

## Informe final de la evaluación de la planta de tratamiento de agua de la ciudad de Divinópolis, en el Estado de Minas Gerais, Brasil

Ing. Lidia Cánepa de Vargas

Asesora en Tratamiento de Agua para Consumo Humano, CEPIS



Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias de Ambiente  
División de Salud y Ambiente  
Organización Panamericana de la Salud  
Oficina Sanitaria Panamericana • Oficina Regional de la  
Organización Mundial de la Salud

Lima

1999

**Informe final de la evaluación de la planta de tratamiento de agua  
de la ciudad de Divinópolis, en el Estado de Minas Gerais, Brasil**

**Ing. Lidia Cánepa de Vargas**  
**Asesora en Tratamiento de Agua para Consumo Humano, CEPIS**



Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias de Ambiente  
División de Salud y Ambiente  
Organización Panamericana de la Salud  
Oficina Sanitaria Panamericana • Oficina Regional de la  
Organización Mundial de la Salud

Lima

1999

## ÍNDICE

	<b><u>Página</u></b>
<b>1. Antecedentes.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo .....</b>	<b>1</b>
<b>3. Ubicación .....</b>	<b>1</b>
<b>4. Distribución del sistema .....</b>	<b>1</b>
4.1 Mezcla rápida .....	1
4.2 Caja de distribución a las unidades de floculación-decantación .....	2
4.3 Floculadores-decantadores .....	2
4.4 Filtros .....	2
<b>5. Calidad de agua cruda y eficiencia del sistema .....</b>	<b>3</b>
<b>6. Evaluación de componentes de la planta .....</b>	<b>3</b>
6.1 Mezclador .....	3
6.2 Distribución de caudal .....	4
6.3 Floculadores .....	4
6.4 Decantadores .....	7
6.5 Filtros .....	9
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>9</b>
7.1 Mezcla rápida .....	9
7.2 Interconexión mezcla-floculación .....	10
7.3 Floculadores-decantadores .....	10
7.4 Filtros .....	11
<b>8. Recomendaciones .....</b>	<b>11</b>

Anexo 1 – Ilustraciones

## INFORME TÉCNICO 485

**Fecha :** 26 de mayo de 1999

**Autor :** Ing. Lidia Cánepa de Vargas, Asesora en Tratamiento de Agua para Consumo Humano

**Asunto:** Informe final de la evaluación de la planta de tratamiento de agua de la Ciudad de Divinópolis en el Estado de Minas Gerais, Brasil

---

### 1. Antecedentes

La Compañía de Saneamiento de Minas Gerais (COPASA), solicitó la colaboración del CEPIS para efectuar la evaluación de una planta de filtración rápida de 150 l/s, construida en ferrocemento.

### 2. Objetivo

Evaluar las condiciones hidráulicas y la eficiencia de este sistema de tratamiento mediante filtración rápida, cuyas unidades han sido proyectadas en forma cilíndrica para ser construidas en ferrocemento.

### 3. Ubicación

La Planta de Divinópolis se encuentra ubicada en la ciudad del mismo nombre, a dos horas de Belo Horizonte, en el Estado de Minas Gerais, Brasil.

### 4. Descripción del sistema

Esta planta de tratamiento fue diseñada por el personal de COPASA para un caudal de 150 l/s. La evaluación se efectuó con caudales variables entre 149 y 150 l/s.

#### 4.1 Mezcla rápida

La unidad tiene forma cilíndrica y en su interior se ha ubicado un vertedero triangular. En el chorro que cae del vertedero se realiza la dosificación de sulfato de aluminio en forma puntual (un solo chorro). La coagulación es controlada mediante un zetámetro. El control del caudal de agua cruda y tratada, así como de la calidad del agua producida, también se controla mediante instrumental automático. (Foto N°1, **Anexo 1**).

#### **4.2 Caja de distribución a las unidades de floculación- decantación**

La unidad tiene forma circular y el agua coagulada ingresa mediante una tubería de 400 mm. De la caja salen dos tuberías del mismo diámetro que reparten el caudal a las dos unidades de floculación-decantación.

#### **4.3 Floculadores-decantadores**

Esta unidad tiene forma circular y un diámetro de 20 m. La tubería de agua coagulada llega al centro de la unidad donde se inicia un floculador de tipo hidráulico de pantallas de flujo vertical. Esta unidad tiene la forma de un serpentín de 8.70 m de diámetro (Foto N°1). De acuerdo a lo indicado por el personal de la planta, todos los orificios de paso entre los compartimientos del floculador están ubicados en el fondo; esto no se pudo comprobar porque no estaban disponibles los planos hidráulicos del proyecto, ni fue posible vaciar la unidad en el tiempo disponible.

El diseño de los dos decantadores es diferente, uno es de flujo radial y el otro longitudinal:

- El decantador 1 es de flujo radial. Se ha colocado una cortina perforada rodeando al floculador con una hilera de 48 orificios de 4" de diámetro ubicados en la parte superior y que con el caudal de diseño estarían produciendo un gradiente de velocidad de  $22 \text{ s}^{-1}$ . La tasa superficial de diseño de la unidad es de  $22 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  y la tasa de recolección de  $0.41 \text{ l/s/m}$ .
- El decantador 2 es de flujo longitudinal y el agua avanza rodeando al floculador. La salida de la unidad está compuesta por un canal y una pantalla perforada, dispuestos en forma radial. La pantalla tiene 84 orificios de 4" de diámetro ubicados en cuatro hileras. El gradiente de velocidad que se produciría al pasar el caudal de diseño es de  $9.5 \text{ s}^{-1}$ . La pantalla está ubicada en el sentido del radio de la circunferencia y el flujo avanza rodeando a la unidad hasta encontrar los vertederos de recolección ubicados en el extremo final, colindantes con el canal de entrada. La tasa superficial de diseño de la unidad es de  $21.65 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  y la tasa de recolección de  $3 \text{ l/s/m}$ .

#### **4.4 Filtros**

Las aguas colectadas de las unidades de decantación ingresan a una cámara de distribución de forma cilíndrica, desde la cual se distribuye el caudal hacia una batería de cinco filtros rápidos de tasa declinante (Foto N°2). Las tuberías de agua filtrada de las cinco unidades llegan a una cámara común que las interconecta, haciendo posible que un filtro se lave con el flujo que produce el resto de la batería. Cada unidad tiene 3.5 m de diámetro y ha sido diseñada con una tasa promedio de filtración de  $270 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  y una velocidad de lavado de  $0.935 \text{ m/min}$ .

El lecho filtrante tiene una altura de 0.60 m, es doble de antracita (0.40 m) y arena (0.20 m). De acuerdo al proyecto, el tamaño efectivo de la antracita es de 0.8 mm. El tamaño menor de 0.71 mm, el mayor de 1.8 a 2.0 mm y el coeficiente de uniformidad de 1.4 a 1.7. La arena tiene un tamaño efectivo de 0.5 a 0.6 mm. El tamaño menor de la arena es de 0.42 mm, el tamaño mayor de 1.68 mm y el coeficiente de uniformidad de 1.4 a 1.6.

La capa soporte de grava tiene una altura total de 0.40 m de material con las siguientes especificaciones:

Capas	Tamaño (mm)
1	25.4 a 12.7
2	12.7 a 6.35
3	6.35 a 3.36
4	3.36 a 1.68

El drenaje está formado por una placa perforada con orificios de ½" separados 7 cms centro a centro.

## 5. Calidad de agua cruda y eficiencia del sistema

No llevan control de la calidad del agua cruda, por lo que no fue posible determinar las variaciones de calidad de la fuente en cada estación.

El día que se inició la evaluación, la calidad del agua cruda y tratada era la siguiente:

Agua	Turbiedad (UNT)	Color (UC)
Cruda	11.00	45.00
Sedimentada	2.60	5.00
Filtrada	0.15	0.00

La eficiencia de remoción de turbiedad era de 98.6% y de color 100%. No se encontró resultados sobre pruebas bacteriológicas, ya que esta información no se archiva en la planta.

## 6. Evaluación de componentes de la planta

### 6.1 Mezclador

La altura de caída del vertedero es muy pequeña. Haciendo un cálculo teórico el gradiente de mezcla que se está obteniendo debe ser del orden de  $190 \text{ s}^{-1}$ . La solución de coagulante se aplica en forma puntual.

## 6.2 Distribución de caudal

La distribución de caudales a los floculadores-decantadores se determinó mediante trazadores. El siguiente cuadro indica los resultados de esta prueba.

Cuadro

Decantador	Porcentaje de Trazador que pasó	Caudal (l/s)
1	44%	65.53
2	56%	83.47

## 6.3 Floculadores

La unidad N°1 ha sido diseñada para un período de retención teórico de 24 minutos y, debido a la desigual distribución de caudales, este tiempo es de 27.6 minutos. En la prueba de trazadores se determinó que el tiempo real de retención de la unidad es de 22 minutos (Figura 6.3.1). La forma de la curva está indicando predominio de flujo de pistón.

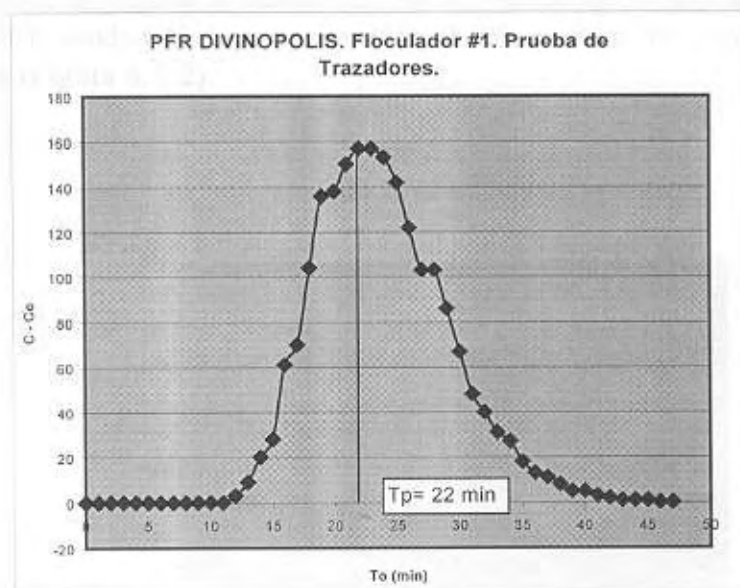


Figura 6.3.1 Determinación del tiempo real de retención por el método convencional

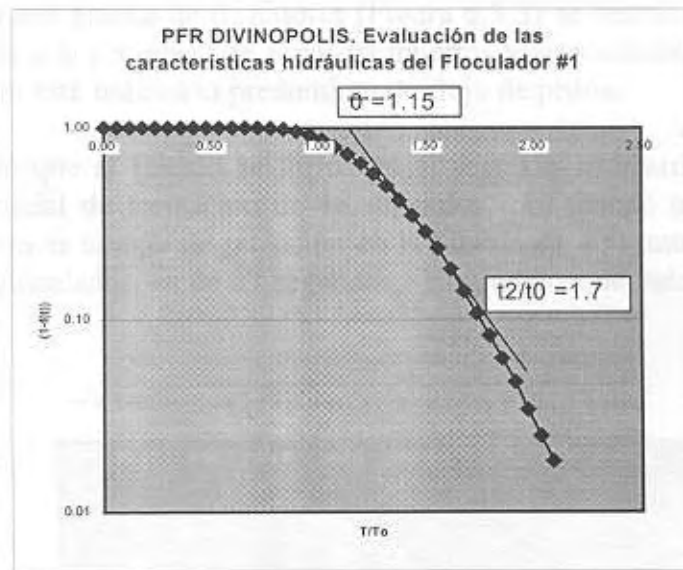


Fig. 6.3.2 Evaluación de las características hidráulicas del floculador

El análisis de la prueba de trazadores por el método de Wolf y Resnick indicó que el 91% del flujo en la unidad N°1 es tipo pistón, el 9% es flujo mezclado y hay un 43% de espacios muertos (Figura 6.3.2).

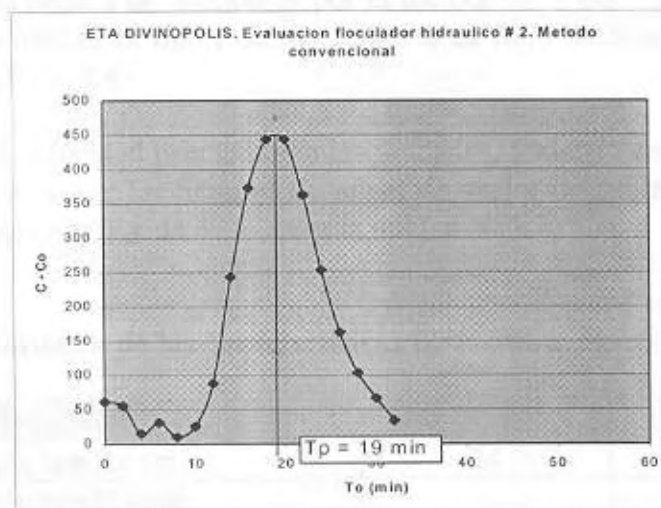


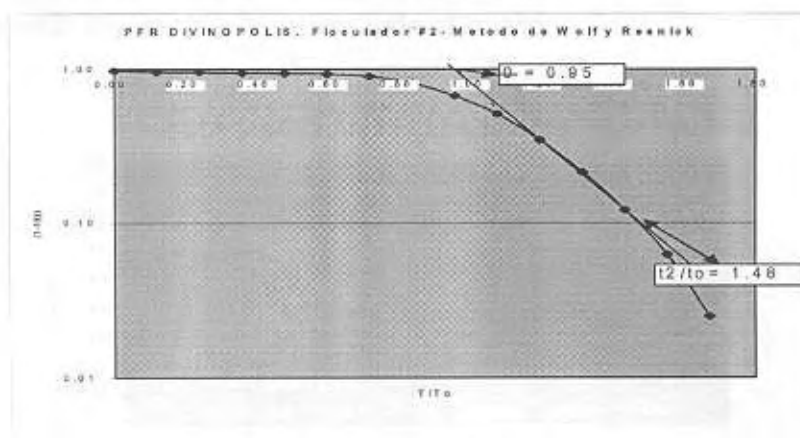
Fig. 6.3.3 Tiempo real de retención de la unidad determinado por trazadores

La unidad N°2 ha sido diseñada para un período de retención teórico de 26 minutos y, debido a que está recibiendo 6% adicional de caudal, este tiempo teórico viene a ser de 24



minutos. Mediante una prueba de trazadores (Figura 6.3.3) se determinó que el tiempo real de retención, debido a la presencia de espacios muertos y cortocircuitos, es de 19 minutos. La forma de la curva está indicando predominio de flujo de pistón.

Se comprobó que el flóculo se forma en el segundo compartimiento de la unidad, siendo el tiempo inicial de formación de 16 segundos. El tiempo total de formación del flóculo, considerando el tiempo de retención en la tubería de 400 mm que conduce el agua coagulada hasta el floculador, es de 27 segundos. El gradiente de velocidad en la tubería es de  $67 \text{ s}^{-1}$ .



**Fig. 6.3.4 Características hidráulicas del floculador N°2**

El análisis de la prueba de trazadores por el método de Wolf y Resnick indicó que el 80.5% del flujo en la unidad es tipo pistón, el 19.5% es flujo mezclado y hay un 18% de espacios muertos (Figura 6.3.4).

El gradiente de velocidad promedio en las unidades, teniendo en cuenta la pérdida de carga indicada en los planos y los tiempos de retención reales determinados por trazadores, es de  $37 \text{ s}^{-1}$  para la unidad N°1 y de  $40 \text{ s}^{-1}$  para la unidad N°2.

**Cuadro 1. Resumen de las características hidráulicas de los floculadores**

Floculador	N°1	N°2
Tiempo de retención teórico (min)	24	26
Tiempo de retención modificado por desigual distribución de caudales (min)	27.6	24
Tiempo real de retención (min)	22	19
Gradiente de velocidad teórico promedio	37	40
Porcentaje de flujo de pistón	83	81.5
Porcentaje de flujo mezclado	17	19.5
Porcentaje de espacios muertos	39	18

#### 6.4 Decantadores

**Decantador N°1:** En esta unidad el flujo se desplaza en forma radial. La curva de la Figura 6.4.1, que indica el paso del trazador a lo largo del tiempo, está registrando la presencia de un cortocircuito a los 25 minutos y un tiempo de retención real de 70 minutos. El cortocircuito se puede observar en el flujo preferencial que se establece en la superficie de la unidad, entre los orificios de la cortina y los vertederos de recolección. La larga cola que presenta la curva indica que existe un gran volumen de espacios muertos en la unidad, razón por la que el trazador demoró en salir. Estos espacios muertos están ubicados por debajo de los orificios de entrada. Como el tiempo disponible para la evaluación era muy corto, no fue posible esperar a que saliera todo el trazador.

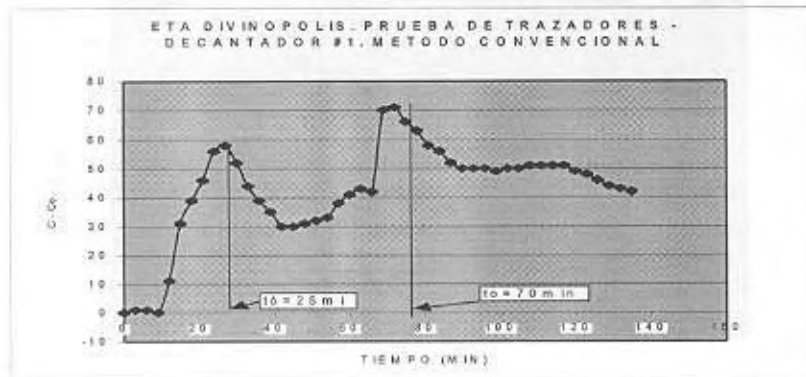


Figura 6.4.1 Determinación del tiempo real de retención

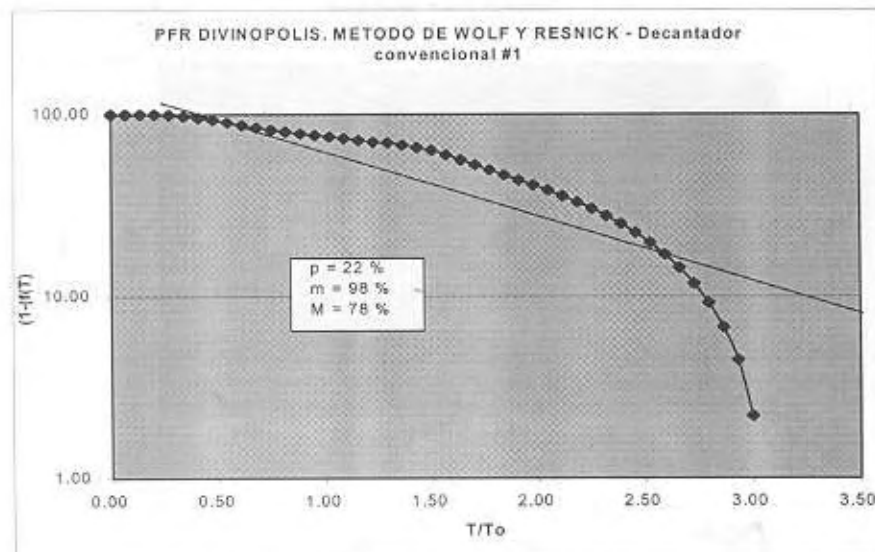


Figura 6.4.2 Características hidráulicas de la unidad

Procesando la información que permite la curva de  $(1-F(t))$  versus  $T/T_o$  (Figura 6.4.2), se obtiene que la unidad presenta 22% de flujo de pistón, 78% de flujo mezclado y 98% de espacios muertos.

Decantador N°2: Esta es la unidad que tiene flujo longitudinal rodeando al floculador. La curva de paso del trazador (Figura 6.4.3) esta vez está indicando que el tiempo de retención real de esta unidad es de 39 minutos. La larga cola de la curva está indicando nuevamente la presencia de espacios muertos en la unidad.

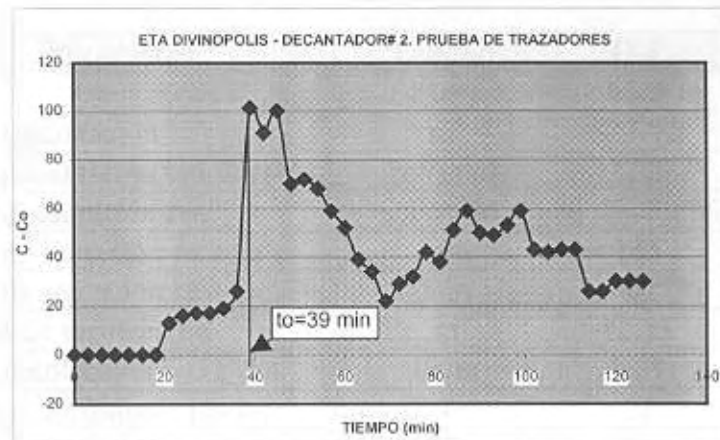


Figura 6.4.3 Tiempo de retención real del decantador N°2

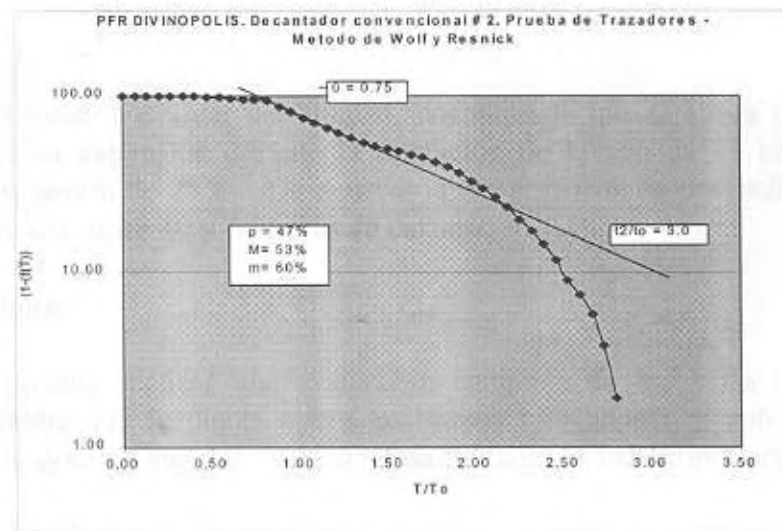


Figura 6.4.4 Características hidráulicas del decantador N°2

De acuerdo con la información que suministra la curva de  $(1-F(t))$  versus  $T/T_o$  (Figura 6.4.4), el porcentaje de flujo de pistón en esta unidad es de 47%, el de flujo mezclado 53% y tiene 73% de espacios muertos.

La estructura de entrada presenta 48 orificios de 4" de diámetro, distribuidos en cuatro hileras, que están produciendo un gradiente de velocidad de  $25.75 \text{ s}^{-1}$ .

En el Cuadro 6.4.1 se resumen las características de las dos unidades.

**Cuadro 6.4.1 Resumen de condiciones hidráulicas en los decantadores**

Parámetro	Unidad	D-1	D-2
Caudal	l/s	65.5	83.5
Área de decantación	$\text{m}^2$	327.75	319.3
Tasa de decantación teórica (*)	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$	17.3	22.6
Tasa de decantación real	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$	86.4 y 30.85	55.4
Tiempo de retención teórico	min	125	95.6
Tiempo de retención real	min	70	39
Longitud de recolección	m	12.11	25
Tasa de recolección	l/s/m	1.31	3
Porcentaje de flujo de pistón	%	22	47
Porcentaje de flujo mezclado	%	78	53
Porcentaje de espacios muertos	%	98	73

(\*) Tasa afectada por la desigual distribución de caudales.

## 6.5 Filtros

Sólo se alcanzó a evaluar una unidad, encontrando que la altura del medio filtrante era de 0.60 m y la expansión durante la operación de lavado de 15 cms, resultando un porcentaje de expansión de 25%. De acuerdo a los registros de operación, estas unidades están proporcionando entre 40 y 50 horas de carrera.

## 7. Conclusiones

No fue posible realizar una evaluación completa de todas las unidades pero, en general, es evidente que la planta opera en buenas condiciones y con algunas pequeñas modificaciones se podrían superar los problemas hidráulicos más importantes:

### 7.1 Mezcla rápida

- La altura de caída del vertedero es muy pequeña y la turbulencia para mezclar el coagulante es insuficiente.
- La aplicación del coagulante se efectúa en forma puntual.

- La coagulación es buena y la formación del flóculo es muy rápida.
- La distribución de caudal a los dos floculadores-decantadores no es uniforme; la unidad N°1 está recibiendo el 44% del caudal y la N°2 el 56% del caudal total.

### 7.2 *Interconexión mezcla-floculación*

- Como consecuencia de esta desigual distribución de flujo, el gradiente de velocidad que produce la tubería que conduce el agua coagulada a la unidad N°1 es de  $46 \text{ s}^{-1}$  y el que produce la tubería de conducción a la unidad N°2 es de  $67 \text{ s}^{-1}$ . Dependiendo del gradiente de velocidad real en el inicio del floculador, el gradiente de velocidad de la tubería que enlaza la unidad N°1 con el mezclador podría ser muy bajo.

### 7.3 *Floculadores-decantadores*

- La desigual distribución de caudales trae como consecuencia que los parámetros operacionales de estas unidades sean diferentes.

#### i) Unidad N°1

- El paso del flujo de un compartimiento a otro a través de orificios, produce un gran porcentaje de espacios muertos y de capacidad ociosa en la unidad.
- El floculador N°1 produce mayor porcentaje de espacios muertos que la unidad N°2, debido al efecto de la estructura de entrada al decantador.
- El flóculo se forma rápidamente, en un tiempo de apenas 27 segundos.
- En el decantador N°1 las características de la estructura de entrada están causando la formación de espacios muertos y cortocircuitos en la unidad y reduciendo el tiempo de retención.
- Los orificios de la cortina ubicados en la parte superior están originando un flujo preferencial hacia los vertederos de salida y el 44% del caudal sale de la unidad a los 25 minutos. Esta unidad sólo tiene 22% de flujo de pistón, que es el tipo de flujo ideal en las unidades de tratamiento.
- El gradiente de velocidad de  $15 \text{ s}^{-1}$ , que debe producirse al paso del caudal de diseño por los orificios de la cortina, es aceptable. Como consecuencia de la desigual distribución de caudales, el gradiente de velocidad real es aún menor.
- Por efecto del cortocircuito, el 44% del flujo opera con una tasa muy alta de  $86.4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  y el 56% restante con una tasa de  $30 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ .
- Los vertederos de recolección están desnivelados y esto hace que la tasa de recolección real sea más alta que la teórica. No se pudo cuantificar la tasa real, debido a que no hay acceso a los vertederos para poder medir la longitud de recolección útil.

#### ii) Unidad N°2

- El decantador N°2 presenta mejor comportamiento hidráulico. Tiene 47% de flujo de pistón, pero está evidentemente afectado por la desigual distribución de caudales.

- El gradiente de velocidad en los orificios de la cortina, afectado por el mayor flujo que pasa por esta unidad, es de  $25.75 \text{ s}^{-1}$ .
- La tasa real de decantación es muy alta ( $55 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ).
- La tasa de recolección ( $3.0 \text{ l/s/m}$ ) se encuentra en el extremo máximo del rango y los vertederos operan ahogados.

#### **7.4 Filtros**

- Los filtros presentan un porcentaje de expansión aceptable de 25%.
- La eficiencia del sistema para remover turbiedad y color es muy buena.
- Las carreras de filtración son bastante largas.

#### **8. Recomendaciones**

- Se debería llevar un control diario de la calidad de la fuente para tener en cuenta las variaciones de la materia prima a tratar y la eficiencia de la planta. Esto es especialmente importante en época de seca, en que el agua es muy clara y la baja eficiencia del sistema podría estar indicándonos la conveniencia de operar con filtración directa.

##### Unidad de mezcla rápida

- Para obtener una buena turbulencia, sería deseable una diferencia de 1.0 m entre el vértice del vertedero triangular y el nivel en la caja de mezcla. En estas condiciones se podría estar obteniendo un gradiente de velocidad de  $760 \text{ s}^{-1}$ , (rango ideal de 700 a  $1,200 \text{ s}^{-1}$ ).
- Aplicar la solución de coagulante uniformemente repartida a todo lo ancho del chorro de agua, mediante un tubo de PVC de 2" de diámetro con 6 orificios de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro. Esto es muy importante para lograr una mezcla uniforme e instantánea.

##### Caja de distribución de caudal

- Colocar vertederos en la caja de distribución, de tal manera que los caudales que reciban las dos tuberías de conducción sean iguales.

##### Floculadores

- Diseñar orificios de paso a todo lo ancho del compartimiento, para minimizar los espacios muertos.

##### Decantadores

La unidad N°2 es la que mejor se comporta. Para optimizar su comportamiento, considerar:

- Más orificios en la cortina difusora.
- Mayor longitud de recolección mediante tuberías perforadas o canales, ubicadas en posición perpendicular al vertedero general de recolección, para obtener una tasa de recolección de 1.5 a 2.0 l/s/m.

Para mejorar el comportamiento de la unidad N°1, sería necesario:

- Trasladar los orificios a la parte más baja de la unidad. Con esto se evitaría el cortocircuito en la superficie, obligaría al flujo a utilizar mayor porcentaje del volumen de la unidad, incrementando el tiempo de retención. Los flujos opuestos de la masa de agua que asciende y las partículas que tratan de sedimentar, podrían favorecer la formación de un manto de lodos que elevaría mucho la eficiencia de la unidad en época de lluvia.

#### Filtros

- La planta no debe operarse con un caudal menor a 150 l/s, porque la expansión del medio filtrante que ya está en el límite inferior recomendable, decrecería y el material comenzaría a retener sedimento y a deteriorarse. Estas unidades se operaron durante buen tiempo, con un caudal menor, por lo que sería conveniente una inspección del medio filtrante para determinar en qué estado se encuentran.
- Estudiar la posibilidad de aplicar filtración directa en época de seca.

Anexo

# **ANEXO 1**

## **Ilustraciones**



## ETA Divinópolis - $Q = 150 \text{ l/s}$

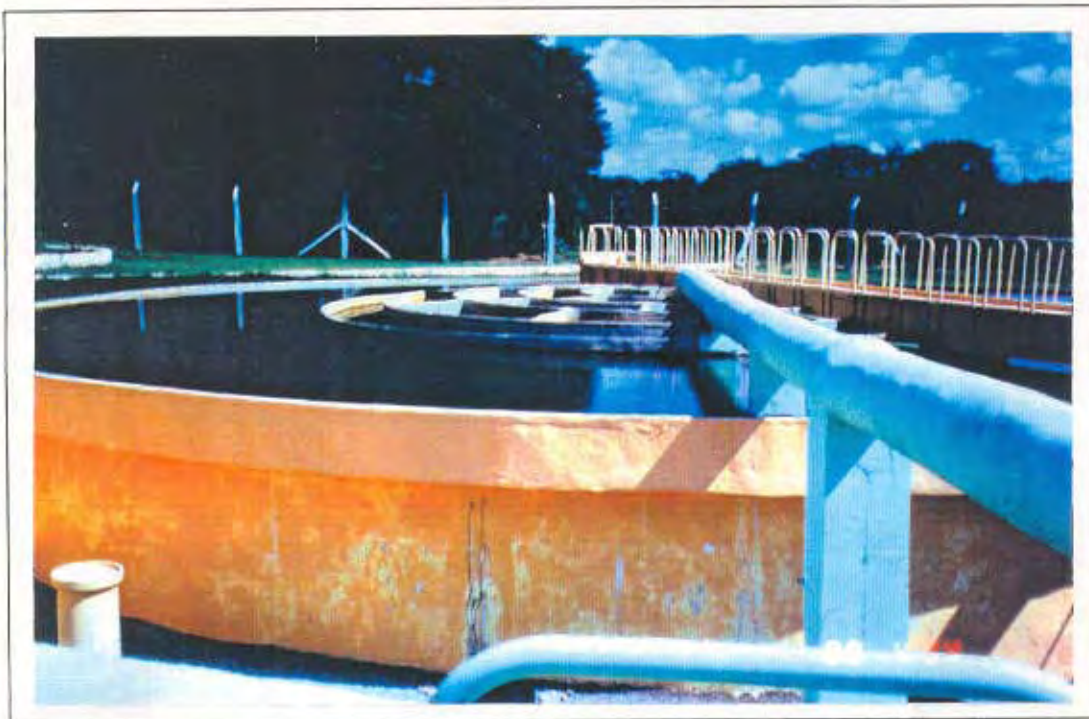


Foto 1: Decantador circular de tipo convencional, con floculador hidráulico en el centro.

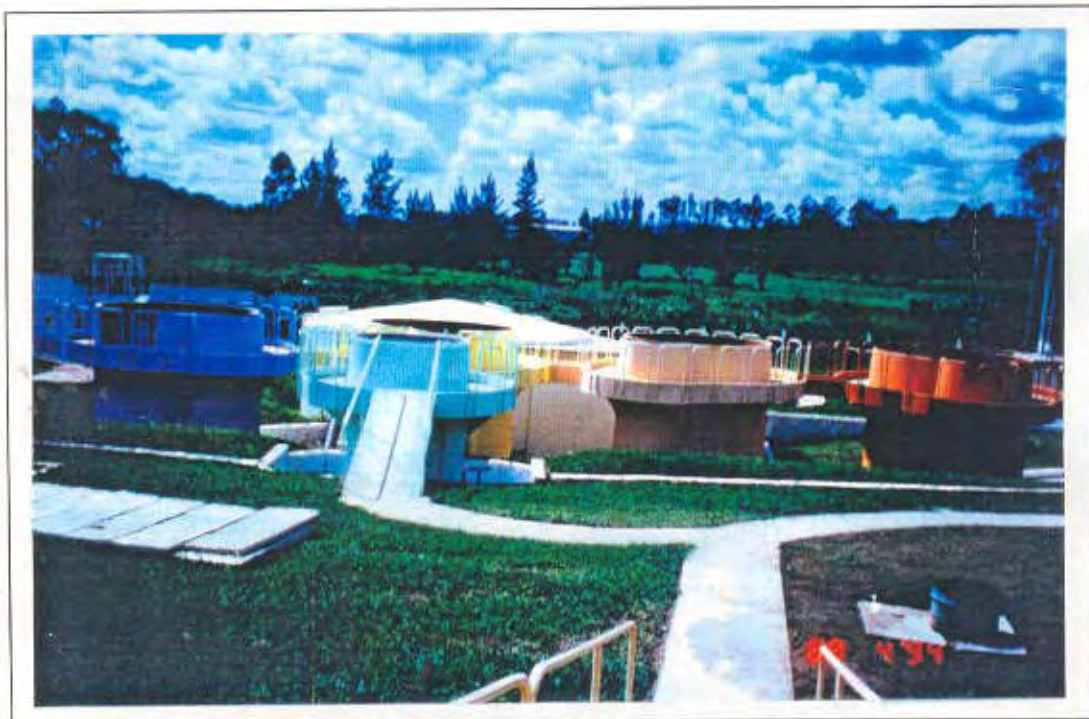


Foto 2: Caja de distribución y batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo.