar el tiempo de retención de esta unidad se realizó un ensayo de trazadores.

La Figura 1 muestra el comportamiento del trazador a lo largo de la carrera de desarenación; se observa como a los 520 segundos empieza a registrar la salida del trazador, mientras que a los 923 segundos registra el paso del 50%; este último es el tiempo de retención real de la unidad. De igual forma el comportamiento que empieza a registrar el trazador a partir de este momento revela la existencia de zonas o espacios muertos dentro de la unidad.

Figura 1. Cálculo Ensayo de Trazadores (Sedimentación) (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009)



Por otra parte, en las Tablas 9 y 10, se identifica que el flujo de tipo pistón (P) es de 85,70 % y el flujo mezclado (M) es de 14 %, lo que indica que el desarenador evaluado cumple parcialmente con el parámetro que indica que el flujo pistón debe ser mayor que el mezclado. La eficiencia de esta unidad es del 47 %.

Tabla 9. Tipos de flujo y espacios muertos (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009)

T1/To	0,25		Puntos Corte Tangente Inicial
T2/To	1,44		Puntos Corte Tangente Final
TANG A	1,116		Tangente Línea Tendencia
P	0,3908	39,08 %	Flujo Pistón
M	0,6092	60,92 %	Flujo Mezclado
M	0,3604	36,04 %	Espacios Muertos

Tabla 1. Cálculo del predominio del Flujo (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009)

Ti	510	Tiempo en que empieza a registrarse el trazador
Tpmáxconc.	610	Tiempo Máxima concentración Trazador
Tf	2930	Tiempo Final de Operación Trazador
Tm50%	923	Tiempo Mediando al paso 50% trazador
To	1830	Tiempo de Retención Teórico
T1	457	Tiempo Inicio Punto de Corte Tangente
T2	2635	Tiempo Final Punto de Corte Tangente
Ti/To	0.279	Medición de Corto Circuitos Grandes
T1/To	0.250	Puntos Corte Tangente Inicial
Tm/To	0.504	Relación T. Paso 50% trazador/T. retención teórica
Tp/To	0,333	Relación T. Paso máx. trazadores/T. retención teórica
Tc/To		Relación T.c / T. retención teórica
Tb/To		Relación T.b / T. retención teórica.
T10	616	Tiempo en el que pasa el 10% del trazador
T90	1597	Tiempo en el que pasa el 90% del Trazador
Cálculo predominio del tipo de flujo		
E= (Tf-Tp)-Tp- Ti)/To	0,6558	Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2,3 para flujo mezclado ideal.
Im= t90/t10	2,593	Índice de Morril

En la Tabla 11 se consiga la evaluación del desarenador por el método de curva de tendencia.

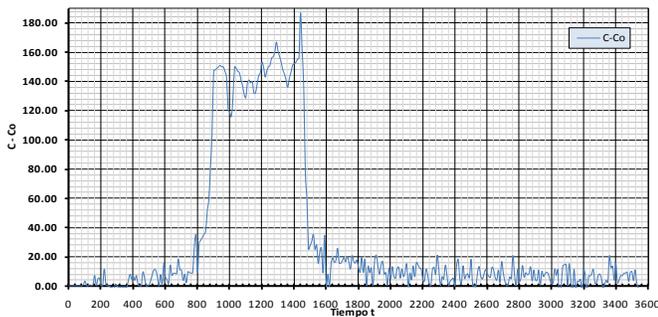
Tabla 11. Evaluación de la unidad por el método de curva de tendencia (Consorcio Plan Maestro Bolívar, 2009)

Criterio	Consecuencia
$T_i/T_o = 0,279$	Este criterio establece que el desarenador tiene un paso bastante directo del agua desde la entra hasta la salida de la unidad, existe cortocircuitos hidráulico, la consecuencia de esto de una mala distribución del flujo en la entrada de la unidad.
$T_m/T_o = 0,504$	Si la relación es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de t_m , haciendo $t_m > t_o$. Con esta relación se corrobora la existencia de cortocircuito hidráulico y se descarta la existencia de zonas muertas.
$T_p/T_o = 0,333$	Indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo de pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado. Cuando la relación t_p/t_o se aproxima a 1 y $t_i/t_o > 0,5$, se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado. Estableciéndose entonces que para el desarenador predomina el flujo mezclado, corroborando los cálculo de según Wolf y Resnick.
$E = \frac{(T_f - T_p) - T_p - T_i}{T_o} = 0,6558$	Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2,3 para flujo mezclado ideal.
$I_m = T_{90}/T_{10} = 2,593$	Establece el índice de dispersión de las particular dentro de la unidad, para un flujo pistón esta relación es 1, como para este caso esta relación es mayor de uno existe predomina el flujo mezclado.

2) Floculador

La floculación la realiza un floculador hidráulico Tipo Alabama. Esta dividido en doce cámaras y sus dimensiones son 2,2 metros de largo, 2,0 metros de ancho y una altura promedio de 1,9 metros de lamina de agua; los codos son de 20 pulgadas en PVC novafort. Los resultados del ensayo de trazadores que realizó a esta unidad se presentan a continuación (ver Figura 2 y Tablas 12 y 13).

Figura 2. Variación de la conductividad en el floculador (Consorcio Plan Maestro Bolívar, 2009)



La distribución que hace el trazador para esta unidad, establece los siguientes parámetros, el tiempo en el que empieza a registrarse la salida del trazador es a los 600 segundos y el tiempo en el que pasa la cantidad del trazador es a los 1440 segundos; esto establece que la capacidad volumétrica de la unidad es adecuada para el caudal que está entrando. Esto además revela la existencia

de dos tipos de flujos (flujo pistón y flujo mezclado) y un pequeño porcentaje de espacios muertos; los cálculos de estos tipos de flujos se presentan en la Tabla 12.

Tabla 22. Cálculo según Wolf y Resnick (Consorcio Plan Maestro Bolívar, 2009)

Tipos de flujo y espacios muertos			
T_1/T_o	0,56		Puntos Corte Línea Tangencial Inicial
T_2/T_o	1,52		Puntos Corte Línea Tangencial Final
TANG A	1,710		Tangente Línea Tendencia
P	0,6877	%	68,77 Flujo Pistón
M	0,3123	%	31,23 Flujo Mezclado
M	0,1856	%	18,56 Espacios Muertos

Los cálculos, según el método Wolf y Resnick, establecieron las siguientes características para el flujo del Floculador: un flujo pistón del 68.77%, un flujo mezclado de 31.27 %, y un porcentaje muy pequeño de espacios muertos.

Los cálculos del tipo de flujo según la curva de tendencia se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Cálculo del predominio del Flujo Según la Curva de Tendencia (Consorcio Plan Maestro Bolívar, 2009)

T_i	510	Tiempo Inicio Operación Trazador
$T_{p\text{máxconc.}}$	1440	Tiempo Máxima concentración Trazador
T_f	3540	Tiempo Final de Operación Trazador
$T_{m50\%}$	1227	Tiempo Mediando al paso 50% trazador
T_o	927	Tiempo de Retención Teórico
1	519	Tiempo Inicio Punto de Corte Tangente
2	1409	Tiempo Final Punto de Corte Tangente

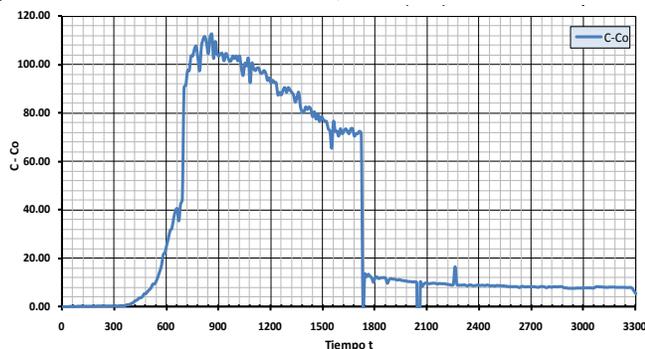
$T_i/T_o = 0,550$	Este criterio establece que cuando la relación es menor de 0.30 tiene un paso bastante directo del agua desde la entra hasta la salida de la unidad, dado que para este caso la relación es mayor de 0.550 se descarta la existencia de cortocircuitos hidráulicos.
$T_m/T_o = 1,324$	Si la relación es menor que la unidad, existen cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente y aumenta el valor de t_m , haciendo $t_m > t_o$. Con esta relación se descarta la existencia corto circuitos hidráulicos y se establece la existencia de zonas muertas, tal como lo establece el cálculo según Wolf y Resnick.
$T_p/T_o = 1,553$	Indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo de pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado. Cuando la relación t_p/t_o se aproxima a 1 y $t_i/t_o > 0,5$, se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado. Tal como sucede en este caso, corroborando los cálculo de según Wolf y Resnick.
$E = \frac{(T_f - T_p) - T_p - T_i}{T_o} = 0,162$	Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2,3 para flujo mezclado ideal.
$I_m = T_{90}/T_{10} = 2,132$	Establece el índice de dispersión de las particular dentro de la unidad, para un flujo pistón esta relación es 1, como para este caso esta relación es mayor de uno existe predomina el flujo mezclado.

3) Sedimentadores

Para la evaluación del proceso de sedimentación se tuvo en cuenta las condiciones hidráulica, la eficiencia de las placas, y aspectos constructivos. La planta opera con doce sedimentadores diseñados para una capacidad de 50 L/s cada uno, pero, teniendo en cuenta que el caudal de entrada es de 108 L/s y que la distribución del caudal es igual para todos, se asume un caudal de entrada real a cada uno de 36 L/s. Sus características son de baja tasa convencional de flujo ascendente y un vertedero de reboso igual al ancho del sedimentador (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009).

Este ensayo fue realizado con el objetivo de evaluar los tipos y porcentajes de los flujos (comportamiento de la masa de agua dentro del sedimentador), así como el tiempo de retención real de la unidad. Los resultados del ensayo se presentan a continuación.

Figura 3. Variación de la conductividad en el sedimentador (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009)



La Figura 3 muestra un tiempo de 360 segundos, como aquel en el que empieza a registrarse la salida del trazador, lo cual da un primer indicio de la existencia de cortocircuitos hidráulicos; de igual forma, la existencia de un pequeño porcentaje de espacios muertos, debido a los picos que presenta la curva al final de la salida del trazador (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009).

Tabla 14. Cálculo según el Método de Wolf y Resnick (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009)

Tipos de flujos y espacios muertos			
T1/To	0,17	Puntos Corte Tangente Inicial	
T2/To	0,98	Puntos Corte Tangente Final	
TANG A	2,861	Tangente Línea Tendencia	
P	0,5279	52,79	Flujo Pistón
M	0,4721	47,21	Flujo Mezclado
M	0,6780	67,80	Espacios Muertos

De acuerdo con la Tabla 14, el sedimentador 1 presenta los siguientes tipos de flujos: pistón 52,79% y mezclado

47,21%. Asimismo, un porcentaje bastante alto de espacios muertos (67,80%). Estas unidades presentan eficiencias muy bajas, lo que en parte se debe a la existencia de cortocircuitos hidráulicos y al alto porcentaje de flujo mezclado. Los cálculos del tipo de flujo según la curva de tendencia se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Evaluación de la Unidad por el método de curva de tendencia (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009)

Ti	400	Tiempo Inicio Operación Trazador
Tp [máxima]	860	Tiempo Máxima concentración Trazador
Tf	3300	Tiempo Final de Operación Trazador
Tm50%	1187	Tiempo Mediando al paso 50% trazador
To	3785	Tiempo de Retención Teórico
T1	643	Tiempo Inicio Punto de Corte Tangente
T2	3709	Tiempo Final Punto de Corte Tangente
T1/To	0,17	Puntos Corte Tangente Inicial
Ti/To	0,106	Medición de Corto Circuitos Grandes
Tm/To	0,314	Relación T. Paso 50% trazador/T. retención teórico
Tp/To	0,227	Relación T. Paso máx. trazador/T. retención teórico
Criterios de determinación de predominio del tipo del flujo		
Tc/To		Relación T.c / T. retención teórico
Tb/To		Relación T.b / T. retención teórico
T10	750	Tiempo en el que pasa el 10% del trazador
T90	1910	Tiempo en el que pasa el 90% del Trazador
Cálculo predominio del tipo de flujo		
$E = (Tf - Tp) - Tp - Ti / To$	0,3118	Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2,3 para flujo mezclado ideal.
$Im = t90/t10$	2,547	Indicé Morrill, representa Indicé dispersión

4) Filtros

La planta tiene tres filtros de rata variable declinante escalonada, el filtro permite tener una variación de nivel de agua, de tal manera que, a medida que se vaya colmatando, el nivel va ascendiendo hasta llegar al máximo permisible por la hidráulica de la planta.

Según se diseñó la capacidad de los filtros es de 20 L/s; uno de los filtros no está en funcionamiento debido a que la planta se encuentra sobrecargada, lo cual colmata rápidamente los filtros reduciendo igual con rapidez su eficiencia (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2009).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Captación y aducción de agua cruda. Se recomienda realizar mantenimiento y adecuación de la barcaza, suministrar un equipo de bombeo adicional y aducción, al igual que de las instalaciones de la caseta de control, que también se debe optimizar para garantizar la operación de los equipos, la

circulación del personal y la funcionalidad de los elementos eléctricos. Además, se debe ampliar la capacidad instalada, para lo cual es necesario cambiar la tubería actual de 8" por una de 10", que asegure la continuidad del bombeo y el sistema de abastecimiento.

Planta de tratamiento. Se sugiere rehabilitarla, realizando mantenimiento general a todas las unidades actuales, como floculadores, sedimentadores y filtros, sustituyendo algunos elementos eléctricos y dotando a la planta de los equipos de laboratorio para control de procesos y equipos para suministro de coagulante y desinfectante. De igual forma, se debe ampliar la planta de tratamiento con el propósito de atender las necesidades futuras de acuerdo con la demanda proyectada, de similares características y de igual capacidad al que está instalado.

Estación de bombeo de agua tratada. Se recomienda el mantenimiento de los equipos de impulsión de agua tratada, incluyendo el sistema eléctrico y los accesorios hidráulicos, tanto de las bombas como de la conducción. Asimismo, se recomienda construir una estación de bombeo de agua tratada y dotarla de equipo de bombeo acorde con la demanda proyectada, con todos sus accesorios, para impulsar el agua tratada hasta los tanques de distribución.

Tanque de almacenamiento. Se propone realizar mantenimiento y limpieza de los tanques de almacenamiento y distribución existentes, incluyendo su estructura de soporte. También adecuar las conexiones hidráulicas y dotarlas de válvulas, de tal forma que se facilite el control del flujo hacia las redes de distribución, e incrementar la reserva de los tanques de almacenamiento a un nivel suficiente para cubrir la demanda actual y proyectada.

Redes de distribución. La cobertura en redes de distribución es del 85%, lo que significa que se deberá ampliar a un 100%, instalando y cambiando las tuberías de AC, HG y HF instaladas actualmente. Se recomienda realizar un catastro de redes para conocer la configuración real de este componente, luego programar mantenimiento del sistema de redes y dotarlas de válvulas para sectorización del servicio y control de *mantenimientos* y reparaciones desde el punto de vista de intervenciones parciales. También se debe restituir todas las redes de AC, HG y HF que hacen parte del sistema de distribución actual en diámetros de 2", 3", 4", 6", 8" y 10" (16.350 m) por tubería de PVC.

VI. REFERENCIAS

- Buelvas, B. (2009). Optimización y ampliación del sistema de redes de acueducto de los barrios La Unión, Villa de Leyva, 1 de octubre, 1 de Julio y Santa María del Suán y Planta de Tratamiento de la Cabecera Municipal de santa Cruz de Mompos. Proyecto de prestación de servicio.
- Consorcio Plan Maestro de Bolívar. (2009). Elaboración de los planes maestros de los sistemas de acueducto de los municipios del departamento de Bolívar, Grupo 1 y Grupo 2 [Informe Final Municipio de Mompos].
- Decreto 475 de 1998. (1998, marzo 16). Normas técnicas de calidad de agua potable. *Diario Oficial No. 43259*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Resolución 1096 de 2000 (2000, noviembre 19). Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. *Diario Oficial No 44242*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Resolución 2115 de 2007 (2007, diciembre 16). Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. *Diario Oficial No. 43221*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Resolución 2320 de 2009. (2009, dic.4). Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico. *Diario Oficial No. 47.553*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación floculación de una planta tratamiento de agua potable*. Universidad Nacional de Colombia: Medellín, Colombia

CURRÍCULOS

Candelaria Tejada Tovar. Candidata a Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Cartagena (Colombia). Magíster en educación, Universidad del Norte (Colombia). Especialista en Química analítica, Universidad de Cartagena. Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander (Colombia). Profesora de tiempo completo y docente del grupo de investigación GIPIQ de Ingeniería Química (Universidad de Cartagena). Línea de investigación: remoción de metales en efluentes industriales. Actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Procesos Ambientales y Biotecnológicos en el Programa de Ingeniería Química, liderando la línea de investigación de *Bioremediación de aguas residuales*.

Ángel Villabona Ortiz. Candidato a Magíster en Ingeniería Ambiental y Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cartagena. Ingeniero Químico de la Universidad Industrial de Santander. Profesor de tiempo completo y coordinador de la especialización en Ingeniería Sanitaria y Ambiental del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena. Se encuentra adelantando proyectos para el uso de biomásas para el tratamiento de aguas oleosas y trabaja en la búsqueda de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas.

Benjamín Buelvas Lidueñas. Ingeniero civil, especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Ingeniero consultor. Investigador invitado al grupo GIPIQ del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena.