



FACULTAD DE  
CIENCIAS EXACTAS,  
INGENIERIA Y AGRIMENSURA



Centro de Ingeniería Sanitaria

## ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA SANITARIA

Tema: Remoción de fluoruros por coagulación con compuestos de aluminio, en la potabilización de agua de la localidad Rionegrina de Valcheta.

Autor: Horacio A. Lizasoain

Ing. Mecánico

Legajo L-0074/4

Directora: Ana María Ingallinella, Ing. Civil y Sanitaria

Febrero 2018

## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	4
2	OBJETIVOS .....	6
2.1	Objetivo general .....	6
2.2	Objetivos específicos .....	6
3	INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	7
3.1	Significado sanitario de la presencia de fluoruros en el agua de consumo .....	7
3.2	3.2 Normas de calidad nacionales e internacionales .....	8
3.3	Fluoración de agua potable. - Punto de vista de la Ingeniería Sanitaria .....	9
3.4	Tecnologías disponibles para la remoción de fluoruros .....	11
3.4.1	Ablandamiento con cal .....	11
3.4.2	Coagulación con sales de aluminio .....	11
3.4.3	Intercambio iónico .....	12
3.4.4	Alúmina activada .....	13
3.4.5	Hueso molido (Fosfato tricálcico) .....	13
3.4.6	Utilización de membranas .....	14
3.4.7	Electrodialisis .....	14
4	CALIDAD DEL AGUA A TRATAR .....	15
5	DESCRIPCION PLANTA EXISTENTE .....	18
6	ELECCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO .....	20
7	TRABAJO EXPERIMENTAL .....	22
7.1	Introducción .....	22
7.2	Ensayos de Jarras realizados .....	22
7.2.1	Dependencia del coagulante - sulfato de aluminio vs. policloruro de aluminio. .	24
7.2.2	Incidencia del pH en la remoción. ....	25
7.2.3	Incidencia de la turbiedad inicial en la remoción .....	26
7.2.4	Coagulación con sulfato de aluminio y PAC para filtración directa. ....	27

7.3	Prueba de Operación in situ .....	28
7.4	Conclusiones de los ensayos .....	29
8	PROPUESTA DE SOLUCION .....	30
8.1	Estudio de la demanda .....	30
8.1.1	Proyección demográfica .....	31
8.1.2	Caudales de diseño.....	31
8.2	Descripción del proyecto.....	32
8.2.1	Esquema de planta a proyectar.....	33
8.2.2	Parámetros de diseño .....	33
9	CONCLUSIÓN FINAL.....	41
10	ANEXO I – Historial de determinaciones Físico-Químicas - VALCHETA.....	(1 pag.)
11	ANEXO II – Protocolos de Ensayos de Jarra (Jar Test) .....	(13 pag.)
12	ANEXO III – Esquema Funcional planta potabilizadora valcheta .....	Plano Nº 1

BIBLIOGRAFÍA

## 1 INTRODUCCIÓN

Valcheta es una localidad integrante de la línea sur de la provincia de Río Negro, enclavada a la vera de la Ruta Nac. Nº 23. Su clima es templado-frío con precipitaciones escasas de unos 200 mm anuales, donde la temperatura promedio en verano es de 35°C y en invierno rozan los -15°C promediando en los 3°C. Según el censo 2010 cuenta con 3.867 habitantes siendo esta la ciudad más importante de la línea viniendo desde la costa patagónica.

El Arroyo Valcheta, cuyo nombre deriva de la voz puelche muy antigua que significa "arroyo que se colma" haciendo alusión a las crecidas de primavera, es una de las cuencas endorreicas de la Línea Sur que surge de manantiales ubicados al norte de la Meseta de Somuncura, altiplanicie basáltica (de unos 14.000 km<sup>2</sup>) que actúa como un inmenso receptáculo y dosificador de las precipitaciones caídas, culminando en un bajo formando el lago Curicó. Su caudal medio es del orden de 1,5 m<sup>3</sup>/s. Figura 1

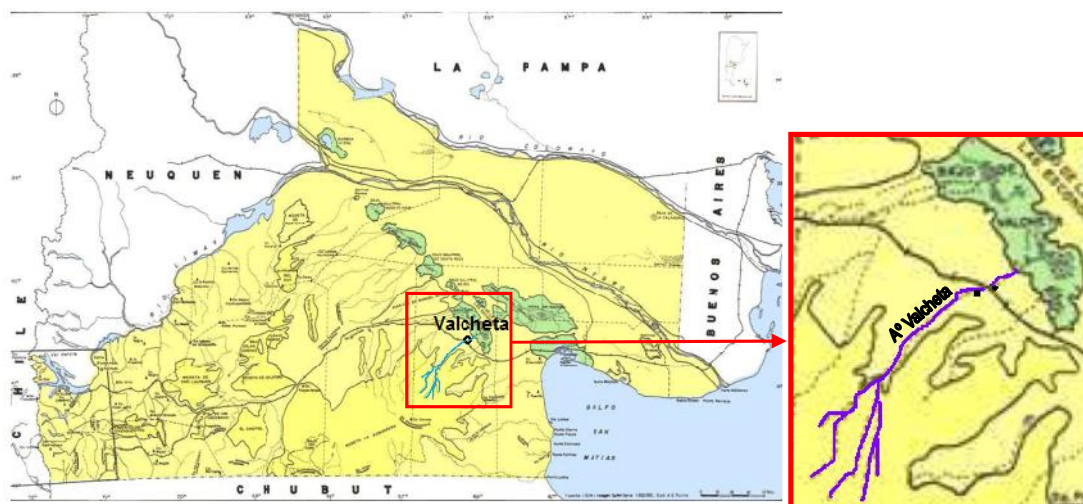


Figura 1.- Provincia de Río Negro, mapa de cuencas, ubicación Arroyo Valcheta

La Localidad utiliza este arroyo como fuente para el abastecimiento de agua potable, curso de agua superficial cuyas características fisicoquímicas varían a lo largo del año por su génesis y según el régimen de precipitaciones en la región. Particularmente, interesa la variabilidad en la concentración de Fluoruros del agua cruda, que en ocasiones supera levemente el límite establecido en la normativa vigente nacional y provincial.

El flúor es uno de los elementos más comunes de la corteza terrestre su presencia en el agua se debe principalmente a la infiltración y disolución de este elemento del suelo y rocas que lo contienen. Ésta situación se presenta con mayor frecuencia en las aguas subterráneas, donde la composición geológica del suelo y las condiciones son favorables para su disolución.

El arroyo Valcheta nace en la meseta de Somuncurá que está compuesta por rocas basálticas de edad Oligocena (Periodo Terciario en la escala geológica). La recarga se produce por las lluvias y nevadas que se infiltran en las grietas y fisuras del medio rocoso de la meseta que actúa como una "esponja", originado de dos brazos que se unen en el lugar llamado la "horqueta". La mayor parte del curso superior y medio se encuentra enclavado en rocas riolíticas de la Formación Marifil del jurásico, mientras que el curso inferior en rocas metamórficas y graníticas que conforman el basamento

Precámbrico del área, siendo el curso superior el origen probable de la disolución de sus sales características.

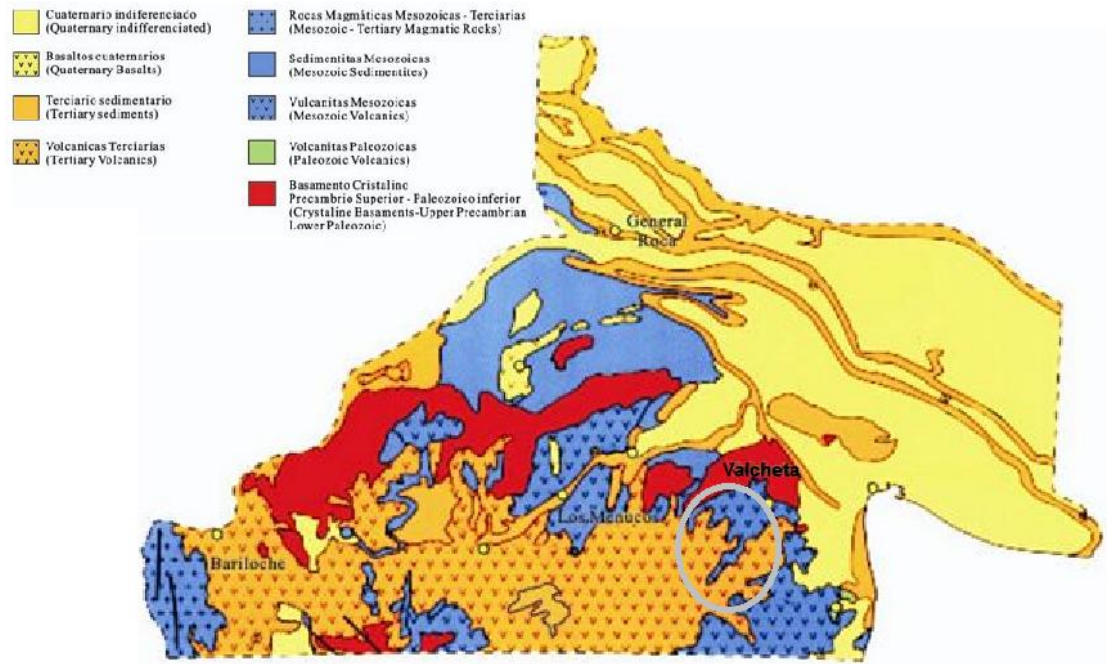


Figura 2.- Provincia de Rio Negro, mapa geológico generalizado

Actualmente el servicio de provisión de agua potable de la localidad de Valcheta, cuenta con una planta de potabilizadora compuesta por 3 (tres) módulos de tratamiento, tipo Lockwood WaterBoy® convencional, con floculación mecánica, sedimentadores tipo seditubos con 10° de inclinación, y filtros rápidos multimedia (arena – antracita), en la configuración que se muestra en la Figura 3, con una capacidad de producción de 25 m<sup>3</sup>/h cada uno, no siendo este pensado para la eliminación de flúor, necesaria para las concentraciones excedentes registradas en el último quinquenio.

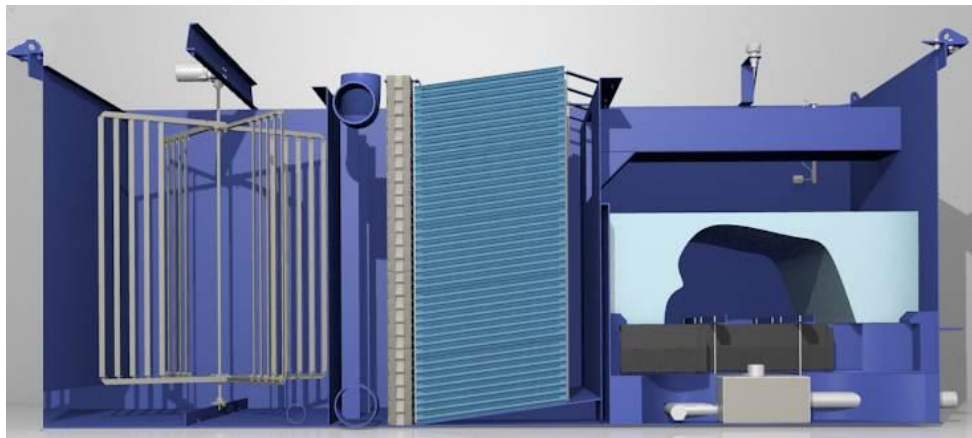


Figura 3.- Lockwood WaterBoy®, corte esquemático

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Estudiar la factibilidad de remoción de F con las instalaciones actuales y que modificación introducir en el proceso de potabilización de agua del Arroyo Valcheta para cumplir con la normativa vigente.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar una investigación bibliográfica sobre el significado sanitario de la presencia de fluoruros en el agua para consumo humano, las normativas existentes y los tratamientos disponibles para su remoción.
- Realizar ensayos a nivel laboratorio con el proceso seleccionado como más apropiado.
- Proponer las modificaciones necesarias para implementar el proceso en la planta de tratamiento existente.

### 3 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Significado sanitario de la presencia de fluoruros en el agua de consumo

El flúor tiene efectos tanto beneficiosos como perjudiciales para la salud humana, con un rango estrecho en Ingesta Diarias Admisible (IDA), siendo el agua de consumo la componente principal de la misma.

Tanto es así que el agua es considerada por la Organización Mundial de la Salud vehículo para la prevención de patologías dentales: "El agua potable con 1mg/l de flúor posee una notable acción preventiva contra la caries, sin que existan pruebas que en esa concentración altere el estado general de la salud, convirtiéndola en una medida eficaz y practicable." (Murray 1986).

Sin embargo, la exposición a largo plazo de los seres humanos a concentraciones mayores de fluoruros ha demostrado efectos adversos en dientes y huesos, entre otros.

La fluorosis dental es la hipomineralización del esmalte por aumento de la porosidad debido a una excesiva ingesta de flúor durante el desarrollo de los dientes definitivos. En los estados más leves se manifiesta como unas manchas blancas, congénitas y va tornándose a un color marrón o gris verdoso al aumentar su severidad. En las formas más avanzadas, se producen unas alteraciones en la forma del diente como de pequeños hoyos dispuestos linealmente o bien como vetas paralelas. Figura 4.



Figura 4.- Estados de afección de la fluorosis dental

La fluorosis esquelética tiene consecuencias más serias, provocando cambios en la estructura de los huesos, haciéndolos extremadamente frágiles y quebradizos, resultado de un prolongado consumo de agua con niveles de flúor de 4 a 15 ppm. Los efectos sobre el hueso se consideran los más relevantes para la evaluación de los efectos adversos de la exposición de los seres humanos a flúor, dado que la Fluorosis esquelética es una discapacidad invalidante que afecta a millones de personas en varias regiones de África, India y China, siendo la ingesta de fluoruro en el agua el factor principal causal de fluorosis esquelético endémica en dichas regiones (OMS, 2002).

En síntesis, y de forma de mostrar los estrechos rangos de concentración que pueden cambiar diametralmente su participación en la salud humana, se presenta en la Tabla 1 los distintos efectos según las concentraciones.

EFFECTOS FAVORABLES:	EFFECTOS DESFAVORABLES:
prevención de caries dentales, 0,4 - 1 mg/l	- Fluorosis Dental, 2-4 mg/l - Fluorosis esquelética 3-6 mg/l (alto consumo de agua) - Fluorosis ósea paralizante 10 mg/l - incremento de fracturas > 14 mg/día

*Nota: las concentraciones en agua de bebida son considerando un consumo de 2 l/día. Con dosis superiores a 50 mg/día, aparecen otras patologías menos comunes como alteraciones de las Glándulas Tiroideas, Retraso de crecimiento, alteraciones Renales, y hasta la muerte en dosis muy alta dependiendo del tipo y especie del compuesto de fluoruro ingerido.*

Tabla 1.- Comparación de efectos en función de la concentración de Fluoruros.

La información más reciente muestra que la fluorosis es endémica en por lo menos 25 países del mundo, estimándose una población afectada de 10 millones. En el mapa de la Figura 5 podemos ver las regiones del mundo donde el agua subterránea supera el límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud

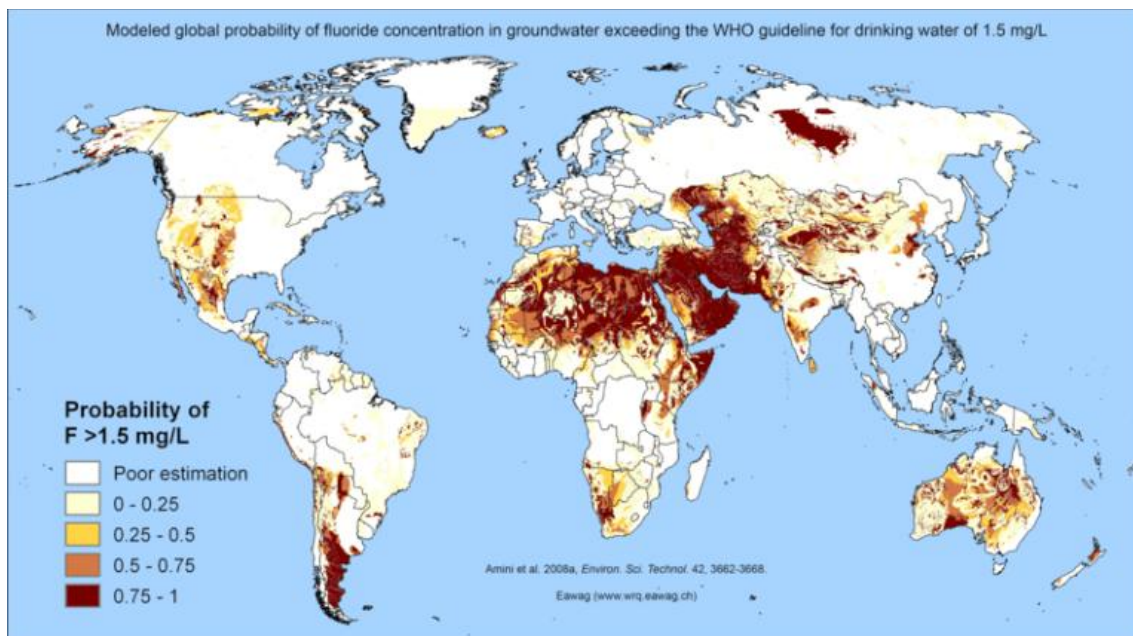


Figura 5.- Regiones con probables concentraciones de flúor > 1,5 mg/l

### 3.2 Normas de calidad nacionales e internacionales.

El descubrimiento de que agua con un alto contenido de fluoruro producía una coloración "anormal" en el esmalte de los dientes en los años 40, generó investigaciones cuidadosas y detalladas sobre la distribución de los fluoruros en la naturaleza, su metabolismo e incorporación a los tejidos duros del organismo, sus consecuencias y manifestaciones en la salud general (Bordoni, Squassi, 1999).

El producto de estas investigaciones fue tomado por la ONU (Organización de Naciones Unidas), a través de la OMS (Organización Mundial de la Salud) publicados en forma periódica desde 1958 en los "Estándares Internacionales para el Agua Potable" (International Standards for Drinking-Water), en ediciones de 1958, 1963, 1971 y 1976, seguidos por las "Recomendaciones para la Calidad del Agua Potable" (Guidelines for Drinking-Water Quality), en sus ediciones de 1984, 1993, 2004 y 2011.

Nuestro país desde la puesta en vigencia del Código Alimentario Argentino en 1971, adhirió a estas normas para el agua de consumo, y más adelante el Consejo Federal de Entidades de Servicios Sanitarios publicó las "Normas de Calidad para el Agua de Bebida de Suministro Público – agosto 1996 –. COFES" que toman como valor guía las dadas por la segunda edición de las recomendaciones ONU/OMS de 1993, fijando 1,5mg/l como límite para Fluoruros para el agua potable. Esta última es la Norma de calidad de aguas establecida por Contrato de Concesión para la prestación del servicio de Aguas Rionegrinas.

La última modificación de la normativa nacional fue en el año 2004, modificando por ley el "Código Alimentario Argentino (CAA) admitiendo la presencia de flúor en rangos de 0,6 a 1,7 mg/l teniendo

como variable la temperatura promedio de la zona dado que la dosis diaria depende del consumo diario del agua de bebida, fijando los límites de acuerdo a la Tabla 2, dejando además la facultad a la autoridad sanitaria competente de admitir valores distintos si la composición normal del agua de la zona y la imposibilidad de aplicar tecnologías de corrección lo hicieran necesario, siguiendo los lineamientos de la OMS actualizados.

Temperatura media y máxima del año (°C)	Contenido límite recomendado de Flúor (mg/l)	
	límite inferior:	límite superior:
10.0 - 12.0	0.9	1.7
12.1 - 14.6	0.8	1.5
14.7 - 17.6	0.8	1.3
17.7 - 21.4	0.7	1.2
21.5 - 26.2	0.7	1.0
26.3 - 32.6	0.6	0.8

Tabla 2.- Valores límites para el flúor en agua potable según el CAA

En Estados Unidos, la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) estableció una cantidad máxima permisible para fluoruro en el agua potable de 4 mg/l, y un segundo estándar recomendado por cuestiones cosméticas (decoloración dental) de 2 mg/l, donde los sistemas de aguas que excedan estos límites deben notificar a los usuarios en un máximo de 30 días y un año respectivamente. En 2003 la EPA encomendó al Consejo Nacional de Investigaciones (National Research Council -NRC) la revisión de estos valores, quienes finalmente en 2006 publicaron su evaluación en el documento titulado "Fluoruro en Agua de Bebida: Una revisión científica de las normas de la EPA (*Fluoride in Drinking Water: A Scientific Review of EPA's Standard*)", recomendando finalmente a la agencia la actualización de dichos parámetros incluyendo mayor información sobre los riesgos asociados, pero a la fecha no han sido modificados.

Las guías de calidad de agua de bebida de Canadá fijan una Concentración Máxima Aceptable (MAC) para flúor de 1,5 mg/l, sin embargo se aclara en una nota anexa a dichas guías donde recomienda que la concentración de flúor sea ajustada entre 0,8 a 1,0 mg/l, el cual es el rango óptimo para el control de las caries dentales.

La Comunidad Económica Europea (CEE), en sus directivas 80/778/EC califica al flúor un parámetro indeseable en cantidades excesivas, como comentarios se cita que el MAC deberá ser establecido de acuerdo al rango de temperatura, fijándose los siguientes valores de MAC en 1500 µg/l de 8 a 12°C y 700 µg/l de 25 a 30°C.

### 3.3 Fluoración de agua potable. - Punto de vista de la Ingeniería Sanitaria.

La fluoración del agua potable es la práctica de agregar compuestos de sales de flúor a los suministros de agua corriente con el propósito de prevenir las caries dentales. Los niveles implementados se encuentran en un rango desde 0,6 a 1,2 mgF/l, utilizando como sal de flúor el silicofluoruro de sodio. En la Figura 6, vemos la distribución mundial del suministro controlado de flúor en el agua de bebida para la prevención de caries.

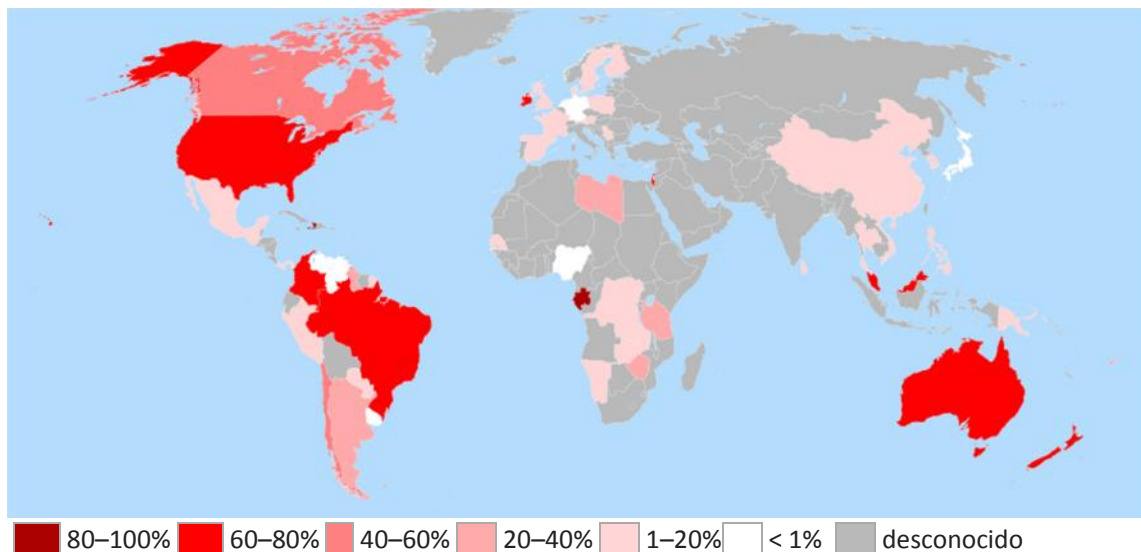


Figura 6.- Porcentaje de la población que recibe agua Fluorada, natural (2012).

Esta práctica comenzó en EE.UU. en el año 1945 y fue oficialmente promocionada por el Servicio de Salud Pública de ese país.

En el Primer Congreso Argentino de Saneamiento en 1965, el agregado de fluoruros al agua fue tema de debate de los profesionales argentinos y extranjeros de instituciones nacionales e internacionales tales como la Oficina Sanitaria Panamericana de la Organización Mundial de la Salud recomendando que los centros científicos especializados del país determinen la conveniencia o no de la ingesta de flúor. A pesar de estas recomendaciones, años más tarde en 1969 se comenzó a agregar flúor al agua de consumo de la ciudad de Santa Fe (la primera ciudad en la Argentina).

En el año 1975 el Estado Nacional, mediante la sanción de la Ley Nacional 21172/75 pone en marcha esta política pública de prevención, con el nombre de “Programa Nacional de Fluoración de Aguas de Abasto Público” dependiente del Departamento de Salud Bucal de la Dirección de Promoción y Protección de la salud, vigente hasta la fecha.

Las críticas a la fluoración del agua no han sido tanto por la eficacia del flúor en prevenir enfermedades dentales, sino por como en la imposición de un “tratamiento médico” general sin las precauciones normales del diagnóstico previo, prescripción y determinación de la dosis.

En efecto, en Europa se han tenido más en cuenta los efectos desfavorables de la ingestión continua de flúor y la posibilidad de riesgos para las personas y la naturaleza, lo que ha conducido en algunos de sus países a la prohibición (Austria, Dinamarca, Holanda, Suecia) y en otros a la suspensión (Alemania, Bélgica, Yugoslavia) de la fluoración de las aguas, introduciendo en su lugar sal y pasta de dientes fluorada que se pueden comprar opcionalmente. Mientras tanto, los ciudadanos de los Estados Unidos, constituyen una de las poblaciones más absolutamente fluoradas del mundo.

Para la Ingeniería Sanitaria, la adición de silicofluoruro de sodio no forma parte del tratamiento del agua sino un agregado al proceso a tener en cuenta dado que la normativa lo requiere.

Desde el punto de vista de la salud, actualmente hay más información sobre las afecciones relativas a la acumulación de flúor, así como de la relativa incidencia del suministro de este en la prevención de

caries, dado que la tendencia de la afección por caries es decreciente aún en países que no promueven esta práctica.

Por otra parte, la historia reconoce que la promoción de esta práctica surgió de la principal empresa productora de aluminio de los EE.UU. en los años 40', donde el fluoruro es un componente de los residuos en los procesos de fabricación no sólo de aluminio sino también de explosivos, fertilizantes entre otros.

Las posiciones contrapuestas siguen siendo el beneficio en la prevención de caries, aunque actualmente, los países que continúan con esta práctica han bajado las concentraciones de flúor en agua de bebida al rango de 0,4-0,7 mgF<sup>-</sup>/l, para evitar efectos adversos.

### **3.4 Tecnologías disponibles para la remoción de fluoruros**

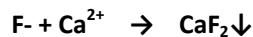
Para conocer las distintas alternativas la remoción de Fluoruros, se realizó una investigación bibliográfica sobre las tecnologías disponibles, las que paralelamente fueron evaluadas en función de cómo estas se adaptan mejor al caso particular para el tratamiento de agua del Arroyo Valcheta.

Las técnicas de tratamiento para remover flúor más desarrolladas son: el ablandamiento con cal, coagulación con aluminio, alúmina activada, resinas de intercambio iónico, hueso molido (Fosfato tricálcico), tecnología de membranas, electrodiálisis y filtración sobre carbón activado, de las cuales haremos una breve descripción.

#### **3.4.1 Ablandamiento con cal**

El ablandamiento con cal puede eliminar fluoruros del agua por formación de fluoruro de calcio insoluble y por coprecipitación con hidróxido de magnesio [Mg(OH)<sub>2</sub>]. Además de la cal, se puede añadir CaCl<sub>2</sub> para mejorar el rendimiento del tratamiento.

Las reacciones se podrían esquematizar de la siguiente forma:



La coprecipitación ocurre por la adsorción del flúor en el hidróxido magnésico que se forma en el ablandamiento con cal. Si el agua no contiene suficiente magnesio, es necesario enriquecerla, añadiendo sulfato magnésico o cal dolomítica, perdiendo sentido la utilización de este método de eliminación del flúor. La relativamente alta solubilidad del fluoruro de calcio limita la reducción del flúor por ablandamiento, pero igualmente puede reducir altos niveles de flúor a niveles aceptables.

#### **3.4.2 Coagulación con sales de aluminio**

La coagulación con sulfato de aluminio reduce los niveles de flúor a valores aceptables para agua de bebida, siendo este ion adsorbido en el material floculado y removido en el paso siguiente por sedimentación.

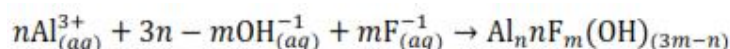
A dosis bajas de sulfato de aluminio produce la desestabilización de las partículas coloidales negativas por la neutralización de sus cargas por las especies hidrolizadas cargadas positivamente. A altas dosis de coagulantes el metal precipita como un sólido amorfo de hidróxido en el que las partículas quedan atrapadas, lo que se denomina "coagulación por barrido".

La remoción de flúor en el proceso de coagulación se produce entonces por los siguientes mecanismos:

- Adsorción: unión por fuerzas electrostáticas entre el fluoruro soluble y la superficie externa de los hidróxidos metálicos.
- Coprecipitación: oclusión de los contaminantes (coloides) en el interior de los flocs que están creciendo.

Algunos estudios que compararon los mecanismos de adsorción y coprecipitación, demostraron que se obtiene una mayor remoción por éste último proceso. Sin embargo otros autores postulan que ese fenómeno sólo se produce para relaciones altas adsorbato-adsorbente y que es reversible (Alfredo et al 2012).

El flúor, a pesar de que no reacciona con la mayoría de los componentes del agua, tiene una alta reactividad con el aluminio, sin embargo el precipitado formado durante el proceso de coagulación cuando el fluoruro está presente todavía es materia de investigación. Hu et al (2005) propusieron la formación de un precipitado de fluoruro e hidróxido con iones de Al (III):



Sin embargo, afirman que este precipitado solo es estable cuando [F] necesario para obtener la relación molar de  $([\text{F}] + [\text{OH}]) / ([\text{Al}]) > 3$ . Cuando  $[\text{OH}] / [\text{Al}] > 3$ , la coordinación entre el fluoruro y el aluminio es reemplazada por iones de hidróxido.

La eficiencia en la remoción de fluoruros en este proceso depende significativamente de la concentración inicial de flúor, la dosis de coagulante aplicada, y del pH en que la coagulación tiene lugar. El pH óptimo reportado está en el rango de 6 – 7,5, encontrándose la máxima remoción a pH 6,5.

Es esperable también, en la coagulación con sulfato de aluminio, se elimine arsénico de acuerdo a los resultados obtenidos en el Centro de Ingeniería Sanitaria con el proceso ARCIS – UNR (Ingallinella, Fernandez, Stecca, 2003). Coagulación – Floculación aplicada a la remoción de fluoruros.

### 3.4.3 Intercambio iónico

Es un proceso por el cual se sustituyen iones de una disolución por otros iones con la misma carga siendo difícil la remoción de  $\text{F}^-$  por ser el más electronegativo de los elementos. El proceso consiste en pasar la disolución a través de ciertos materiales sólidos porosos (substancias sólidas insolubles – esferas de 1 a 0,3 mm.) normalmente minerales del grupo zeolita, o resinas sintéticas (plásticos) preparadas especialmente que contienen moléculas grandes.

Dado su mecanismo de sustitución el medio se satura, requiere de ciclos de regeneración con reactivos químicos, produciendo desechos para los que debe considerarse su disposición.

Este método resulta económicamente rentable con salinidades inferiores a los 500 mg/l, dado que de lo contrario las resinas pueden tener afinidad con otros iones disueltos saturándose prematuramente con estos.

#### 3.4.4. Alúmina activada

La alúmina activada es utilizada en la misma forma que las resinas de intercambio iónico, removiendo ciertas especies del agua, entre ellos el Fluor debido a una adsorción hidrolítica. La remoción óptima de flúor pareciera ocurrir en un rango de pH entre 5 y 8. Estudios realizados (Choi,1979) muestran que la capacidad de la alúmina activada para remover flúor se incrementa con el aumento de la concentración de este último.

Respecto al tamaño de las partículas de alúmina activada, la cinética de remoción es tal que las partículas de menor tamaño proveen la más rápida captación del flúor; aunque deberá tenerse en cuenta que las partículas más pequeñas tendrán una gran tendencia a eliminarse en la operación de lavado. Se recomienda un tiempo mínimo de contacto de 5 minutos para remoción de flúor.

Para aumentar la capacidad de adsorción de la alúmina activada se ajusta el pH a un valor cercano a 5,5 utilizando para esto una solución ácida ( $H_2SO_4$  ó HCl).

La desventaja de este proceso es que requiere de regeneración, comenzando por un lavado en contracorriente para remover el material suspendido, y luego una regeneración del medio con hidróxido de sodio (NaOH), finalizando con una neutralización ácida (hasta pH 5,5) para permitir al nuevo ciclo una efectiva remoción de aniones.

La disposición de los desechos del proceso de regeneración es un problema al igual que en el resto de los procesos de intercambio iónico.

Cabe aclarar que el proceso de remoción con alúmina activada se utiliza principalmente en Estados Unidos, donde abunda este material, en nuestro país por razones económicas es una tecnología de muy poco uso.

#### 3.4.5 Hueso molido (Fosfato tricálcico)

Es un proceso simple basado en la afinidad del flúor con el fosfato tricálcico, ya que se encuentran siempre contenidos apreciables de flúor en los fosfatos naturales, como la apatita, la fosforita, así como en los huesos.

El flúor disuelto en el agua reemplaza el carbonato de la apatita del hueso ( $3Ca_3(PO_4)_2CaCO_3$ ), formando fluorapatita (fosfato cálcico) insoluble que queda retenida en el manto filtrante. Este material al regenerarse con Hidróxido de Sodio transforma la fluorapatita en hidroxiapatita y el flúor pasa a fluoruro de Sodio soluble, eliminándose en este paso de regeneración, luego se neutraliza el exceso de alcalinidad con anhídrido carbónico quedando la hidroxiapatita del hueso en condiciones de iniciar un nuevo ciclo.

La sencillez del proceso está dada por la facilidad para la obtención del hueso, su gran capacidad de remoción, y su económico costo de operación.

También puede utilizarse hueso carbonizado en forma de polvo, sin regeneración, aunque con menor capacidad de intercambio.

En la práctica se utilizan productos naturales, extraídos de huesos de ganado especialmente cenizas de huesos o huesos molidos ó Apatita sintética, que puede obtenerse por una mezcla cuidadosamente controlada de cal y ácido fosfórico.

En la Argentina fue un proceso difundido dado que luego de la construcción de una Planta Piloto en la ciudad de Eduardo Castex (La Pampa), el Servicio Nacional de Agua Potable (SNAP) tomo los resultados obtenidos de este piloto para el proyecto de varias plantas de este tipo en

todo el país, incluidas las localidades Rionegrinas de Sierra Colorada y Los Menucos, planta que fueron remplazadas en los 90' por plantas de Ósmosis Inversa dado el aumento de concentración de otros iones presentes en el agua de perforación.

### 3.4.6 Utilización de membranas

La tecnología de membranas, es técnicamente adecuada y eficiente para la remoción del flúor siendo de aplicación para este propósito la ultra filtración, nano filtración y la más difundida es la ósmosis inversa.

El uso de la Ultra filtración no es muy difundida pero existen antecedentes de su aplicación, realizadas por la firma Unitek en las localidades de Guamini (ABSA). Básicamente es una variante de la coagulación con sales de aluminio o coagulantes de base aluminio, donde la membrana es la encargada de retener este material al cual se encuentra adsorbido el flúor.

En el caso de Nano filtración la retención es mecánica dado que la membrana puede retener partículas con tamaños de 100 pm-0,001  $\mu\text{m}$ , permitiendo separar la mayoría de las moléculas, las de más bajo peso molecular quedan parcialmente retenidas, como es el caso del Flúor cuyo radio medio atómico es de 50 pm, removiendo el 71% aproximadamente.

El proceso de Ósmosis Inversa ,ampliamente conocido, utiliza una membrana semipermeable a la que se le aplica una presión superior a la osmótica promoviendo la circulación del solvente, y la consecuente concentración de los solutos, quedando estos retenidos en la salmuera de rechazo, removiendo en el orden del 97% de los fluoruros.

Estos procesos tienen la desventaja de necesitar altas presiones para la circulación que van de 2,5 a 8 bares, y requieren de un acondicionamiento previo de agua a permear para evitar el ingreso de partículas en suspensión. En el caso en que el agua contiene concentraciones elevadas de dureza debe removerse previamente para evitar el deterioro prematuro de las membranas. El costo de reposición de las membranas es elevado y el consumo energético también lo que hace que los costos operativos sean altos.

### 3.4.7 Electrodiálisis

La electrodiálisis consiste en reducir la salinidad mediante la difusión, a través de membranas de los iones disueltos en el agua bajo la influencia ejercida por la diferencia de potencial eléctrico.

Este método se aplica más para remover fluoruros en agua industrial que en agua potable. Es un método costoso y tiene limitaciones de eficiencia de remoción, además de requerir de una gran cantidad de energía eléctrica en su operación.

#### 4 CALIDAD DEL AGUA A TRATAR

Como parte de este trabajo, se recopilaron datos de calidad del agua cruda, parámetros de operación de la planta de potabilizadora, y problemas operativos detectados, para concluir este capítulo formando un cuadro de situación para el enfoque de la solución práctica de la problemática abordada.

El agua a tratar será la del Arroyo Valcheta, única fuente de agua disponible en la zona, cuya característica adicional a las de otras aguas superficiales (sólidos suspendidos), es que presenta concentraciones de flúor a veces superiores a los valores normativos.

Para evaluarlas características de agua se tomaron los datos de los controles periódicos de parámetros fisicoquímicos del agua de la fuente, realizados por el Laboratorio Central de Aguas Rionegrinas, durante los años 2009 al 2017 los que pueden ver en el ANEXO I. En la Tabla 3 se presentan los valores promedios de los distintos parámetros analizados y en las figuras se han graficado los valores de arsénico, fluoruros y pH correspondientes a las fechas de muestreo.

Mes/Año	Limite	Año 2009	Año 2010	Año 2011	Año 2012	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Año 2016	Año 2017
Turbiedad	2	1,75	2,90	1,79	5,59	2,55	3,83	3,01	6,07	1,89
pH	6,5-8,5	8,02	7,80	8,40	8,53	8,07	8,37	8,28	8,23	8,06
Conductiv.		660	652	734	806	744	856	760	743	794
Dureza	400	199	186	193	210	192	227	203	210	214
Alcalinidad		248	264	257	241	226	228	228	221	223
Cloruros	250	44	45	110	57	44	65	55	53	58
Sulfatos	250	51	43	68	106	89	118	107	87	109
Nitratos	50	Inf. 0,04	Inf. 0,04	Inf. 0,04	0,22	2	1,8	1,33	1,55	3,6
Nitritos	0,1	0,02	0,04	0,05	0,04	< 0,04	0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Calcio		36	32	36	40	37	44	42	41	41
Magnesio		26	26	24	27	24	28	24	26	27
Sodio	200	81	74	80		75	93	89	87	100
Potasio		3,80	3,40	3,41		6,40	4,16	3,03	4,25	4,40
Hierro	0,3	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05
Manganeso	0,1	-	-	-	Inf. 0,21	-	-	-	-	-
Flúor (mg/l)	1,5	1,53	1,43	1,57	1,75	1,90	1,56	1,72	1,69	1,71
Arsénico (mg/l)	0,05	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabla 3.- Valores promedio de parámetros físico-químicos del agua cruda de Valcheta

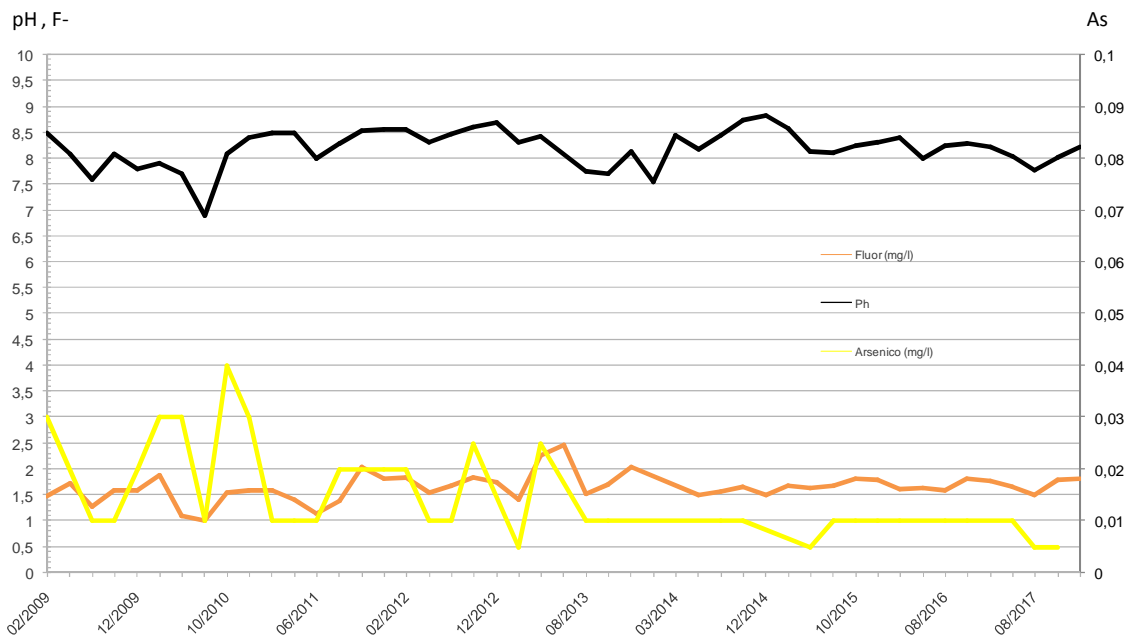


Figura 7.- Cronograma de determinaciones en agua de Valcheta, flúor, arsénico y pH

Para un mejor manejo de estas variables utilizando un software, se calcularon los valores estadísticos, para de esta forma poder utilizar estos valores como referencia para el dimensionamiento del proceso de tratamiento.

**Estadísticas descriptivas: pH; Flúor; Arsénico**

Variable	Media	Mínimo	Mediana	Máximo
pH	<b>8,2024</b>	6,9000	8,2450	8,8300
Fluor (mg/l)	<b>1,6540</b>	1,0100	1,6400	<b>2,4600</b>
Arsenico (mg/l)	<b>0,01486</b>	0,00500	0,01000	<b>0,04000</b>

Además, se evaluó la correlación entre estos parámetros de forma de evaluar la asociación entre pH-flúor y pH-arsénico, dado que la determinación de pH es un parámetro de operación.

**Correlaciones: pH; Flúor**

	Flúor
pH	0,466
Valor p =	0,001

La interpretación de estos resultados muestran que existe **una relación positiva moderada entre las variables pH y flúor** (0,466), y el valores p para dicha la correlación es menor que el nivel de significancia de 0.05, lo que indica que los coeficientes de correlación son significativos. No siendo aplicable a la relación pH-As.

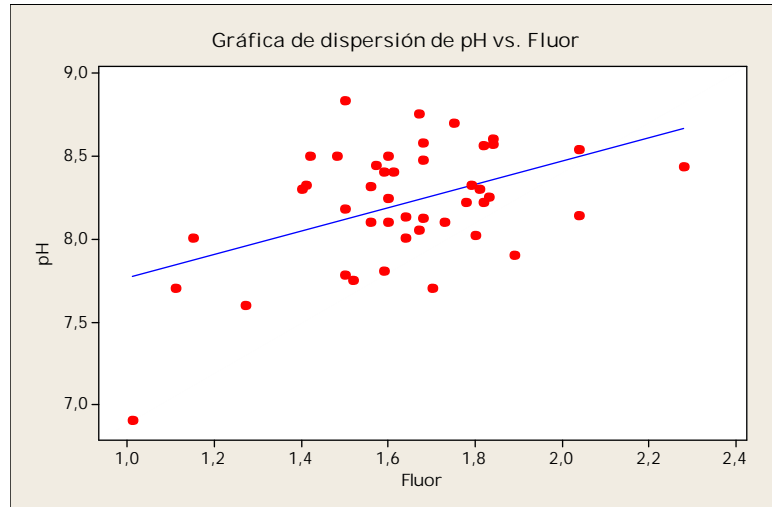


Figura 8.- Correlación de las variables pH-Fluoruros

Con respecto al arsénico, no será tenido en cuenta en el desarrollo del presente trabajo dado que durante el estudio no se ha detectado valores que excedan los límites vigentes. Por otra parte, al ser la técnica utilizada para la determinación de As semicuantitativa no refleja valores intermedios entre 5 y 10  $\mu\text{g/l}$  , .

## 5 DESCRPCION PLANTA EXISTENTE

La planta potabilizadora de la localidad de Valcheta, cuenta actualmente con tres módulos potabilizadores, uno de ellos original marca Lockwood – Waterboy y los restantes replica de este. Los mismos son plantas modulares, contando con una cámara de floculación, un sedimentador de alta carga con seditubos, y un filtro multimedia arena-antracita, como se ilustra en la Figura 9. La inyección del coagulante se realiza en la cañería de alimentación usando esta como mezcla rápida.

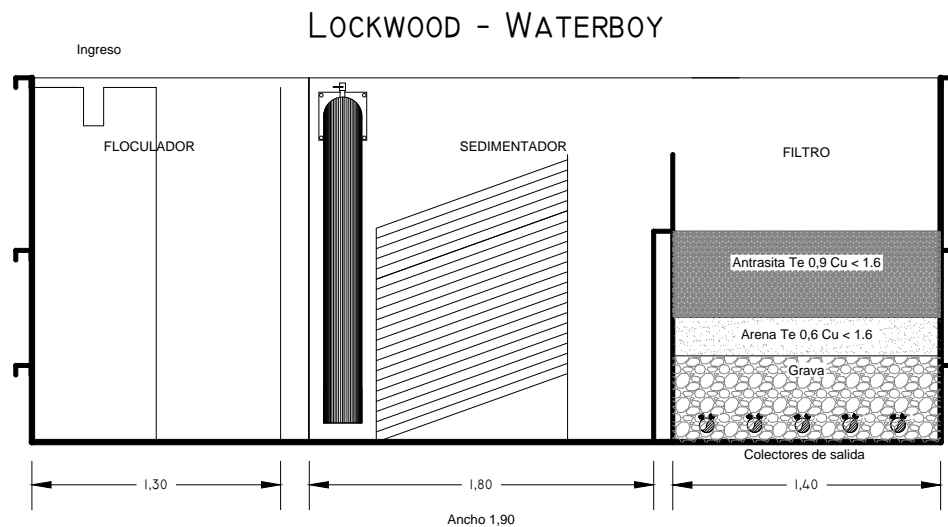


Figura 9.- Croquis dimensional de los Módulos Lockwood Waterboy

En las condiciones de operación actuales cada módulo produce en el orden de  $35\text{m}^3/\text{h}$ . Operando con condiciones de baja turbiedad ( $< 5 \text{ UNT}$ ) no tienen mayores inconvenientes, pero en eventos de turbiedades mayores se debe bajar la velocidad de operación para obtener la calidad adecuada de agua potable.

A partir de esta dificultad operativa se evaluó cuáles son sus capacidades reales, comparando sus dimensiones y utilizando parámetros de diseño convencionales (Tabla 4), como Cargas Superficial, Tiempos de Residencia Hidráulicos, y Velocidad de filtración, donde se determinó la capacidad real del módulo (ENOHSA, 2001). Tanto la carga superficial equivalente del sedimentador y la velocidad de filtración están dentro de los valores recomendados. La etapa de floculación consta de una sola etapa con un G adecuado. Lo recomendable es tener como mínimo dos etapas de floculación. Como se indicó anteriormente, los tubos tienen una inclinación de 10 grados cuando lo recomendado es 60 grados. Para un caudal de  $35\text{m}^3/\text{h}$  donde la velocidad de filtración es más alta, genera carreras de filtración muy cortas sobre todo cuando las turbiedades son altas.

Floculador		Sedimentador		Filtro Arena-Antracita	
A	1,9 m	A	1,9 m	A	1,9 m
B	1,3 m	B	1,8 m	B	1,4 m
H	1,8 m	H	1,8 m	H	1,8 m
Volumen	4,4 m <sup>3</sup>	Volumen	6,2 m <sup>3</sup>	Área sup	2,7 m <sup>2</sup>
TRH	10 min	TRH	14 min	Carga	9,8 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h
Potencia	37,3 W	Área sup	3,4 m <sup>2</sup>		
Vel.giro	36 rpm	Carga	182 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d		
G =	91 s <sup>-1</sup>				

Q nominal = 26 m<sup>3</sup>/h

Tabla 4.- Parámetros de diseño de los módulos de tratamiento

La construcción de estos módulos en caja metálica de forma compacta, imposibilita la variación de cualquiera de sus partes, como son los volúmenes de las cámaras, ángulo de inclinación de los seditubos, etc.

## 6 ELECCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO

Teniendo en cuenta lo recopilado en la bibliografía es posible remover flúor con un proceso de coagulación con sales de aluminio. Por lo tanto y dado que la planta de Valcheta tiene un proceso convencional de potabilización se decidió realizar ensayos para encontrar las condiciones óptimas de coagulación para lograr concentraciones menores a 1,5 mg/L en el agua tratada. Primeramente se realizó un preliminar (Ver Anexo) en el que demostró que con dosis del orden de 80 a 120 mg/L se lograban remociones de flúor entre 14 y 30% concluyendo que es una alternativa adecuada dado que:

- La baja concentración de flúor de entrada.
- Utilización de la infraestructura disponible, Floculación – Sedimentación – Filtración.
- La utilización de coagulante de suministro habitual.
- Baja o nula necesidad de corrección final de pH, dado la característica del agua cruda.

Siendo esta tecnología la que presenta mayores ventajas para la solución del problema planteado, se realizó una investigación más profunda del proceso de coagulación en sí, aplicado a la eliminación de fluoruros.

En las plantas de tratamiento de agua potable convencionales se somete al agua a una mezcla rápida, coagulación/floculación, sedimentación, y filtración. La eliminación de partículas se produce por desestabilización mediante la adición de un agente desestabilizador, conocido como coagulante, como se muestra en la Figura 10. Los coagulantes a base de aluminio utilizan principalmente dos métodos diferentes para lograr la eliminación de partículas: (1) neutralización de carga de partículas cargadas negativamente por la hidrólisis metálica cargada positivamente seguida de la agregación de partículas desestabilizadas y (2) floculación de barrido en la que se forma hidróxido de aluminio el precipitado conduce a la adsorción y el enmallado de contaminantes y partículas (Benjamin y Lawler 2012, Shin et al., 2008).

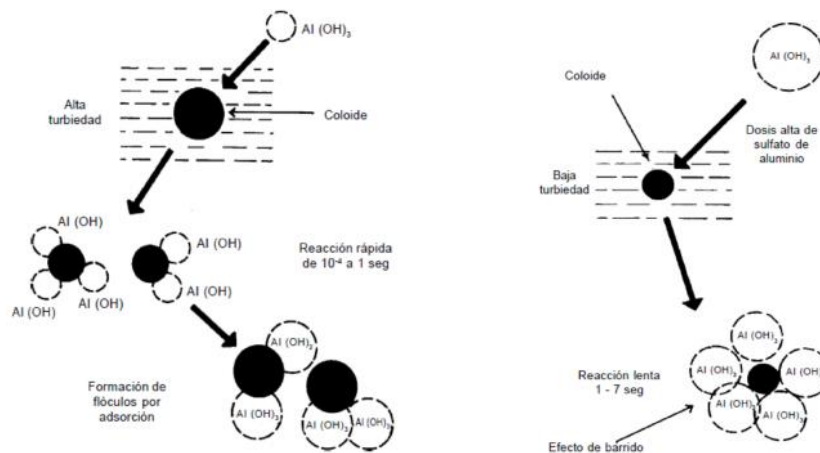


Figura 10.- Coagulación – Floculación.- Izq.) Neutralización de cargas. Der.) Barrido

Después de que la sal metálica hidrolizante de aluminio se agrega a la solución, se somete a una serie de reacciones de hidrólisis. Las especies con carga positiva interactúan con las partículas con carga negativa en las dos vías descritas anteriormente (Figura 10). A la izquierda se puede ver el mecanismo de coagulación dominante en aguas turbias. Las concentraciones más altas de partículas permiten suficiente interacción de partículas después de la desestabilización y, por lo tanto, pueden someterse a tratamiento a concentraciones químicas más bajas. La interacción entre las especies de hidrólisis metálica cargadas positivamente y las partículas cargadas negativamente es estequiométrica (Shin et

al., 2008). A la dosis de coagulación crítica, se satisface el requisito de carga para la desestabilización y los coloides pueden agregarse siempre que el tiempo y la mezcla proporcionados produzcan suficientes colisiones de partículas.

El esquema de la derecha muestra las reacciones en aguas de baja turbiedad. Menos partículas requieren la formación de precipitados para causar interacción y permitir que ocurra el floculación por barrido (Shin et al., 2008). La eliminación de partículas ya no es una relación estequiométrica entre las sales metálicas hidrolizadas y los coloides; es la química relacionada con la precipitación de hidróxido de metal la que determina la eliminación. El pH óptimo para lograr la floculación del barrido a través de la precipitación del hidróxido de aluminio, es consistente con la solubilidad mínima del aluminio (Amirtharajah y Mills, 1982).

La remoción de flúor por coagulación con aluminio se trata como un proceso de adsorción donde los iones son removidos junto con el material floculado en la etapa de sedimentación, pero con el correr de los años se comprobó que este proceso de eliminación de fluoruro implica además de la adsorción sobre el precipitado de hidróxido de aluminio, la formación de un co-precipitado de complejos Al-F (Katherine Ann Alfredo, 2012).

## 7 TRABAJO EXPERIMENTAL

### 7.1 Introducción

La herramienta estándar de laboratorio para la evaluación de procesos coagulación – sedimentación es el Ensayo de Jarras (Jar Test) o Flocúlimetro.

El ensayo de jarras (Jar Test) es utilizado en el tratamiento de aguas para la evaluación de la reducción de sólidos disueltos, sólidos en suspensión, materias coloidales y otras materias no sedimentables, mediante coagulación y posterior decantación por gravedad. Con este ensayo se puede evaluar a escala de laboratorio la reducción de color, turbidez y dureza del agua bruta investigada.

Este tipo de ensayos de coagulación-floculación se llevan a cabo para determinar reactivos químicos potencialmente utilizables para tratar un agua, dosis a aplicar y condiciones requeridas para conseguir un resultado óptimo. Entre las condiciones cabe reseñar el pH óptimo de tratamiento, la temperatura del agua y el orden de adición de reactivos.

La Figura 11 muestra un esquema básico de los pasos en el proceso de coagulación-sedimentación que ocurren durante los ensayos de jarra que incluye mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación en reposo. En la etapa de mezcla rápida, el agente desestabilizador se agrega y distribuye por todo la jarra. Después de un breve período de mezcla rápida, la mezcla se ralentiza para promover la interacción de las partículas y la formación de flóculos durante la etapa de mezcla lenta. Y por último, el proceso concluye con un período sin mezcla para permitir la sedimentación de flóculos y partículas.

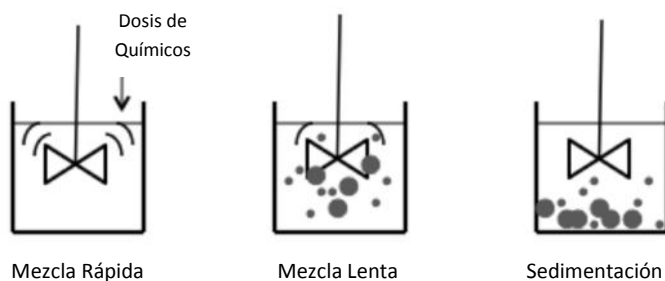


Figura 11.- Ensayo de Jarras – Esquema básico

Se realizaron distintos Ensayos de Jarra para observar la eficiencia de la remoción de Fluoruro en función de la concentración de coagulante, utilizando sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) y policloruro de aluminio (PAC), el ajuste de pH, y la incidencia de turbiedad inicial, para evaluar las variables asociadas al proceso. Complementariamente se realizó un ensayo de coagulación rápida y filtración con papel Whatman 40 enfocado a su aplicación a la filtración directa y/o utilización de medios filtrantes.

### 7.2 Ensayos de Jarras realizados

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de la Subgerencia de Plantas de Aguas Rionegrinas S.A., con asiento en la Planta Potabilizadora Viedma, a excepción de las jarras del día 11-7-17 que se realizó en la misma Planta Potabilizadora Valcheta.

El Instrumental utilizado fue:

Turbidímetro portátil Hach 2100Q, Rango de medición: 0 - 1000 NTU; Rango de temperatura de operación: 0 - 50 °C; Repetitividad:  $\pm 0.003$  FNU  $\pm 0,5\%$  de la lectura; Requisitos de muestra: 15 ml.

Medidor multi paramétrico portátil Hach HQ40D con sonda de Fluoruro modelo ISEF12101; Rango de medición: 0,01 mg/l ( $5 \times 10^{-7}$  M) a 19.000 mg/l (1 M) de Fluoruro; Rango de temperatura de operación: 5 - 50 °C; Requisitos de muestra: 25 ml.

Medidor de pH portátil Hach Pocket Pro+; Rango: pH de 0,00 a 14,00; Rango de temperatura de operación: 0 - 50 °C; Resolución: 0,01 de pH

Equipo para ensayo de Test de Jarras (Jar Test), de cuatro Ensayos de 1 litro dispuestos en forma radial, Semi-Portátil, Velocidad variable 20-160 RPM, Luz inferior fría, Palas de Acero Inoxidable 304. Marca Parsec.

Equipo para ensayo de Test de Jarras (Jar Test), de seis Ensayos de 1 litro dispuestos en forma lineal, de laboratorio, Velocidad variable 20-160 RPM, Luz inferior fría, Palas de Acero Inoxidable 304. Marca Parsec.

Para las determinaciones de fluoruro se utilizó la sonda ISE, siendo esta la técnica utilizada y certificada por el laboratorio central de Aguas Rionegrinas S.A. . Sin embargo, y dado la posibilidad de una interferencia en la determinación de fluoruros por la presencia de aluminio, se realizó la comprobación descartando dicha interferencia utilizando el método fotocolorimétrico (Hach-SPADNS), incluido en Anexo II.



Figura 12.- Laboratorio de la Subgerencia de Plantas de Aguas Rionegrinas

Se utilizaron los dos equipos de 4 y 6 jarras, realizando hasta 10 jarras ensayos simultáneos con la siguiente configuración:

- I. Mezcla rápida a 120 r.p.m. durante cinco minutos, para que se produzca la coagulación.
- II. Mezcla lenta a 50 r.p.m. durante veinte minutos, para la floculación.
- III. Reposo de 20 minutos, para sedimentar y posterior determinación de pH y Turbiedad, y fluoruros del sobrenadante.

Las pruebas experimentales realizadas fueron:

- 1.- Dependencia del coagulante - sulfato de aluminio vs. Policloruro de aluminio.
- 2.- Incidencia del pH en la remoción.
- 3.- Incidencia de la turbiedad inicial en la remoción.
- 4.- Coagulación rápida con sulfato de aluminio y PAC para filtración directa.

A los fines de sacar conclusiones de cada prueba, en el presente trabajo solo se incluyen las gráficas representativas del caso, incluyéndose los protocolos de los ensayos en el **Anexo II** del presente trabajo.

En el análisis no se debe perder de vista el doble fin de la coagulación, buscando el/los puntos de equilibrio para la efectiva remoción de turbiedad y fluoruros.

**7.2.1 Dependencia del coagulante - sulfato de aluminio vs. policloruro de aluminio.**

En la prueba se buscó comparar la eficiencia de los distintos coagulantes habitualmente utilizados en la potabilización de aguas superficiales como son el sulfato de aluminio y el policloruro de aluminio, para una muestra con Turbiedad inicial del orden de 5 NTU, pH 8,5 y  $[F]_0$  1,80 mg/l.

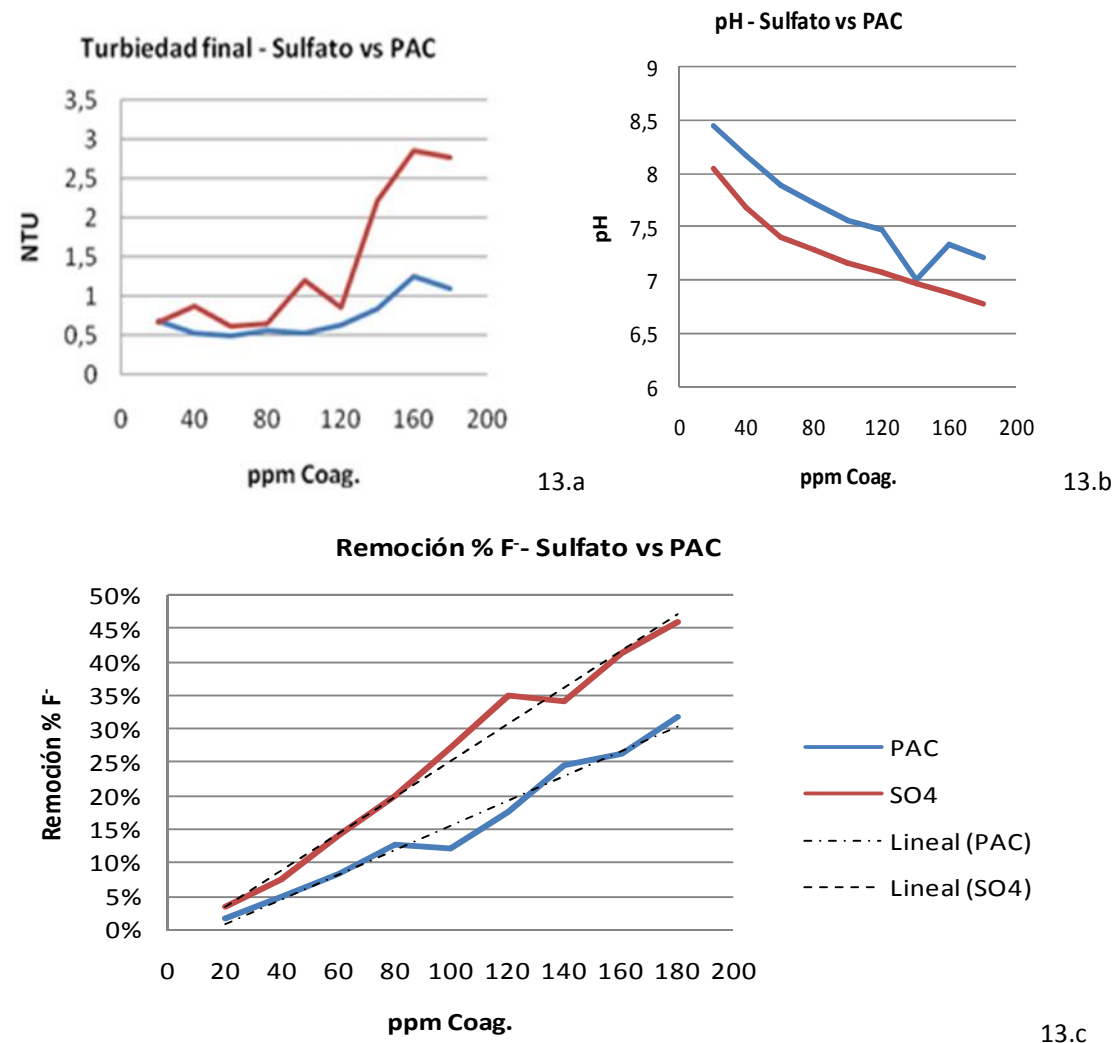


Figura 13.- Sulfato vs PAC, a) Turbiedad, b) pH, c) Remoción porcentual

Los resultados muestran una respuesta lineal de la remoción de flúor directamente proporcional a la concentración de coagulante agregado, que al compatibilizar este abatimiento con la remoción de partículas en suspensión, el sulfato de aluminio muestra ser óptimo hasta las 120 ppm obteniéndose una remoción de fluoruros del orden del 35% y 20%, para sulfato de aluminio y PAC, respectivamente.

El pH puede observarse que su efecto es inversamente proporcional a la dosis de coagulante, siendo más fuerte el efecto del sulfato, sin embargo, estas dosis no fueron suficientes para bajar el pH por debajo del límite de 6,5 establecido para agua de consumo.

### 7.2.2 Incidencia del pH en la remoción.

Como se mencionó en el punto 3.4.2, existe una estrecha relación entre el pH y la remoción de fluoruro, siendo este quien domina sobre las especies y precipitados Al:F durante la coagulación.

Para determinar esta relación e identificar el pH óptimo para la eliminación de fluoruro, se ajustó a los niveles de pH de las jarras dentro del intervalo de 5,5 a 7,0 para varias dosis de sulfato de aluminio evaluando la reducción de las concentraciones de fluoruro.

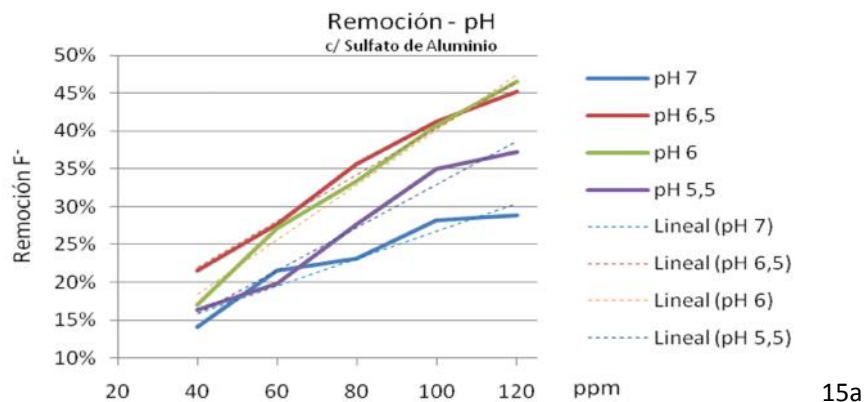
Los valores de pH en estas pruebas se obtuvieron agregando ácido clorhídrico ([HCl]=0,1 N) a las jarras en cantidades necesarias para que luego de la adición de sulfato de aluminio obtengamos el pH buscado, para lo cual se realizó una mezcla previa determinando las cantidades de ácido a dosar en cada jarra, consignadas en la Tabla 6.

Concentración [mg/l]	40	60	80	100	120
pH					
7±0,1	4 ml HCl (7,04)	3,2 ml HCl (7,04)	1,8 ml HCl (7,02)	0,8 ml HCl (7,01)	pH inicial: 6,96
6,5±0,1	9,1 ml HCl (6,51)	7,4 ml HCl (6,52)	6,6 ml HCl (6,51)	5,5 ml HCl (6,52)	4,5 ml HCl (6,51)
6±0,1	13,3 ml HCl (6,02)	12,4 ml HCl (6,03)	11,5 ml HCl (6,00)	10,3 ml HCl (6,01)	9,8 ml HCl (6,02)
5,5±1	15,3 ml HCl (5,51)	15 ml HCl (5,5)	14,1 ml HCl (5,51)	12,9 ml HCl (5,47)	12,7 ml HCl (5,54)

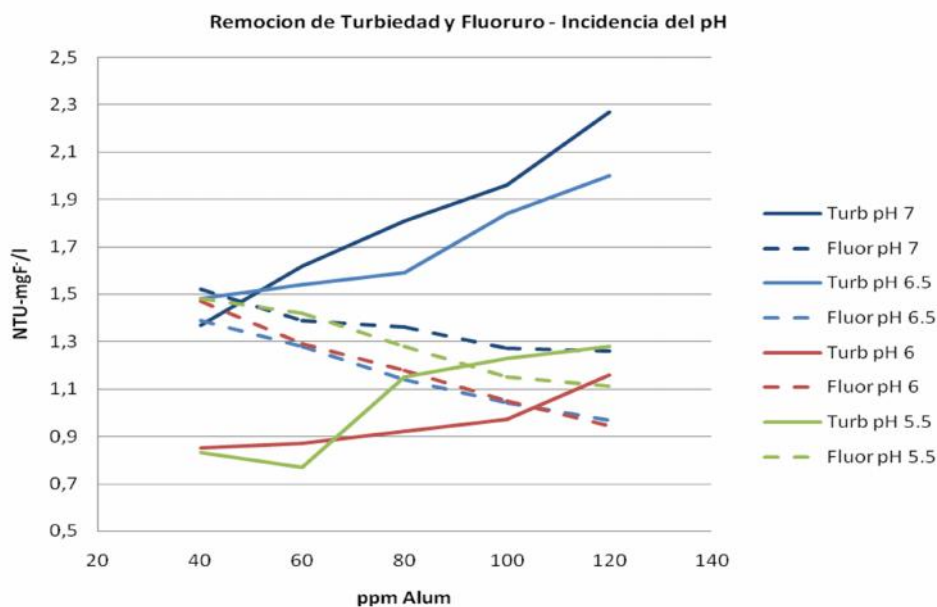
Tabla 5.- Volúmenes de ácido a adicionar en las jarras para obtener pH deseado.



Figura 14.- Jarras junto a vasos de precipitado con la cantidad de ácido y sulfato a dosar.



15a



15b

Figura 15.- Incidencia del pH en la remoción de F, a) Remoción %, b) Turbiedad y pH.

Claramente se aprecia la curva de pH 6, que en la práctica fue pH 6,2, se obtienen los mejores resultados de abatimiento de flúor también reflejados en la remoción de Turbiedad siendo este en el rango del pH óptimo de coagulación con sulfato de aluminio, confirmando de esta forma la importancia del pH en cualquier proceso de coagulación.

Para el caso de estudio, se consiguieron pHs cercanos a 6,5 con la sola adición de coagulante, teniendo en este rango de pH buenas eficiencias sin necesidad de corregir el pH final, ya que en operación no se utilizará ningún ácido para la corrección de pH, siendo este ajustado con la dosis de sulfato de aluminio.

### 7.2.3 Incidencia de la turbiedad inicial en la remoción.

Dado que la fuente de agua es superficial, con variaciones importantes en la cantidad de sólidos en suspensión, es importante evaluar cómo la presencia de estos intervienen en el proceso de remoción de flúor por lo que se comparó los datos obtenidos de ensayos con distintas turbiedades iniciales, Figura 16, de fechas 03/06/2016, 05/05/2017 y 11/07/2017.

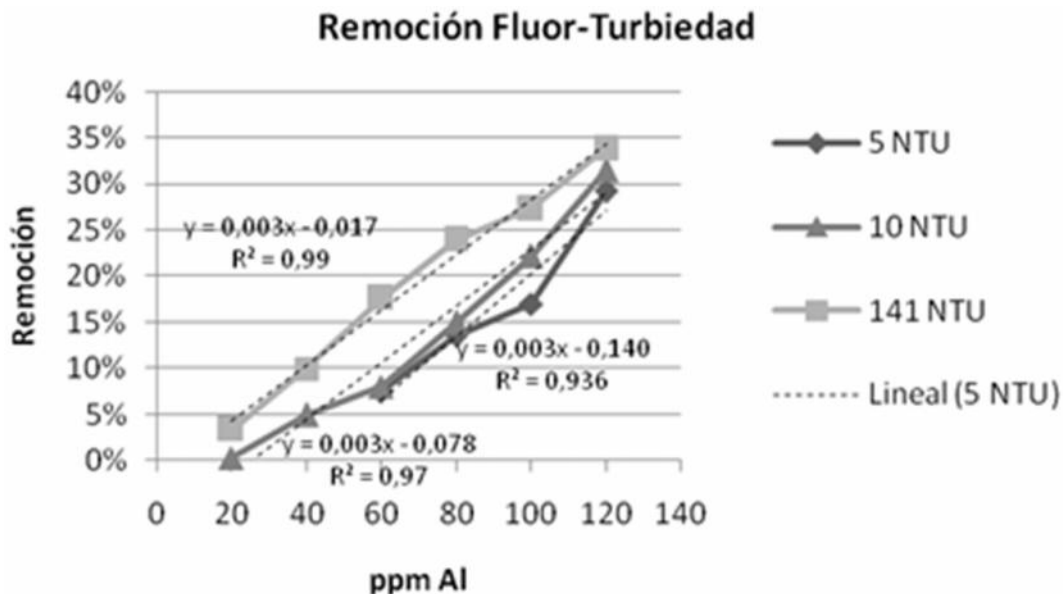


Figura 16.- Incidencia de la Turbiedad inicial.

Se observa que las líneas de tendencia de remoción (directamente proporcionales a la dosis) tienen prácticamente la misma pendiente y en la muestra de mayor turbiedad el porcentaje de eliminación de flúor es mayor, mostrando que la mayor cantidad de material en suspensión favorece el proceso, siendo esto conducente con que la mayor presencia de precipitados favorece el proceso de adsorción. Cabe destacar que dicha muestra de mayor turbiedad, tenía una [F-] inicial de 1,20 mg/l, y a pesar de esto los valores de remoción fueron altos.

**7.2.4 Coagulación con sulfato de aluminio y PAC para filtración directa.**

Pensado la posibilidad de la utilización de un proceso de filtración directa para la remoción de flúor probablemente para ser utilizado en otras aplicaciones como aguas subterráneas de baja turbidez inicial (< 1 NTU), se realizó este ensayo estandarizado de Coagulación rápida y filtración con papel Whatman N°40 (tamaño de poro = 8 µm), utilizando ambos coagulantes, en concentraciones del orden de las 50 ppm, comúnmente usadas en esta operación.

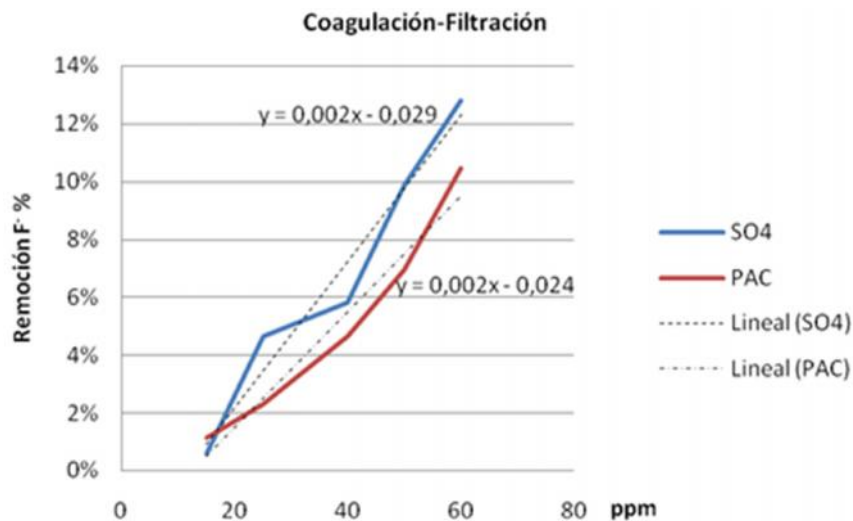


Figura 17.- Filtración directa – Sulfato de Al vs. PAC

Los resultados obtenidos pueden observarse en la Figura 17, donde puede apreciarse que la remoción de flúor es similar para ambos coagulantes (sulfato de aluminio y policloruro de aluminio), siendo levemente superior la performance del sulfato de aluminio, dando una alternativa para aguas de bajo contenido flúor, estando limitada por la adición de coagulantes *para evitar el taponamiento del medio a una remoción del orden del 10%*.

### 7.3 Prueba de Operación in situ

El día 11/07/2017 se realizó una prueba de operación en la planta existente para verificar los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio, y evaluar su comportamiento.

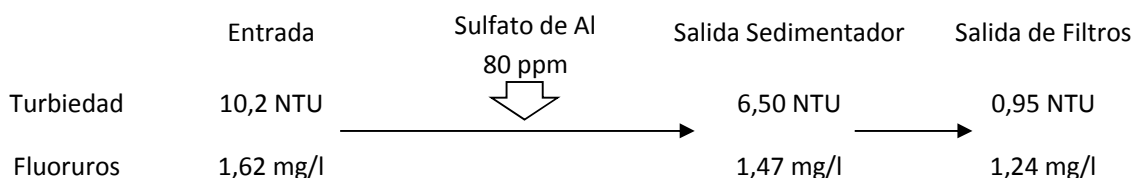
Normalmente la planta opera con dosis de sulfato de aluminio de 8 ppm para turbiedades de 5 a 15 NTU y de 30 ppm y 0,02 ppm de polielectrolito con turbiedades de 15 a 70 NTU, usando este último como coadyuvante de coagulación.

Para la prueba se utilizó como referencia los datos obtenidos en el ensayo de jarras hecho in situ (Tabla 7), sobre el cual se seleccionó la dosis de 80 ppm, dado que con la misma se esperaba obtener una buena coagulación para el abatimiento tanto de sólidos suspendidos y flúor, sin poner en riesgo la carrera de los filtros por taponamiento. Como medida de precaución adicional se bajó el régimen de trabajo a 23 m<sup>3</sup>/h, cuando el nominal es de 26 m<sup>3</sup>/h, de forma de no exceder la capacidad del módulo.

Jarra	mg/l	pH final	Turbiedad sobrenadante	Fluoruros [F] <sup>-</sup> * mg/l	Remoción
1	20	7,95	12,5	1,62	0%
2	40	7,68	5,98	1,54	5%
3	60	7,34	3,47	1,49	8%
4	80	7,3	2,23	1,38	15%
5	100	7,12	1,56	1,26	22%
6	120	7,1	1,79	1,11	31%

Tabla 6.- Resultados de Jar Test in situ

El objetivo era el de tomar muestras de la salida cada 40 minutos de operación, y de esta forma evaluar la saturación del módulo de tratamiento, pero luego de los primeros 40' el filtro comenzó a tomar carga por lo que se debió suspender el ensayo, obteniendo en ese momento los siguientes parámetros de operación:



Del análisis de los datos obtenidos, claramente se puede ver que el sedimentador del módulo no fue eficiente en la retención de las partículas floculadas pasando estas al filtro produciendo taponamiento del mismo. En los Ensayos de Jarras el sobrenadante orden de 2,23 NTU cuando en el módulo se registró 6,50 NTU a la salida del mismo.

Sin embargo, analizando los datos obtenidos de la experiencia se observó que los fluoruros fueron efectivamente coagulados y absorbidos en el material floculado, teniendo en la salida del filtro una remoción de 23,5% y una salida inferior de la concentración máxima admisible. (CMA)

#### **7.4 Conclusiones de los ensayos**

Los resultados de los ensayos indican que se puede remover fluoruros utilizando un proceso convencional de coagulación, floculación, sedimentación y filtración ajustando las condiciones del proceso.

El sulfato de aluminio resultó más efectivo para la remoción de fluoruros que el policloruro de aluminio.

El pH óptimo de remoción es 6,2 con sulfato de aluminio como coagulante y utilizando el tratamiento convencional de coagulación, floculación y sedimentación (C-F-S), se consiguió una remoción de fluoruro de 48% para 120 ppm de coagulante.

Dado que la mayor eficiencia se encuentra a valores de pH cercanos al límite de calidad de aguas de 6,5, es probable que la planta a escala real no requiera de la corrección final de pH, dependiendo esto de los valores de turbiedad, pH y fluoruros presentes en el agua cruda.

Los sedimentadores de alta carga, dado su forma constructiva con un ángulo de seditubos de 10°, no logran una clarificación eficiente. A su vez se vio influenciada por la gran densidad de partículas floculadas generadas con altas dosis de sulfato, por lo que se deberá aumentar la capacidad de los mismos para la implementación del tratamiento.

Por último, con todos los coagulantes utilizados se alcanzaron valores inferiores a los 1,5 mgF/l, Concentración Máxima Admisible establecida por la normativa vigente, con remociones que van del 20 al 50%, que, para el caso particular del agua del Aº Valcheta, son suficientes, ya que las concentraciones de fluoruros en el agua cruda son bajas.

## 8 PROPUESTA DE SOLUCION

De la evaluación de la planta potabilizadora de la localidad de Valcheta se concluyó que la misma tiene dificultades técnicas en el sedimentador principalmente acarreadas por el bajo ángulo de inclinación de los seditubos y ni siquiera llevando los módulos a su régimen nominal de 26 m<sup>3</sup>/h alcanza para la implementación práctica de la técnica de remoción de fluoruros por coagulación.

Esto derivó en la generación de un proyecto para la construcción de una nueva planta convencional que atienda las necesidades de tratamiento de agua de consumo, con la efectiva remoción de fluoruros, capaz de atender la demanda del sistema de distribución de Agua Potable con un horizonte de diseño de 20 años.

### 8.1 Estudio de la demanda

Los resultados definitivos del censo 2010 realizado por el INDEC, arrojaron que la localidad posee 3867 habitantes, si se toman los dos Censos anteriores también realizados por el INDEC y se ajusta linealmente la población a 2017, obtenemos que a la fecha la localidad debería tener la suma de 4007 habitantes.

Tomando una dotación de 300lts/hab. día y el Agua no contabilizada en un valor de 25%, llegaríamos a una producción necesaria horaria en Planta Potabilizadora de 87 m<sup>3</sup>/h, 83% de la capacidad hoy instalada, por consiguiente la capacidad instalada debería alcanzar para suplir la demanda supuesta, situación que no se condice con la realidad. Esto refleja que los valores del Censo son inferiores a la cantidad de gente que hoy habita la localidad, situación que ya había adelantado la Secretaria de Gobierno Municipal de la localidad.

Otros valores de referencia para reforzar esta hipótesis son que la localidad cuenta con 1666 cuentas activas de Agua Potable y la empresa de energía Edersa nos informa que hay 1700 medidores de luz en la localidad. Si tomáramos de base los 4007 habitantes obtendríamos 2,4 habitantes por vivienda, incongruente con los datos censales.

Con el fin de estimar la población de la localidad a fin de establecer los caudales de diseño de la Planta Potabilizadora se usaron los padrones electorales de las últimas tres elecciones en la localidad correspondientes con:

- Presidente – Vicepresidente / Diputados Nacionales 2011
- Senadores Nacionales / Diputados Nacionales 2013
- Presidente – Vicepresidente / Diputados Nacionales / Diputados Mercosur 2015

Dado que la edad de votantes es de 16 años se tuvo que contemplar esta franja no existente en el Padrón Electoral.

De la distribución de personas por edades perteneciente al Censo INDEC 2011, se obtuvo que un 30,66% de la población total de la Localidad corresponde a la franja 0 a 16 años, consecuentemente para estimar la población de la localidad, a la cantidad de personas habilitadas para votar, se le adicionó este porcentaje a fin de estimar la población total de la localidad.

Con esta modificación la población estimada para el año cero correspondiente al 2017 es de 4787 personas, el caudal necesario sería de 104 m<sup>3</sup>/h, acorde a la situación planteada, donde esta demanda solo es satisfecha para los meses de invierno. En base a las 1700 conexiones de luz la cantidad de personas por vivienda alcanza un valor de 3,11, valor más representativo de la población actual.

**8.1.1 Proyección demográfica por ajuste lineal de la tendencia histórica - Base Datos Justicia Electoral.-**

Se adopta el método de proyección demográfica por ajuste lineal de tendencia histórica, aplicando la recta de ajuste resultante de la regresión lineal de los valores de población total ajustada a partir de los padrones de los últimos tres comicios. Cap II Fundamentaciones y Criterios de Diseño – ENOHSa.

Ecuación de la recta de proyección poblacional:

$P_n = a + b \cdot n$

Donde:

$P_n$  = población total al año  $n$ .

$n$  = número de años medido desde el año calendario inicial de la proyección hasta el año calendario en análisis.

$a$  y  $b$  = coeficientes de la recta.

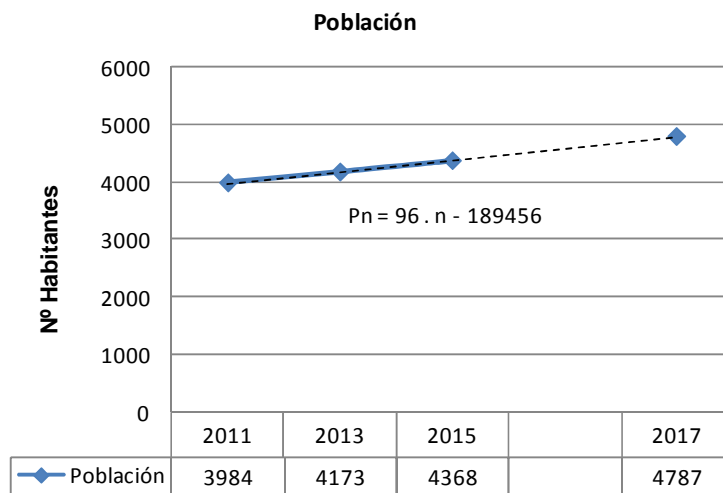


Figura 18.- Proyección lineal población Valcheta

**8.1.2 Caudales de diseño**

De acuerdo a lo establecido por los Criterios de Diseño del ENOHSa y a los valores usuales de la Provincia, y en coincidencia con los datos aportados por Aguas Rionegrinas S.A., adoptamos como dotación de consumo el siguiente valor:

Dotación consumo = 300 litros/hab.día.

Para la determinación del caudal máximo diario ( $Q_D$ ) y máximo horario ( $Q_E$ ), ambas referidas al caudal medio anual ( $Q_C$ ) se adoptan los siguientes coeficientes de pico de acuerdo a los criterios de diseño del ENOHSa:

Población servida	1	2	
500 < Pob 3000	1,40	1,9	2,66
3000 < Pob 15000	1,40	1,7	2,38
15000 < Pob	1,30	1,5	1,95

Coficiente día de máximo consumo  $\alpha_1 = 1,40$

Coficiente máximo del día de máximo consumo  $\alpha_2 = 1,70$

Coficiente total  $\alpha = \alpha_1 * \alpha_2 = 2.66$

En consecuencia los caudales característicos resultan:

Caudal medio diario anual  $Q_C = \text{dotación} * \text{población}$

Caudal máximo diario  $Q_D = \alpha_1 * Q_C = 1.40 * Q_C$

Caudal máximo horario  $Q_E = \alpha * Q_C = 2.66 * Q_C$

Resultando:

Año	Población Total Adoptada	Dotación de consumo [lts/hab*día]	Agua no contabilizada (ANC)	Dotación Aparente [lts/hab*día]	$Q_C$ [m³/día]	$Q_D$ (1.4* $Q_C$ ) [m³/hs]	$Q_E$ (1.7* $Q_C$ ) [lts/seg]
2017	4787	300	25%	375	1795	97,24	35,32
2018	4272	300	25%	375	1602	86,78	31,52
2028	5232	300	25%	375	1962	106,28	38,60
2038	6192	300	25%	375	2322	<b>135,45</b>	45,69

Tabla 7.- Caudales de diseño

Se adopta como Caudal de Diseño a 20 años **140 m3/h**. Primer etapa a 10 años caudal 110 m3/h.

## 8.2 Descripción del proyecto

La Planta se proyectó en los terrenos de la planta actual (16-2-095278), ubicado en cercanías del arroyo Valcheta, será del tipo convencional construida en HªAª diseñada para un caudal de 140 m3/h, el esquema funcional y parámetros de funcionamientos de los puntos subsiguientes.

El nuevo sistema de provisión deberá resolver problemas actuales de calidad del agua, en particular el exceso de flúor y de turbidez en algunas épocas del año, cubriendo la demanda de los próximos 20 años, conformada por los siguientes componentes:

- Reacondicionamiento de Estación de bombeo de agua cruda.
- Cámara de carga de agua cruda.
- Aforador y mezclador con Canaleta Parshall.
- Floculador mecánico de paletas verticales.
- Decantador de placas inclinadas de alta carga.
- Filtro de arena a gravedad de flujo vertical descendente, a Velocidad Constante.
- Tuberías y canaletas de vinculación entre los diferentes componentes.
- Cisterna operacional de elevación a Cisterna de distribución.
- Instalaciones para la dosificación de productos químicos para la coagulación del agua.
- Instalaciones para la dosificación de desinfectantes para el agua ( cloración ).
- Cañería bypass de floculador y decantador para filtración directa.
- Sistema de Tratamiento de barro – Filtro Prensa.
- Instalaciones para el operador, laboratorio, sala de operación, cocina, y baños.

El proceso prevé la adición de coagulante utilizando sulfato de aluminio y coayuvante de coagulación mediante el uso de polielectrolito, corrección de pH con lechada de cal, y desinfección con hipoclorito de sodio al 10%.

### 8.2.1 Esquema de planta a proyectar

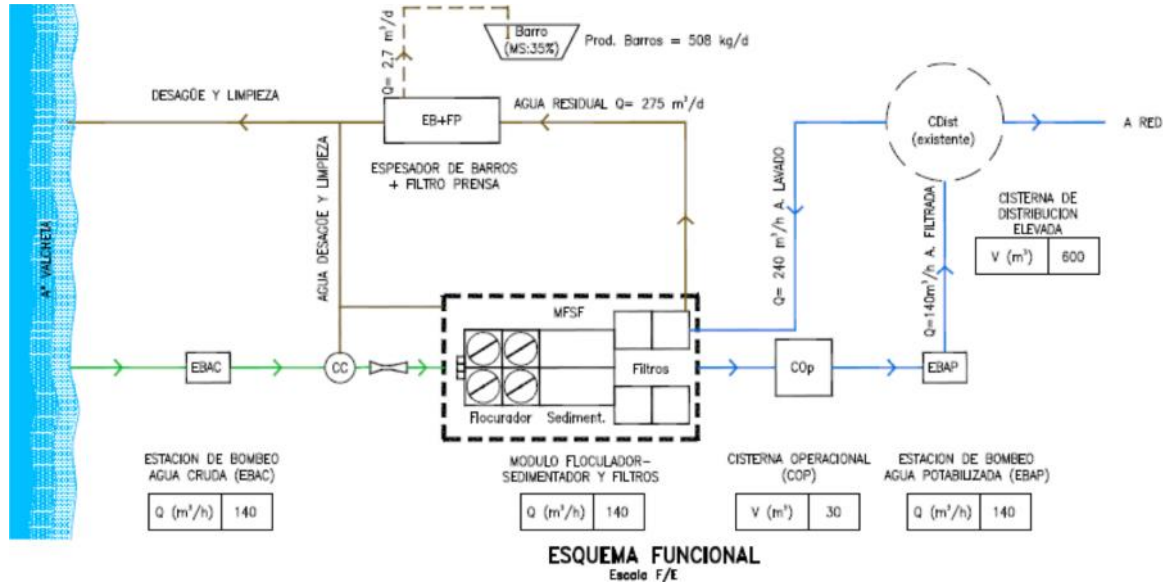


Figura 19.- Esquema Funcional Proyecto Pta. Potabilizadora Valcheta – Ver ANEXO III

### 8.2.2 Parámetros de diseño

La nueva planta potabilizadora deberá ser proyectada con los siguientes parámetros de diseño, a los efectos de alcanzar el doble objetivo de remoción de turbidez y fluoruros.

Solo se dimensionaron los principales componentes del sistema como son Mezcla completa, Floculación, Sedimentación y Filtros, quedado para el proyecto ejecutivo el cálculo hidráulico de circulación del agua en el sistema.

Además, se contempló y pre dimensionó el sistema de tratamiento de barros requeridos, dada las concentraciones de aluminio y flúor resultantes en el efluente de la planta producto del tratamiento con altas concentraciones de coagulante para la remoción de los fluoruros.

#### 8.2.2.1 Mezcla Rápida

Se optó por una canaleta Parshall con el doble propósito de aforar caudales de producción y como punto de inyección y mezcla de los coagulantes.

De acuerdo a los diseños estandarizados, las características de la misma se indican a continuación (Azevedo Netto – Acosta,1976).

Para  $Q_{D20} = 140 \text{ m}^3/\text{h} = 38,88 \text{ lt/s}$  ;  $Q_{D10} = 110 \text{ m}^3/\text{h} = 30,55 \text{ lt/s}$

Se selecciona la canaleta con ancho de garganta  $W = 6''$  (152,4 mm)

Rango de medición de caudales:  $\Delta Q = 1,52 \text{ a } 110,4 \text{ lt/s}$ . VERIFICA

Ecuación del caudal medido:  $Q = k \cdot h^u = 0,3812 \cdot h^{1,58} (\text{m}^3/\text{seg})$

Ecuación de la altura del tirante:  $h = k \cdot Q^u = 1,8413 \cdot Q^{0,633} (\text{m})$

En la Tabla 9, verificamos los gradientes correspondientes a los caudales de diseño a 10 y 20 años.

Variable	Definición	Unidades	Caudales de cálculo	
Q	Caudal	(m <sup>3</sup> /h)	110	<b>140</b>
Q	caudal	(m <sup>3</sup> /seg)	0,031	0,039
ho	tirante medio para los Q medido en el punto de medición a	(m)	<b>0,200</b>	<b>0,234</b>
q	caudal unitario q= Q / W	(m <sup>3</sup> /seg m)	0,201	0,256
Uo	veloc en la sección de medición Uo=Q/(D <sup>n</sup> *ho)	(m/s)	0,484	0,529
Eo	Carga Hidraulica disponible Eo = (Uo <sup>2</sup> /2g)+ho+N	m	0,326	0,362
∅	Cos ∅ = - q.g/( 2/3.g.Eo) <sup>1,5</sup>	°	129,241	133,594
U1	velocidad en el resalto, sector divergente U1=2*(2g*Eo/3) <sup>0,5</sup> *(cosf/3)	(m/s)	2,134	2,193
h1	tirante en el inicio del resalto = q/U1	(m)	0,094	0,117
F1	Numero de Froude		2,220	2,050
h2	tirante líquido en el final del resalto h2 = (h1/2)*(-1+(1+8*F1 <sup>2</sup> ) <sup>0,5</sup> )	(m)	<b>0,252</b>	<b>0,285</b>
U2	velocidad en h2 = q/h2	(m/seg)	0,797	0,898
h3	altura al final del sector divergente h3=h2-(n-k)	(m)	0,062	0,095
U3	velocidad en h3 = Q/C*h3)	(m/seg)	1,244	1,040
hf	perdida de carga en el resalto hf= (h2-h1) <sup>3</sup> / (4h1*h2)	(m)	<b>0,042</b>	<b>0,036</b>
Lr	longitud del resalto =6*(h2-h1)	(m)	0,949	1,009
tm	tiempo de mezcla = 2 Lr/(U1+U3)	(seg)	0,562	0,624
s	sumergencia = (ho-hf)/ho	-/-	<b>0,792</b>	<b>0,847</b>
G	gradiente de velocidad=((p*g*hf)/(u*tm)) <sup>0,5</sup>	(1/s)	<b>798</b>	<b>703</b>
p	peso específico del agua a 15°	(kg/m <sup>3</sup> )	999,130	
u	viscosidad dinámica del agua a 15°	(N.m /seg)	0,001	

Tabla 8.- Cálculo de gradiente de mezcla rápida en canaleta Parshall

Siendo  $G_{10} = 800 \text{ s}^{-1}$  y  $G_{20} = 700 \text{ s}^{-1}$ , dentro del rango recomendado por ENOHSA de 500-1200  $\text{s}^{-1}$ .

### 8.2.2.2 Dimensionado de floculadores

El clarificador se divide en 2 (dos) líneas, cada una con 2 (dos) cámaras de floculación en serie con gradientes de 60  $\text{s}^{-1}$  y 30  $\text{s}^{-1}$  respectivamente.

#### Cámaras:

La determinación del volumen del floculador se realiza a partir de la adopción del valor del Tiempo de Permanencia o retención hidráulica (TRH).

Teniendo en cuenta las recomendaciones del ENOHSA el tiempo de floculación debe estar comprendido entre 20 a 30 minutos cuando el proceso que sigue es la decantación ENOHSA (Criterios. Cap5).

Se adopta un valor de:

**TRH= 24 minutos** ; Número de cámaras 2 en serie por clarificador.

El caudal de diseño del cada floculador:  $Q_{\text{dis}} = 70 \text{ m}^3/\text{h}$

Volumen floculador:  $\text{Vol}_{\text{floc}} = (70 \text{ m}^3/\text{h} / 60 \text{ min}) \times 24 \text{ min} = 28 \text{ m}^3$

Nro. de cámaras: 2 :  $\text{Vol}_{\text{cam}} = 28 \text{ m}^3 / 2 = 14 \text{ m}^3$

Sección transversal adoptada:  $S_{\text{floc}} = 2,4\text{m} \times 2,4\text{m} = 5,76 \text{ m}^2$

Tirante líquido:  $h_{\text{floc}} = 14 \text{ m}^3 / 5,76\text{m}^2 = 2,45 \text{ m}$ .

#### Verificación del gradiente de mezcla G y la energía total aplicada G\*T:

Fijadas las dimensiones interiores libres del floculador, se adoptan las dimensiones de las paletas agitadoras y se calculan para distintos número (nº) de revoluciones por minuto (rpm) los valores de la energía total aplicada (G\*T) que representa el gradiente de mezcla necesario para la formación del floc, y potencia entregada.

La expresión general para calcular G (gradiente de mezcla) en floculadores de paletas paralelas al eje vertical es (ENOHSa, Fundamentación - Cap. VII - 7).

Parámetro	Significado	Unidades	G (1/seg)	
			70	30
g	aceleración de la gravedad	m/seg <sup>2</sup>	9,81	9,81
μ	viscosidad dinámica	N. Seg/m <sup>2</sup>	0,00124	0,00124
ρ	Masa específica	Kg/m <sup>3</sup>	1000	1000
V	volumen de la cámara	m <sup>3</sup>	14	14
b	ancho de la paleta	m	0,15	0,15
l	largo de la paleta	m	2,2	2,2
Cd	Coeficiente. de arrastre	-/-		
	Cd= 1,10+0,02*[(b/l)+(l/b)]		1,40	1,40
k	veloc. agua / veloc. paletas.	-/-	0,25	0,25
rel	Relacion de reductor	1: _	250	450
n°	n° de revoluciones por minuto.	rpm	5,80	3,22
n	n° de revoluciones por seg.	rps	0,10	0,05
r2	radio a la 2ª paleta	m	0,8	0,8
r3	radio a la 3ª paleta	m	1,1	1,1
G	$G = 5 \sqrt{\frac{\rho g}{\mu}} [C_d (k - \lambda)^2 \cdot n^3 \cdot b \cdot l (r_1^2 + r_2^2 + \dots)]$	1/seg	<b>68</b>	<b>28</b>
P	potencia aplicada en máx. G			
	P=u*V*G^2	watt	85,064	15,624
P"	potencia aplicada en máx. G			
	P"=P*0,001341/0,7	<b>HP</b>	<b>0,16</b>	<b>0,03</b>
Q	caudal de diseño	m <sup>3</sup> /h	70	70
TRH	tiempo de retención hidráulica	minutos	24	24
T	tiempo total de retención	seg	1440	1440
G*T	energía total aplicada	adimen.	<b>97493</b>	<b>40370</b>

Tabla 9.- Cálculo de floculadores

Los valores de GT determinados en la tabla anterior se corresponden con los necesarios para producir la floculación en ambas cámaras y cumplen con lo especificado en las recomendaciones del ENOHSa  $10 \text{ s}^{-1} < G < 70 \text{ s}^{-1}$  y  $23.000 < G*T < 210.000$ .

### 8.2.2.3 Decantadores

El agua proveniente del floculador es ingresada a un decantador de placas inclinadas de alta carga. Estos consisten esencialmente en una serie de tubos (circulares, cuadrados o hexagonales), o láminas planas paralelas colocadas en un tanque apropiado con un ángulo de inclinación (adoptándose en general 60°) de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar. Esto permite cargas superficiales entre 120 y 180 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.día.

#### Parámetros de diseño

Se han tomado los siguientes parámetros de diseño:

Caudal de diseño:  $Q_{D20} = 140 \text{ m}^3/\text{h} = 0,039 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Número de módulos de decantación:  $N = 2$ .

Caudal por módulo  $Q_{dec} = Q_{D20} / N = 140 (\text{m}^3/\text{h}) / 2 = 70 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0194 \text{ m}^3/\text{s}$

*Área del decantador*

Se adoptan las dimensiones del decantador y luego se verifica el régimen laminar.

$$\text{Área} = L * B$$

$L_{\text{dec}}$  = longitud del decantador (m)

B = ancho del decantador (m)

$$L = 4,10\text{m}$$

$$B = 2,60\text{ m}$$

$$\text{Área} = 2,60 * 4,10 = 10,66\text{ m}^2.$$

*Verificación de la carga superficial.*

La carga superficial  $U_{sc}$  de un decantador debe oscilar entre 120 y 180  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{día}$ .

Luego para el presente caso se tiene:

$$U_{sc} = Q_{\text{dec}} / A = 0,0194\text{ (m}^3/\text{s)} / 10,66\text{ m}^2 = 0,00182\text{ m/s} = \mathbf{157,24\text{ m/día}} \quad (\text{verifica condición})$$

*Determinación del Nº de Placas.*

Se adopta la longitud de las placas  $L_p$  y luego se verifica el régimen laminar.

$$L_p = 1,3\text{ m.} \quad (\text{valor adoptado})$$

$$d = 0,05 \quad (\text{separación entre placas})\text{ (m)}$$

$$\theta = \text{inclinación de las placas} = 60^\circ$$

$L_o$  = proyección horizontal de la placa (m)

$$L_o = L_p * \cos\theta = 1,3 * \cos 60^\circ = 0,65\text{m}$$

$L_n$  = longitud neta del sedimentador

$$L_n = L_{\text{dec}} - L_o = 4,10 - 0,65 = 3,45\text{ m.}$$

$N_p$  = número de placas del sedimentador

$$N_p = L_n / d = 3,45 / 0,05 = 69$$

*Longitud corregida por el espesor de las placas*

$$L_{\text{dec,corr}} = \text{longitud corregida} = L_o + N_p * (d + e)$$

$$e = 0,001\text{ m (espesor de la placa)}$$

$$L_{\text{dec,corr}} = 0,65 + 69 * (0,05 + 0,001) = 4,17\text{ m}$$

$$L_{\text{dec,adoptado}} = 4,20\text{ m}$$

*Caudal por placa*

$$q = Q_{\text{dec}} / N_p = 0,0194\text{ (m}^3/\text{s)} / 69 = 0,00028\text{ m}^3/\text{s}$$

$$q = 0,00028\text{ m}^3/\text{s} = 1,012\text{ m}^3/\text{h} = 24,3\text{ m}^3/\text{día}$$

*Verificación del régimen laminar.*

$$Re = U_{em} \cdot d / \nu$$

$$U_{EM} = V_0 = Q / \text{AREA CANAL} = Q / (B \cdot D) = 0,00028 / (2,60 \cdot 0,05) \text{ m/s}$$

$$U_{em} = V_0 = 0,0021 \text{ m/s}$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$

$$\nu = (\text{viscosidad cinemática}) = 0,00000146 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re = 0,0021 \cdot 0,05 / 0,00000146 = 71,90 < 250 \text{ por lo tanto se verifica el régimen laminar.}$$

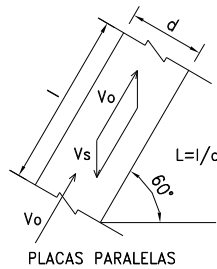


Figura 20.- Esquema de velocidades entre placas paralelas del decantador.

*Velocidad de sedimentación crítica*

Para determinar la velocidad de sedimentación crítica se utiliza la expresión de Yao

$$U_{sc} = Sc \cdot U_{em} / [\text{sen}60^\circ + (L_p/d) \cdot \text{cos}60^\circ]$$

$$U_{em} = 0,0021 \text{ m/s}$$

$$\text{Sen}60^\circ = 0,866$$

$$L_p / d = 1,30 / 0,05 = 26$$

$$\text{Cos}60^\circ = 0,5$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$

Sc = factor de forma = 1(para placas planas) = 1,33 (para tubos circulares) = 1,375 (para tubos cuadrados).

$$U_{sc} = 0,00015 \text{ m/s (para placas planas)} = 12,96 \text{ m/día}$$

$$U_{sc} = 0,00020 \text{ m/s (para tubos circulares)} = 17,28 \text{ m/día}$$

$$U_{sc} = 0,00028 \text{ m/s (para tubos cuadrados)} = 24,19 \text{ m/día}$$

De acuerdo con los resultados anteriores las dimensiones internas del decantador para colocar las placas resultan:

$$\text{Ancho: } B = 2,60 \text{ m}$$

$$\text{Largo: } L = 4,20 \text{ m}$$

Las placas estarán constituidas por tubos de sección hexagonal de paredes plásticas que se arman en paquetes de 1,20 m de ancho, por igual alto y largo y con el ángulo de inclinación de 60° con respecto a la horizontal; irán soportados por perfiles inferiores longitudinales.

*8.2.2.4 Filtros rápidos a gravedad descendentes*

Las recomendaciones del ENOHSa para el diseño de estos equipos establecen las siguientes condiciones básicas:

Parámetros básicos para diseño y verificación

Velocidad de filtración:  $< 200 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$

Velocidad de contra lavado: 0,60 - 1 m/min – Adoptada 0,75 m/min

Lecho filtrante: arena sobre manto sostén de gravas

Expansión del lecho: 15 a 25 %

Para esta instalación en particular es conveniente adoptar 4 (cuatro) unidades de filtración, teniendo en cuenta que en la operación de retrolavado de una unidad, las demás permanecen en operación con una sobrecarga del 33 %.

El caudal de diseño establecido incluye los caudales necesarios para la operación de la planta es decir el agua de lavado de los filtros, el de consumo para preparación de químicos y el de servicio de limpieza de las instalaciones; el volumen que se suele adoptar en estos usos es del 5% de la producción máxima diaria de la planta:

Por lo tanto los caudales netos de producción y unitario por filtro resultan:

Caudal bruto de producción:  $140 \text{ m}^3/\text{h}$

Cantidad de unidades de filtrado: 4

Producción bruta por filtro:  $140 / 4 \text{ m}^3/\text{h} = 35 \text{ m}^3/\text{h}$

Producción bruta diaria:  $140 \text{ m}^3/\text{h} * 24 \text{ hs} = 3360 \text{ m}^3/\text{día}$

*Dimensionado de filtro*

## - Filtrado

Se adopta el largo y el ancho y luego se verifica la velocidad de filtración.

Ancho = 2,30 m

Largo = 2,30 m

Superficie filtrante =  $2,30 * 2,30 = 5,29 \text{ m}^2$  - Cantidad de filtros = 4

Superficie total de filtros =  $5,29 * 4 = 21,16 \text{ m}^2$

Velocidad de filtración =  $140 \text{ m}^3/\text{h} / 21,16 \text{ m}^2 = 6,58 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} = 157,44 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$

Cumple con recomendación del ENOHSa que limita la velocidad máxima a  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ .

Fundamentaciones Cap VII.

Velocidad de filtración con 3 filtros (Lavado) =  $8,82 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} = 211,72 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  – ACEPTABLE

## - Lavado

Caudal de lavado por cada filtro =  $0,75 \text{ m}^3/\text{min} * 60 \text{ min}/\text{h} * 5,29 \text{ m}^2 = 238 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Tiempo de lavado medio por cada filtro = 10 minutos.

Volumen de lavado medio por filtro =  $(238/60) * 10 = 39,7 \text{ m}^3$

Volumen de lavado medio por los 4 filtros =  $39,7 * 4 = 158,8 \text{ m}^3$

- Enjuague

Velocidad de enjuague = 15 m/h

Tiempo de enjuague promedio = 5 minutos

Volumen de enjuague por cada filtro  $((15 \cdot 5,29)/60) \cdot 5 = 6,61 \text{ m}^3$

Volumen medio consumido por filtro (lav. + enj.) =  $(39,7 + 6,61) = 46,31 \text{ m}^3$

Volumen medio consumido por los 4 filtros (lav. + enj.) =  $(46,31 \cdot 4) = 185,24 \text{ m}^3$

Volumen máximo consumido por filtro (lav. + enj.) =  $(59,5 + 6,61) = 66,11 \text{ m}^3$

Volumen máximo consumido por los 4 filtros (lav. + enj.) =  $(66,11 \cdot 4) = 264,44 \text{ m}^3$

Ciclos promedio de lavado = La carrera máxima de filtración es de 24 hs.

Consumos para operación =  $264,44 \text{ m}^3/\text{día} = 7,9\%$  de la producción - ACEPTABLE

Producción neta:  $3360 - 264,44 = 3095 \text{ m}^3/\text{día} = 129 \text{ m}^3/\text{h}$

*Manto filtrante*

Las unidades de filtración tendrán un manto de arena, y un manto soporte de lecho de grava graduada; las características principales son las siguientes:

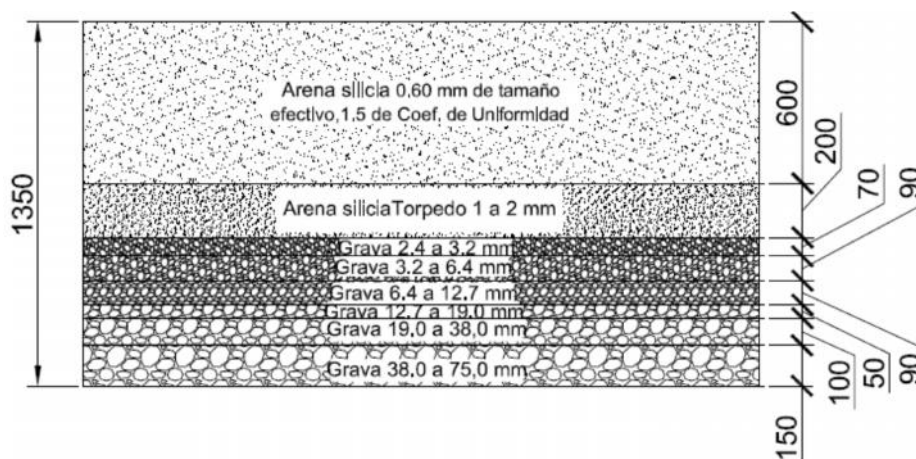


Figura 21.- Esquema del manto filtrante de arena, y un manto soporte de lecho de grava graduada

8.2.2.5 *Tratamiento de barros*

Dado la generación de un efluente con un alto contenido de sólidos, producto de la coagulación con aluminio, es necesario tratarlos para evitar el impacto de estos sobre el medio ambiente.

*Concentración de barro generado en la sedimentación*

$$C_{sl} = C_{coag} (CR) + TSS + C_{aid} \quad (\text{Howe, 2012})$$

Donde:

$C_{sl}$  = la concentración de barro producido,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$C_{coag}$  = dosis de coagulante,  $\text{kg}/\text{m}^3$  – Adoptado  $150 \text{ mg}/\text{l} = 0,15 \text{ kg}/\text{m}^3$

TSS = sólidos totales en suspensión,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , estimados en  $1,4 \text{ gTSS}/\text{m}^3 \cdot \text{NTU}$  removida

$C_{aid}$  = dosis de coadyuvante de coagulación y otros aditivos,  $\text{kg}/\text{m}^3$

CR = índice de barros producidos = 0,36

$$C_{sl} = 0,15 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,36 + 50 \text{ NTU} \cdot 1,4 \text{ gTSS}/\text{m}^3 \cdot \text{NTU} \cdot 10^{-3} \text{ Kg}/\text{g} = 0,124 \text{ kg}/\text{m}^3$$

*Masa seca de barro de sedimentador*

$$M_{sl} = Q \cdot C_{sl} = 3360 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 0,124 \text{ kg}/\text{m}^3 = 419 \text{ kg}/\text{d}$$

El volumen estimado de purga de barro generado es, asumiendo una concentración de sólidos de 5% correspondiente con un peso específico de 1,05, y la temperatura del agua a 15°C (998,2 kg/m<sup>3</sup>);

$$V_{sl} = 419 \text{ kg}/\text{d} / (998,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,05 \cdot 1,05) = 7,8 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Volumen } \%, \text{ sobre el caudal total} = 7,80 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 100 / 3360 \text{ m}^3/\text{d} = 0,23 \%$$

*Concentración de barro generado en el lavado de filtros*

$$C_{sl} = C_{coag} (CR) + TSS + C_{aid} \quad (\text{Howe, 2012})$$

Considerando la turbiedad residual del agua sedimentada < 10 NTU, y carreras de filtro de 24 hs.

$$C_{sl} = 24 \cdot 10 \text{ NTU} \cdot 1,4 \text{ gTSS}/\text{m}^3 \cdot \text{NTU} \cdot 10^{-3} \text{ Kg}/\text{g} = 0,336 \text{ kg}/\text{m}^3$$

*Volumen diario de efluente*

De acuerdo a valores obtenidos para agua de lavado de filtros (7,9%) y de purga de barros del sedimentador, el volumen diario de efluentes en;

$$V_{ST} = \text{volumen de efluentes total} = (0,23 \% + 7,9 \%) \cdot 3360 \text{ m}^3/\text{d} =$$

$$V_{ST} = 273,17 \text{ m}^3/\text{d} = \mathbf{275 \text{ m}^3/\text{d} \text{ aprox.}}$$

Caudal de agua tratada m <sup>3</sup> /d	Purga del sedimentador 0,23%		Lavado de filtros 7,90%		Mezcla 8,13%		Masa seca Producida kg/d
	Volumen m <sup>3</sup> /d	Concentración kg/m <sup>3</sup>	Volumen m <sup>3</sup> /d	Concentración kg/m <sup>3</sup>	Volumen m <sup>3</sup> /d	Concentración kg/m <sup>3</sup>	
3360	7,8	53,7	265,44	0,336	273,24	1,86	508

Tabla 10.- Resumen de Residuos generados en el tratamiento convencional

*Espesamiento y deshidratado de barros*

El objetivo del tratamiento final es el de alcanzar una concentración de barros del 35 % partiendo de una concentración inicial de 0,18 %.

El tren de tratamiento de barros estará compuesto por un espesador por gravedad para alcanzar el 8%, y un filtro prensa para conseguir el 35%. Los filtros prensa son adecuados en grandes plantas para tratar barros de ablandamiento con cal y con sales de aluminio, con el agregado de productos químicos para floculación y/o ajuste de pH.

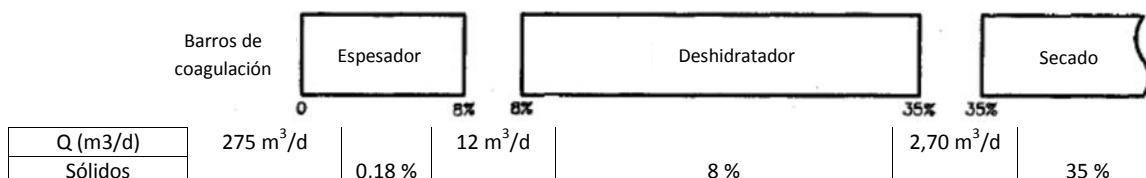


Figura 22.- Esquema funcional de la línea de tratamiento de barros

En el ANEXO III – Esquema funcional se volcaron los parámetros de diseño para el proyecto ejecutivo de la planta.

## 9 CONCLUSIÓN FINAL

*Se demostró que se puede remover flúor de la fuente de agua superficial disponible, mediante un proceso convencional de potabilización adecuando las condiciones de coagulación, alcanzando concentraciones del orden de 1 mgF/l y remoción de hasta 30% de este ion, suficiente para conseguir la aptitud de esta para agua de consumo. La implementación del proceso requiere considerar que al trabajar con dosis altas de coagulante, siendo factible la utilización de sulfato de aluminio en el proceso dado al alto pH característico de la fuente, utilizando el mismo coagulante para el ajuste de pH a valores menores a 7, condición que mejora la coagulación. Las unidades de sedimentación y de filtración deben adecuarse a la mayor cantidad de partículas que se generan, siendo los sólidos retenidos en estas de alta concentración de aluminio. El desarrollo de la propuesta de una nueva planta de tratamiento puede ser la base para la elaboración del proyecto ejecutivo de la misma.*

**10 ANEXO I - HISTORIAL DE DETERMINACIONES FISICO-QUIMICAS - VALCHETA**

**11 ANEXO II - PROTOCOLOS DE ENSAYOS DE JARRA (JAR TEST)**

**12 ANEXO III - ESQUEMA FUNCIONAL PLANTA POTABILIZADORA VALCHETA**

## BIBLIOGRAFÍA:

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry -Division of Toxicology and Human Health Sciences (2003); Toxicological Profile for Fluorides, Hydrogen Fluoride, and Fluorine.
- Alfredo K. A.(2012); "Drinking Water Treatment by Alum Coagulation: Competition Among Fluoride, Natural Organic Matter, and Aluminum" (2012)-University of Texas at Austin.
- Azevedo, J. M. y Guillermo Acosta A. (1976) Manual de Hidráulica. 6ª ed. México(Harla).
- Bordoni N, Squassi A. (1992); Odontología preventiva, submódulo 1. México, DF: Edit. Organización Panamericana de la Salud.
- Boruff, C. S. (1934), "Removal of Fluorides from Drinking Waters," Ind. Eng. Chem., 26, 69-71,.
- CÓDIGO ALIMENTARIO ARGENTINO (2010), Ley 18284, Dec Reg. N° 2126/71, Artículos: 982 al 1079 - Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas. - Actualizado al 10/2012.
- COFES(1996); "Norma de Calidad para el Agua de Bebida de Suministro Publico", Concejo Federal de Entidades de Servicios Sanitarios.
- DEGRÉMONT, G(1973); Manual Técnico del Agua, Degrémont, 1973.
- ENOHSa(2001); Guías para la Presentación de Proyectos de Agua Potable fecha
- Howe, K. J., Hand D. W., Crittenden, Rhodes Trussell, Y Tchobanoglous, G. (2012); Principles of Water Treatment, Ed. Wiley.
- Hu, C.Y., Lo, S.L., &Kuan, W.H. (2005). Effects of the molar ratio of hydroxide andfluoride to Al (III) on fluoride removal by coagulation and electrocoagulation.Journal of Colloid and Interface Science, 283, 472-476.
- Ingallinella, A. M.; Fernández, R. G.; Stecca, L. M. (2003). Proceso ArCIS-UNR para la remoción de As y flúor en aguas subterráneas: una experiencia de aplicación. Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Edición N° 66 y 67, AIDIS Argentina.
- Murray J. (1986); El uso correcto de fluoruros en salud pública. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- OMS (2008); Guías para la calidad del agua potable, tercera edición, Organización Mundial de la Salud.
- Ryczel, ME (2006). Flúor y agua de consumo— su relación con la salud — controversias sobre la necesidad de fluorar el agua de consume. Boletín de la Asociación de Toxicología de Argentina. 20(72): 21-26.
- The British Fluoridation Society(2004); The UK Public Health Association; The British Dental Association; The Faculty of Public Health "The extent of water fluoridation" in One in a Million: The facts about water fluoridation.
- WHO (1996) Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol. 2. Health criteria and other supporting information. Geneva, World Health Organization.

Horacio Lizasoain - TP Final - Anexo I

Localidad: VALCHETA

Historial Parametros Físico Químicos de agua cruda

Mes/Año	02/2009	05/2009	08/2009	10/2009	12/2009	02/2010	06/2010	08/2010	10/2010	12/2010	02/2011	03/2011
Nº protocolo	79/09	205/09	400/09	508/09	622/09	86/10	319/10	420/10	525/10	645/10	95/11	199/11
Turbiedad	1,77	0,76	0,95	1,16	4,13	2,53	2,96	4,43	2,77	1,81	1,23	1,58
Ph	8,5	8,1	7,6	8,1	7,8	7,9	7,7	6,9	8,1	8,4	8,5	8,5
Conductiv.	665	688	543	736	669	629	552	614	723	740	736	733
Dureza	200	206	165	206	216	188	175	171	208	188	190	186
Alcalinidad	249	279	196	249	269	254	214	228	299	327	252	262
Cloruros	42	48	36	46	48	43	43	37	48	53	449	47
Sulfatos	34	132	24	35	29	18	42	46	68	40	29	19
Nitratos	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
Nitritos	0,02	inf	0,01	inf	0,02	0,01	inf	0,02	0,1	0,01	inf	0,01
Calcio	37	43	34	42	23	39	34	26	38	25	34	33
Magnesio	26	24	19	24	38	22	22	26	28	31	25	25
Sodio	83	88	62	85	87	75	61	66	84	83	-	76,3
Potasio	4	2	4	5	4	3	3	3	4	4	-	2,9
Hierro	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
Manganeso	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf
Fluor (mg/l)	1,48	1,73	1,27	1,6	1,59	1,89	1,11	1,01	1,56	1,59	1,6	1,42
Arsenico (mg/l)	0,03		0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,04	0,03	0,01	0,01

Mes/Año	06/2011	06/2011	10/2011	12/2011	02/2012	05/2012	08/2012	10/2012	12/2012	02/2013	03/2013	08/2013
Nº protocolo	308/11	424/11	541/11	639/11	79/12	181/12	420/12	523/12	682/12	91/13	212/13	445/13
Turbiedad	2,77	2,12	1,63	1,38	16,2	1,93	2,97	3,02	3,83	2,12	2,28	2,48
Ph	8	8,3	8,54	8,56	8,57	8,31	8,47	8,6	8,7	8,32	8,43	7,75
Conductiv.	627	699	829	780	752	824	840	903	710	631	764,0	835,0
Dureza	176	186	222	198	212	186	230	230	194	181	217	188
Alcalinidad	207	247	291	283	274	198	241	252	239	207	243	225
Cloruros	34	39	46	46	42	65	63	71	44	37	47	43
Sulfatos	78	32	107	141	91	115	124	115	87	75,6	97	97
Nitratos	inf	inf	inf	inf	inf	inf	0,22	Inf	Inf	Inf. 1	Inf. 1,0	2,0
Nitritos	0,08	inf	inf	inf	0,04	inf	inf	Inf	Inf	Inf. 0,04	Inf. 0,04	Inf. 0,04
Calcio	34	41	38	38	38	44	36	44	38	34	39	33
Magnesio	22	20	25	25	28	19	34	29	24	23	29	25
Sodio	61,8	77,29	93	92						57,9		83,7
Potasio	2,54	3,21	4,5	3,9						1,7		4,1
Hierro	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	Inf	Inf	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05
Manganeso	inf	inf	inf	inf	inf	inf	inf	Inf	Inf	Inf. 0,21	Inf. 0,21	Inf. 0,21
Fluor (mg/l)	1,15	1,4	2,04	1,82	1,84	1,56	1,68	1,84	1,75	1,41	2,28	1,52
Arsenico (mg/l)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,025		0,005	0,025	0,010

Mes/Año	08/2013	10/2013	12/2013	02/2014	03/2014	06/2014	08/2014	10/2014	12/2014	02/2015	06/2015	08/2015
Nº protocolo	445/13	556/13	668/13	108/14	203/14	300/14	387/14	483/14	564/14	72/15	257/15	354/15
Turbiedad	2,48	3,76	2,11	2,88	6,02	4,28	3,84	2,97	3,00	2,31	2,63	4,75
Ph	7,75	7,70	8,14	7,54	8,45	8,18	8,44	8,75	8,83	8,58	8,13	8,12
Conductiv.	835,0	765,0	724,0	676,0	1215	873,0	862,0	787,0	721,0	751,0	741,0	756,0
Dureza	188	184	192	171	335	214	220	196	208	208		192
Alcalinidad	225	233	223	225	259	223	218	216		232		212
Cloruros	43	46	45	36	100	62	65	60		46		61
Sulfatos	97	91	82	73	197	102	116	100		105		106
Nitratos	2,0	Inf. 1,0	Inf. 1,0	Inf. 1,0	1,9	1,7	1,8	< 1,0		< 1,0	1,7	1,0
Nitritos	Inf. 0,04	Inf. 0,04	Inf. 0,04	Inf. 0,04	0,04	Inf. 0,04	< 0,04	< 0,04		< 0,04	< 0,04	< 0,04
Calcio	33	41	39	28	64	40	45	42		44		38
Magnesio	25	20	23	25	42	27	26	22		24		23
Sodio	83,7	77,7	80,5	67,6	106,2	111,0	104,3	76,5		81,0		91,8
Potasio	4,1	3,7	16,1	3,6	5,1	3,6	4,4	4,1		1,0		4,1
Hierro	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	Inf. 0,05	< 0,04	< 0,04		< 0,05		< 0,05
Manganeso												
Fluor (mg/l)	1,52	1,70	2,04			1,50	1,57	1,67	1,50	1,68	1,64	1,68
Arsenico (mg/l)	0,010	0,010					0,01	0,01			0,005	0,01

Mes/Año	10/2015	12/2015	02/2016	06/2016	08/2016	10/2016	02/2017	04/2017	08/2017	10/2017	01/12/17	
Nº protocolo	470/15	537/15	102/16	296/16	378/16	481/16	87/17	186/17	362/17	459/17	520/17	
Turbiedad	3,65	1,71	15,10	6,60	3,78	2,92	1,93	1,96	2,55	1,80	1,21	
Ph	8,25	8,32	8,40	8,00	8,24	8,30	8,22	8,05	7,78	8,02	8,22	
Conductiv.	805,0	745,0	711,0	778,0	754,0	766,0	708,0	888,0	751,0	842,0	782,0	
Dureza	210		186		202	232	220	243	189	205		
Alcalinidad	241		215		216	231	223	228	208	234		
Cloruros	57		46		56	66	43	78	52	59		
Sulfatos	110		84		90			108,0	98,0	120,0		
Nitratos	1,3	< 1,0	< 1,0	1,7	< 1,0	1,4	< 1,0	1,7	< 1,0	5,5	< 1,0	
Nitritos	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	
Calcio	43		37		37	48	40	48	36	40		
Magnesio	25		23		26	27	29	30	24	26		
Sodio	95,0		85,0		89,0			114,00	90,40	96,00		
Potasio	4,0		3,9		4,6			4,80	4,00	459/17		
Hierro	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	
Manganeso												
Fluor (mg/l)	1,83	1,79	1,61	1,64	1,60	1,81	1,78	1,67	1,50	1,80	1,82	
Arsenico (mg/l)	0,01	0,01	0,01		0,010	0,010		0,010	0,005	0,005		

## ANEXO II – PROTOCOLOS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Pag.	Descripción	Prueba
1	Ensayo jarras con sulfato de aluminio 01/03/2016	1 <sup>er</sup> experiencia
2	Incidencia de la presencia de aluminio en la determinación de fluoruros (Hach SPADNS).	
3	Ensayo jarras con sulfato de aluminio 30/01/2017	Incidencia del coagulante.
4	Ensayo jarras con policloruro de Al 01/02/2017	Incidencia del coagulante.
5	Filtración directa con sulfato de aluminio 03/02/2017	Incidencia del coagulante.
6	Filtración directa con policloruro de Al 03/02/2017	Incidencia del coagulante.
7	Ensayo jarras con sulfato de aluminio 17/02/2017	Incidencia de pH
8	Ensayo jarras con sulfato de aluminio 24/02/2017	Incidencia de pH
9	Ensayo jarras con sulfato de aluminio 17 y 24/02/2017	Grafico
10	Ensayo jarras con sulfato de aluminio 05/05/2017	Incidencia de Turbidez
11	Ensayo jarras con sulfato de aluminio 11/07/2017	in situ
12	Titulación del agua de Valcheta	Comportamiento de buffers.

## JAR TEST

01/03/2016

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	29/02/2016	$\mu =$	0,001	N.s/m <sup>2</sup>
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	$\rho =$	1000	KgM/m <sup>3</sup>
Turbiedad inicial:	4,86/4,99	$\gamma =$	10000	N/m <sup>3</sup>
Fluoruro inicial	1,47 mg/l			
pH inicial:	8,51	V =	1 L	0,001 m <sup>3</sup>
Coagulante:	Sulfato de aluminio [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] = 10 g/L			

### Mezcla rápida:

Velocidad rotacion de las paletas:	120 rpm			
Tiempo:	5'	Gradiente: G rap =	99,29	1/s

### Mezcla lenta:

Velocidad rotacion de las paletas:	50 rpm			
Tiempo:	20'	Gradiente: G len =	33,24	1/s

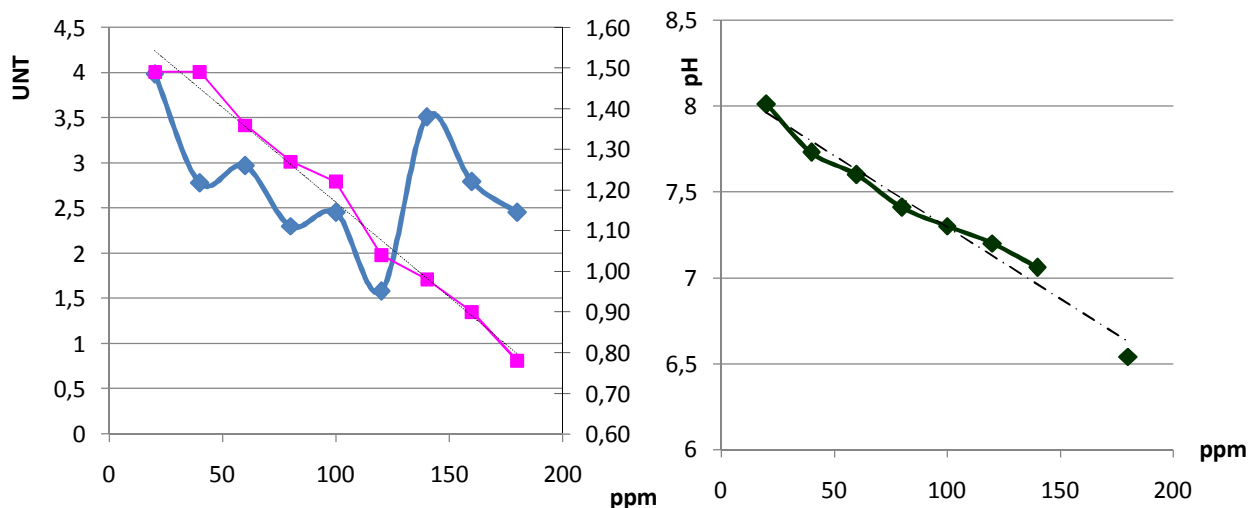
Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- D-Adapt. HACH (Espectrofotómetro)

Sedimentación:

**Tiempo:** 20'

Jarra	mg/l	pH final	Turbiedad sobrenadante	Observaciones Fluoruros [F-]*	Remocion
1	20	8,01	3,98	1,49	-1%
2	40	7,73	2,78	1,49	-1%
3	60	7,6	2,97	1,36	7%
4	80	7,41	2,3	1,27	14%
5	100	7,3	2,45	1,22	17%
6	120	7,2	1,58	1,04	29%
7	140	7,06	3,51	0,98	33%
8	160		2,79	0,90	39%
9	180	6,54	2,45	0,78	47%



Experiencia s/ incidencia del Aluminio sobre Fluoruros en metodo Hatch Colorimetrico

**Datos de la Muestra:**

Fecha de extracción 15/04/2016

Sitio de extracción: Agua Cruda Valcheta

Coagulante: Sulfato de aluminio  $[Al_2(SO_4)_3] = 10 \text{ g/L}$  120 ppm

Turbiedad inicial: 0,88 pH inicial: 8,81

Turb final: 1,29 pH final: 6,94

Fluoruro inicial 1,62 mg/l

Fluoruro final (1')	15'	120' - 2hs
1,08	1,06	0,99
33%	35%	39%

**Mezcla rápida:**

Velocidad rotacion de las paletas: 120 rpm

Tiempo: 5' Gradiente: G rap = 99,29 1/s

**Mezcla lenta:**

Velocidad rotacion de las paletas: 50 rpm 5,24 1/s

Tiempo: 20' Gradiente: G len = 33,24 1/s

Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- D-Adapt. HACH (Espectrofotómetro)

Sedimentación: **Tiempo:** 20'

Conclusión: **No se experimento enmascaramiento de los Fluoruros por Aluminio.**

## JAR TEST

30/01/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	14/01/2017	$\mu =$	0,001	N.s/m <sup>2</sup>
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	$\rho =$	1000	KgM/m <sup>3</sup>
Turbiedad inicial:	4,86	$\gamma =$	10000	N/m <sup>3</sup>
Fluoruro inicial	1,77 mg/l			
pH inicial:	8,51	V =	1 L	0,001 m <sup>3</sup>
Coagulante:	Sulfato de aluminio [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] = 10 g/L			

### Mezcla rápida:

Velocidad rotacion de las paletas: 120 rpm  
 Tiempo: 5'      Gradiente: G rap = 99,29 1/s

### Mezcla lenta:

Velocidad rotacion de las paletas: 50 rpm      5,24 1/s  
 Tiempo: 20'      Gradiente: G len = 33,24 1/s

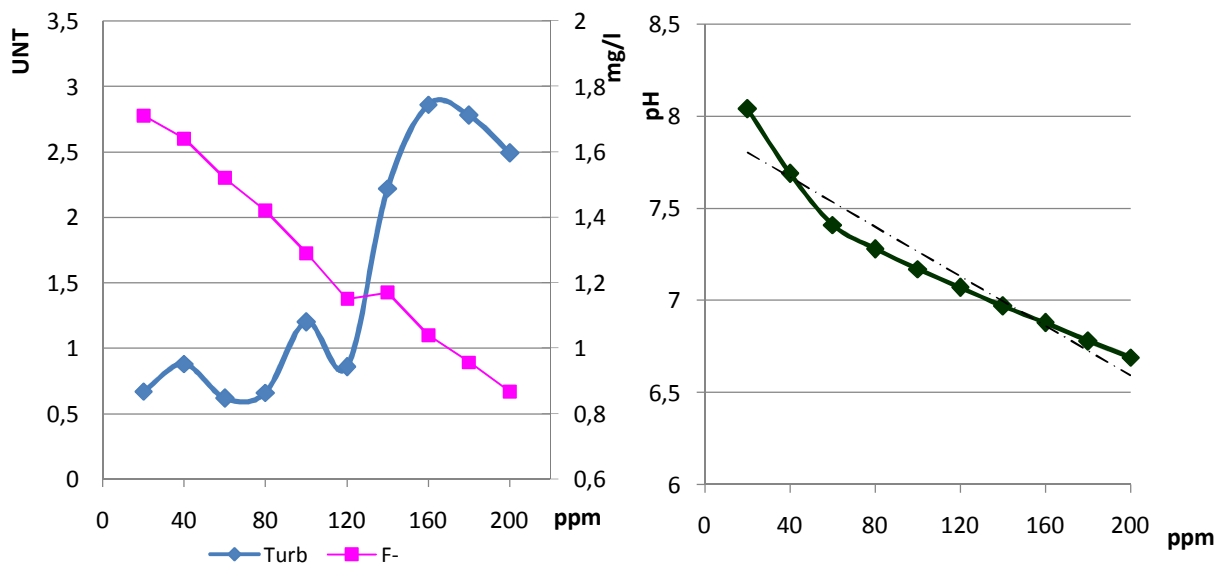
Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- C-Adapt. HACH (Ion Selective Electrode)

Sedimentación:

Tiempo: 20'

Jarra	mg/l	Turbiedad	pH	Fluoruro mg/l
0	0	4,93	8,51	1,77
1	20	0,67	8,04	1,71
2	40	0,88	7,69	1,64
3	60	0,62	7,41	1,52
4	80	0,66	7,28	1,42
5	100	1,2	7,17	1,29
6	120	0,86	7,07	1,15
7	140	2,22	6,97	1,17
8	160	2,86	6,88	1,04
9	180	2,78	6,78	0,958
10	200	2,49	6,69	0,868



## JAR TEST

01/02/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	14/01/2017	$\mu =$	0,001	N.s/m <sup>2</sup>
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	$\rho =$	1000	KgM/m <sup>3</sup>
Turbiedad inicial:	5,26	$\gamma =$	10000	N/m <sup>3</sup>
Fluoruro inicial:	1,83 mg/l			
pH inicial:	8,75	V =	1 L	0,001 m <sup>3</sup>
Coagulante:	Policloruro de aluminio [PAC] = 10 g/L			

### Mezcla rápida:

Velocidad rotacion de las paletas: 120 rpm  
 Tiempo: 5'      Gradiente: G rap = 99,29 1/s

### Mezcla lenta:

Velocidad rotacion de las paletas: 50 rpm      5,24 1/s  
 Tiempo: 20'      Gradiente: G len = 33,24 1/s

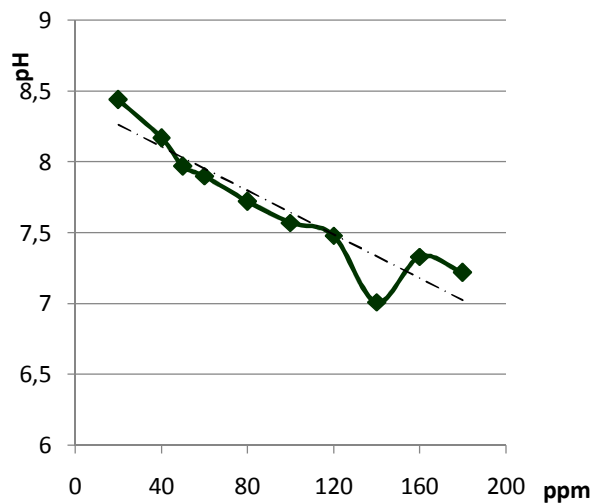
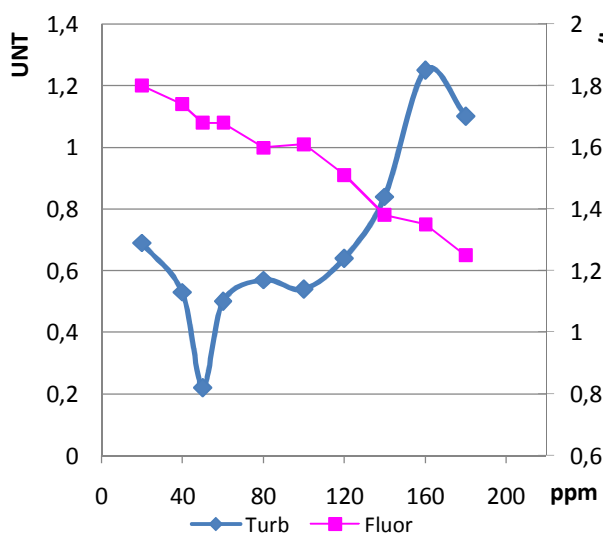
Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- C-Adapt. HACH (Ion Selective Electrode)

Sedimentación:

**Tiempo:** 20'

Jarra	mg/l	Turbiedad	pH	Fluoruro mg/l
0	0	4,24	8,75	1,83
1	20	0,69	8,44	1,8
2	40	0,53	8,17	1,74
3	50	0,22	7,97	1,68
4	60	0,5	7,9	1,68
5	80	0,57	7,72	1,6
6	100	0,54	7,57	1,61
7	120	0,64	7,48	1,51
8	140	0,84	7,01	1,38
9	160	1,25	7,33	1,35
10	180	1,1	7,22	1,25



## JAR TEST

03/02/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción: 14/01/2017  $\mu = 0,001$  N.s/m<sup>2</sup>  
 Sitio de extracción: Agua Cruda Valcheta  $\rho = 1000$  KgM/m<sup>3</sup>  
 Turbiedad inicial: 6,75  $\gamma = 10000$  N/m<sup>3</sup>  
 Fluoruro inicial: 1,72 mg/l  
 pH inicial: 8,76  $V = 1$  L 0,001 m<sup>3</sup>  
 Coagulante: Sulfato de aluminio [Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] = 10 g/L

### Mezcla rápida:

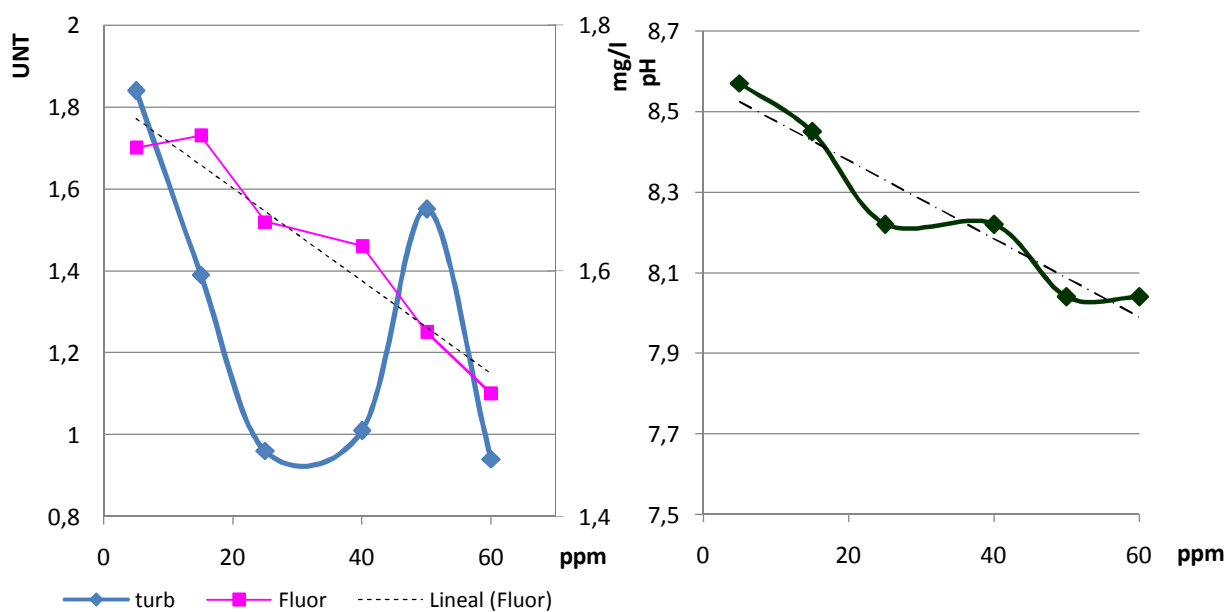
Velocidad rotacion de las paletas: 120 rpm  
 Tiempo: 30" Gradiente: G rap = 99,29 1/s

Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- C-Adapt. HACH (Ion Selective Electrode)

Filtración con Filtro Whatman

Jarra	Dosis de coagulante	mg/l	Turbiedad	pH	Fluoruro Sulfato de Al mg/l
0	0	0	6,57	8,76	1,72
1	0,5	5	1,84	8,57	1,7
2	1,5	15	1,39	8,45	1,71
3	2,5	25	0,96	8,22	1,64
4	4	40	1,01	8,22	1,62
5	5	50	1,55	8,04	1,55
6	6	60	0,94	8,04	1,5



## JAR TEST

03/02/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	14/01/2017	$\mu =$	0,001	N.s/m <sup>2</sup>
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	$\rho =$	1000	KgM/m <sup>3</sup>
Turbiedad inicial:	6,75	$\gamma =$	10000	N/m <sup>3</sup>
Fluoruro inicial	1,72 mg/l			
pH inicial:	8,76	V =	1 L	0,001 m <sup>3</sup>
Coagulante:	Policloruro de aluminio [PAC] = 10 g/L			

### Mezcla rápida:

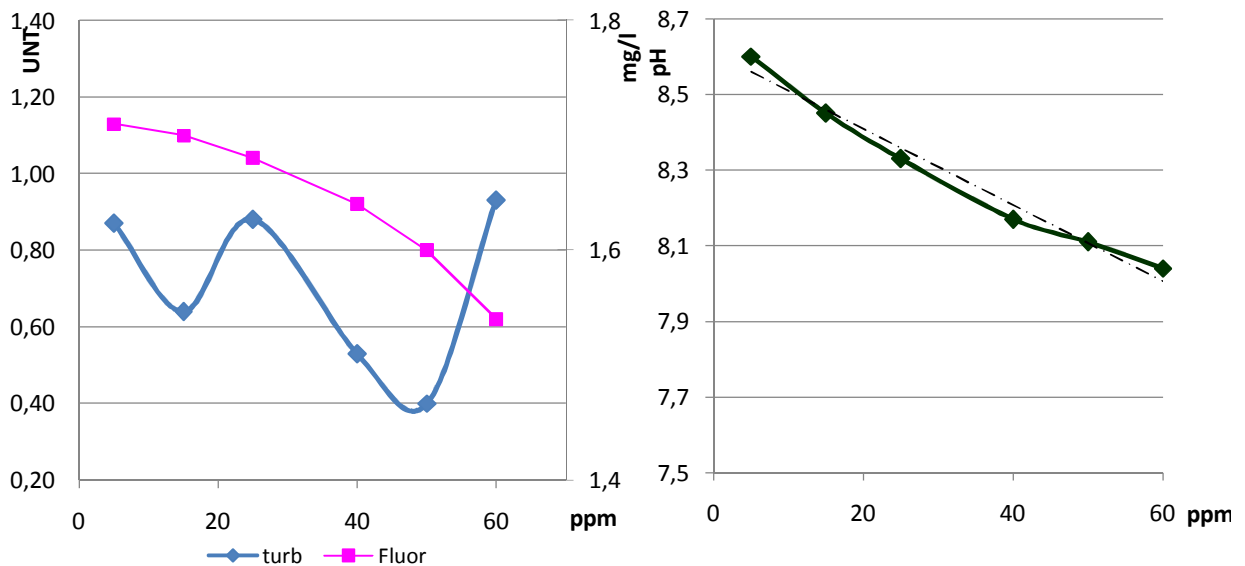
Velocidad rotacion de las paletas:	120 rpm
Tiempo:	30"
Gradiente: G rap =	99,29 1/s

Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- D-Adapt. HACH (Espectrofotómetro)

Filtración con Filtro Whatman

Jarra	Dosis de coagulante	mg/l	Turbiedad	pH	Fluoruro PAC mg/l
0	0	0	6,57	8,76	1,72
1	0,5	5	0,87	8,6	1,71
2	1,5	15	0,64	8,45	1,7
3	2,5	25	0,88	8,33	1,68
4	4	40	0,53	8,17	1,64
5	5	50	0,40	8,11	1,6
6	6	60	0,93	8,04	1,54



## JAR TEST

17/02/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	06/02/2017	μ =	0,001	N.s/m2
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	ρ =	1000	KgM/m3
Turbiedad inicial:	5,09	γ =	10000	N/m3
Fluoruro inicial	1,77 mg/l			
pH inicial:	8,6	V =	1 L	0,001 m3
Coagulante:	Sulfato de aluminio [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] = 10 g/L			
Correccion de pH:	Ácido clorhídrico 0,1N			

### Mezcla rápida:

Velocidad rotacion de las paletas: 120 rpm  
 Tiempo: 5'      Gradiente: G rap = 99,29 1/s

### Mezcla lenta:

Velocidad rotacion de las paletas: 50 rpm      5,24 1/s  
 Tiempo: 20'      Gradiente: G len = 33,24 1/s

Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- C-Adapt. HACH (Ion Selective Electrode)

Sedimentación:

**Tiempo:** 20'

Jarra	pH esperado	Dosis de Coagulante [mL] Dosis Acido [mL]	Concentración mg/l	pH medido	Turbiedad [NTU]	Fluoruro mg/l
0			0	8,6	5,09	1,77
I	7	4mL	40	7,01	1,37	1,52
		8mL				
II	7	6mL	60	7	1,62	1,39
		6,4mL				
III	7	8 mL	80	7,05	1,81	1,36
		3,6 mL				
IV	7	10 mL	100	7,08	1,96	1,27
		1,6 mL				
V	7	12 mL	120	7,14	2,27	1,26
		0 mL				
VI	6,5	4 mL	40	6,5	1,48	1,39
		18,3 mL				
VII	6,5	6mL	60	6,56	1,54	1,28
		14,8 mL				
VIII	6,5	8mL	80	6,58	1,59	1,14
		13,2 mL				
IX	6,5	10mL	100	6,61	1,84	1,04
		11 mL				
X	6,5	12mL	120	6,63	2	0,969
		9 mL				

## JAR TEST

24/02/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	06/02/2017	μ =	0,001	N.s/m <sup>2</sup>
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	ρ =	1000	KgM/m <sup>3</sup>
Turbiedad inicial:	3,68	γ =	10000	N/m <sup>3</sup>
Fluoruro inicial	1,83 mg/l			
pH inicial:	8,74	V =	1 L	0,001 m <sup>3</sup>
Coagulante:	Sulfato de aluminio [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] = 10 g/L			
Correccion de pH:	Ácido clorhídrico 0,1N			

### Mezcla rápida:

Velocidad rotacion de las paletas: 120 rpm  
 Tiempo: 5'      Gradiente: G rap = 99,29 1/s

### Mezcla lenta:

Velocidad rotacion de las paletas: 50 rpm      5,24 1/s  
 Tiempo: 20'      Gradiente: G len = 33,24 1/s

Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

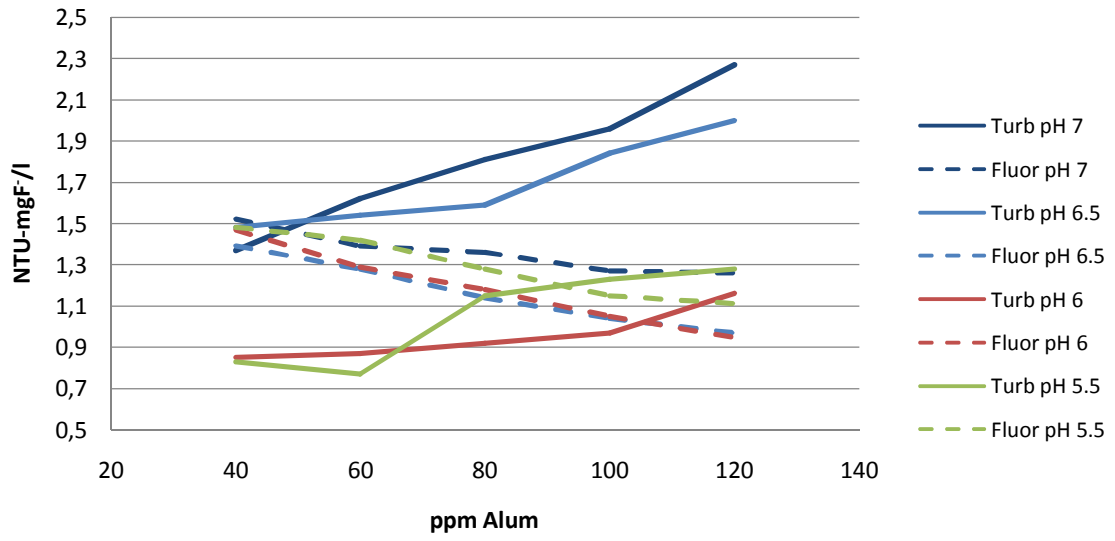
\* Standard Methods 4500 F- C-Adapt. HACH (Ion Selective Electrode)

Sedimentación:

**Tiempo:** 20'

Jarra	pH esperado	Dosis de Coagulante [mL] Dosis Acido [mL]	Concentración mg/l	pH medido	Turbiedad [NTU]	Fluoruro mg/l
0			0	8,74	3,68	1,83
I	6	4mL	40	6,24	0,85	1,47
		26,4 mL				
II	6	6mL	60	6,21	0,87	1,29
		24,8 mL				
III	6	8 mL	80	6,22	0,92	1,18
		23 mL				
IV	6	10 mL	100	6,25	0,97	1,05
		20,6 mL				
V	6	12 mL	120	6,24	1,16	0,946
		19,6 mL				
VI	5,5	4 mL	40	5,94	0,83	1,48
		30,6 mL				
VII	5,5	6mL	60	5,91	0,77	1,42
		30 mL				
VIII	5,5	8mL	80	5,93	1,15	1,28
		28,2 mL				
IX	5,5	10mL	100	5,96	1,23	1,15
		25,8 mL				
X	5,5	12mL	120	5,92	1,28	1,11
		25,4 mL				

Remocion de Turbiedad y Fluoruro - Incidencia del pH



## JAR TEST

05/05/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	29/03/2017	μ =	0,001	N.s/m <sup>2</sup>
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	ρ =	1000	KgM/m <sup>3</sup>
Turbiedad inicial:	141	γ =	10000	N/m <sup>3</sup>
Fluoruro inicial	1,2 mg/l			
pH inicial:	7,82	V =	1 L	0,001 m <sup>3</sup>
Coagulante:	Sulfato de aluminio [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] = 10 g/L			

### Mezcla rápida:

Velocidad rotacion de las paletas:	120 rpm	
Tiempo:	5'	Gradiente: G rap = 99,29 1/s

### Mezcla lenta:

Velocidad rotacion de las paletas:	50 rpm	5,24 1/s
Tiempo:	20'	Gradiente: G len = 33,24 1/s

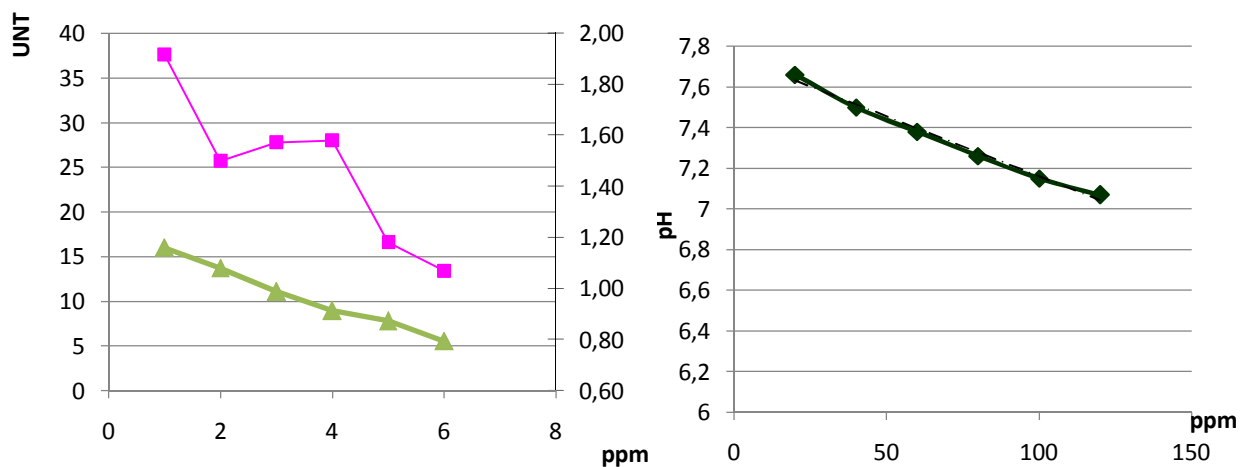
Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- C-Adapt. HACH (Ion Selective Electrode)

Sedimentación:

**Tiempo:** 20'

Jarra	mg/l	pH final	Turbiedad sobrenadante	Fluoruros [F-]*	Remocion
1	20	7,66	37,6	1,16	3%
2	40	7,5	25,7	1,08	10%
3	60	7,38	27,8	0,99	18%
4	80	7,26	28	0,91	24%
5	100	7,15	16,6	0,87	27%
6	120	7,07	13,4	0,79	34%



## JAR TEST

11/07/2017

### Datos de la Muestra:

Fecha de extracción:	11/07/2017	$\mu =$	0,001	N.s/m <sup>2</sup>
Sitio de extracción:	Agua Cruda Valcheta	$\rho =$	1000	KgM/m <sup>3</sup>
Turbiedad inicial:	10,2	$\gamma =$	10000	N/m <sup>3</sup>
Fluoruro inicial:	1,62 mg/l			
pH inicial:	8,59	V =	1 L	
Coagulante:	Sulfato de aluminio [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] = 10 g/L			

### Mezcla rápida:

Velocidad rotacion de las paletas:	120 rpm		
Tiempo:	5'	Gradiente: G rap =	99,29 1/s

### Mezcla lenta:

Velocidad rotacion de las paletas:	50 rpm		5,24 1/s
Tiempo:	20'	Gradiente: G len =	33,24 1/s

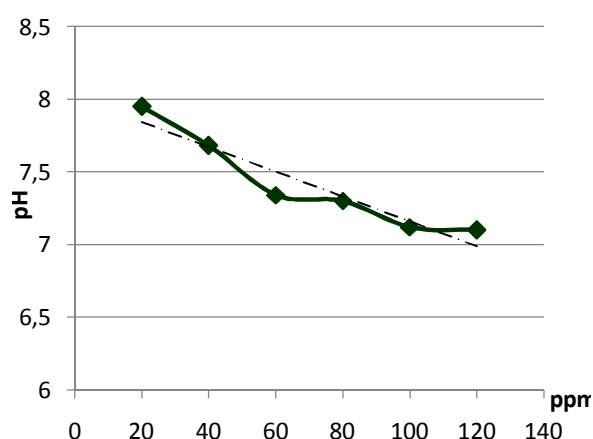
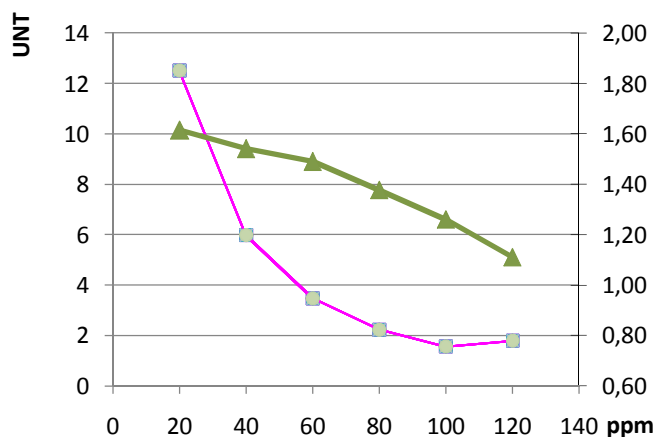
Nota: para el calculo del gradiente el volumen de la jarra es 1 L

\* Standard Methods 4500 F- C-Adapt. HACH (Ion Selective Electrode)

Sedimentación:

**Tiempo:** 20'

Jarra	mg/l	pH final	Turbiedad sobrenadante	Fluoruros mg/l	Remocion
1	20	7,95	12,5	1,62	0%
2	40	7,68	5,98	1,54	5%
3	60	7,34	3,47	1,49	8%
4	80	7,3	2,23	1,38	15%
5	100	7,12	1,56	1,26	22%
6	120	7,1	1,79	1,11	31%



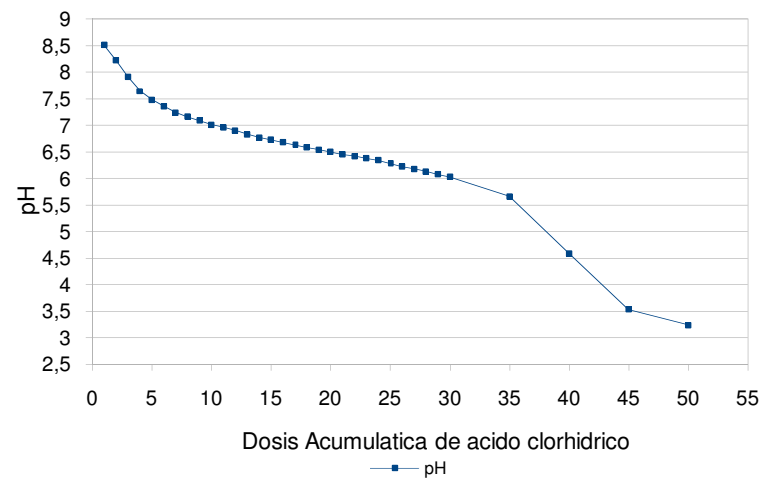
TITULACION DE AGUA DE VALCHETA CON ACIDO CLORHIDRICO

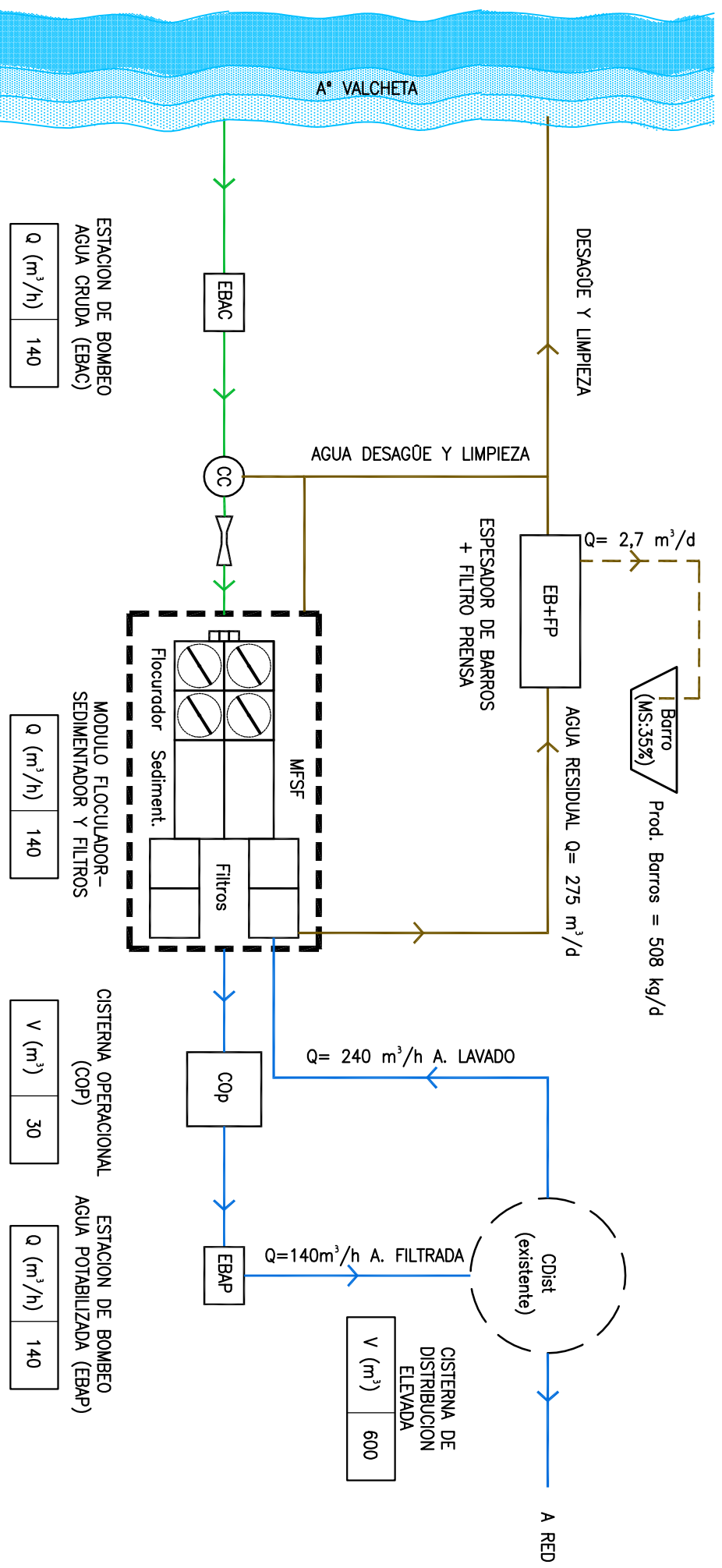
Fecha de extracción de agt 06/02/17  
 Fecha de realización de la 13/02/17  
 Ácido clorhídrico 0,1N

Temperatura: 24,5 °C

<i>Dosis ácido (ml)</i>	<i>Dosis acumulada (ml)</i>	<i>pH</i>	<i>Dosis ácido (ml)</i>	<i>Dosis acumulada (ml)</i>	<i>pH</i>
1	1	8,51	1	18	6,58
1	2	8,22	1	19	6,54
1	3	7,91	1	20	6,5
1	4	7,65	1	21	6,45
1	5	7,48	1	22	6,42
1	6	7,36	1	23	6,38
1	7	7,24	1	24	6,34
1	8	7,16	1	25	6,28
1	9	7,09	1	26	6,22
1	10	7,01	1	27	6,18
1	11	6,96	1	28	6,13
1	12	6,9	1	29	6,08
1	13	6,83	1	30	6,03
1	14	6,77	5	35	5,66
1	15	6,73	5	40	4,59
1	16	6,68	5	45	3,54
1	17	6,63	5	50	3,24

Titulación de agua Valcheta con ácido clorhídrico

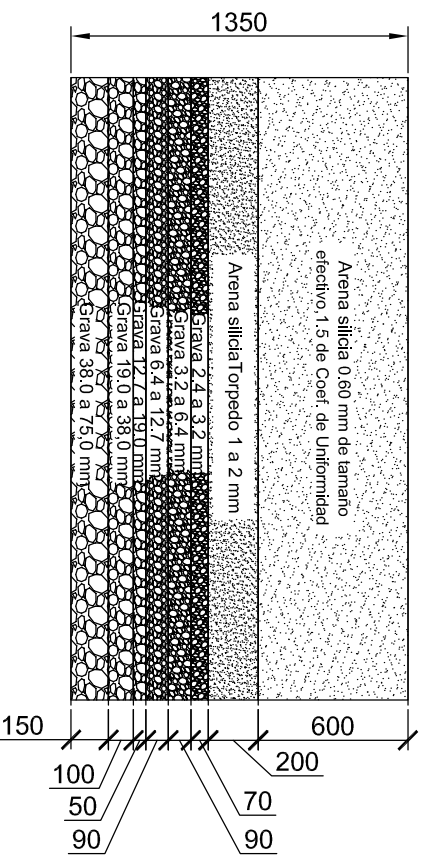




### RESUMEN DE PARAMETROS DE DISEÑO

EBAC	MFSF	Floculadores	Sedimentadores	Filtros	EB+FP
Captación:	Mezcla Rápida				Tratamiento de barros:
Ubicación:	Canal de Riego	Nro: 4; 2 x calle	Nro de calles: 2	Nro: 4	
Tipo:	Lateral	Volumen: 2,6x2,6x2,4 = 16,22 m³	Tipo: Alta carga	Tipo: Rápido descendente	1er etapa: Espesador
Electrobombas:	Centrifuga Horizontal	TRH: 24 min	Placas: Seditubos 60°	Medio: Arena Te:0,6m Cu<1,5	Tipo: Circular
Cantidad equipos:	2 + Reserva inst.	Paletas: Verticales	Rel. L/B: 2	Arena torpedo 1-2	2da etapa: Filtro Prensa
Pozo de bombeo:	Rectangular	Gradientes	Area L x B: 4,10 x 2,60	Manto gravas	Humidad salida:
QD10 =	110 m³/h	GI = 60 s-1	Carga Uso: 10,66 m²	Area: 2,3 x 2,3 = 5,29 m²	Disposición final: Relleno sanitario
Hb10 =	10 mca	GII = 30 s-1	Canal de dist. central	U filtrado: 160 ml/día	
QD20 =	140 m³/h	Vel. de orificios paso: < 0,10 m/s	Colector de barros: c/ equitrepartición.	U fil. máx: 210 ml/día	
Hb20 =	140 mca		Colectores Agua Clarificada:	T lavado: 0,75 ml/min	
	10 mca			U lavado: 15 mln/filtro	
				Control: Vel. Constante	

### DETALLE MANTO FILTRANTE SELECCIONADO



**AGUAS RIONEGRINAS SOCIEDAD ANONIMA**  
**PROVINCIA DE RIO NEGRO**  
**PROYECTO : PLANTA POTABILIZADORA 140 m3/h**  
**LOCALIDAD : VALCHETA**

Esquema Funcional

Ing. D. A. Peña		FECHA : FEBRERO 2018
Ing. H. A. Lizasoain		ESCALAS: F:E
Ing. H. A. Lizasoain		PLANO Nº 1
Ing. H. A. Lizasoain		TP Final - Anexo III