

Tema 11 – Tratamiento de Agua Potable

CI4102 Ingeniería Ambiental
Profesora Ana Lucia Prieto



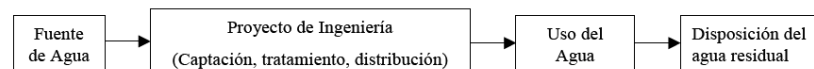
¿En qué consiste el problema de suministro de agua?

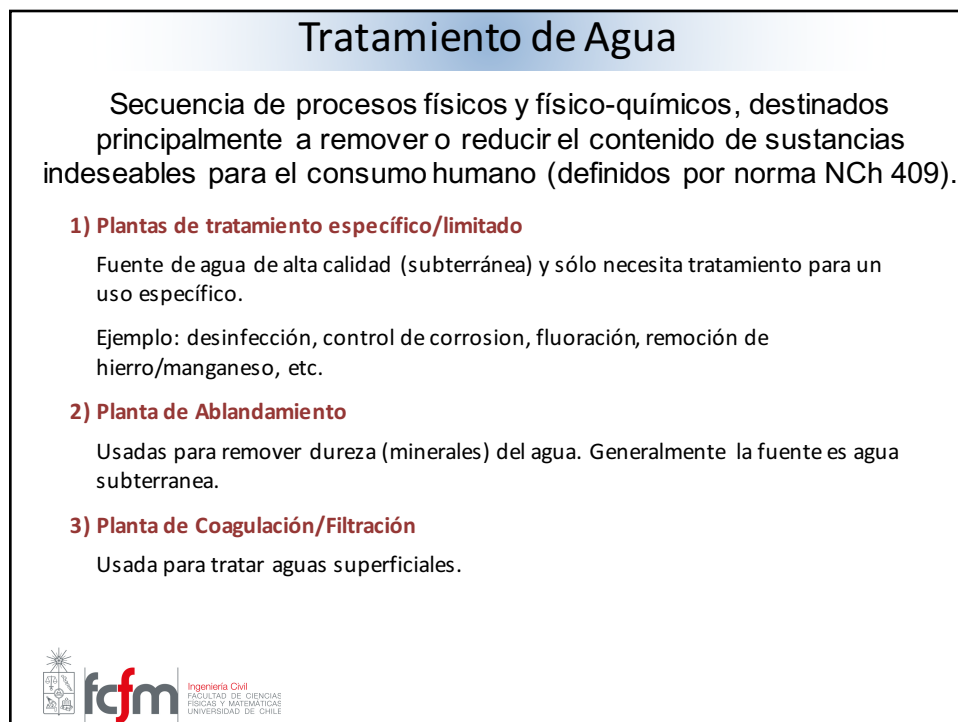
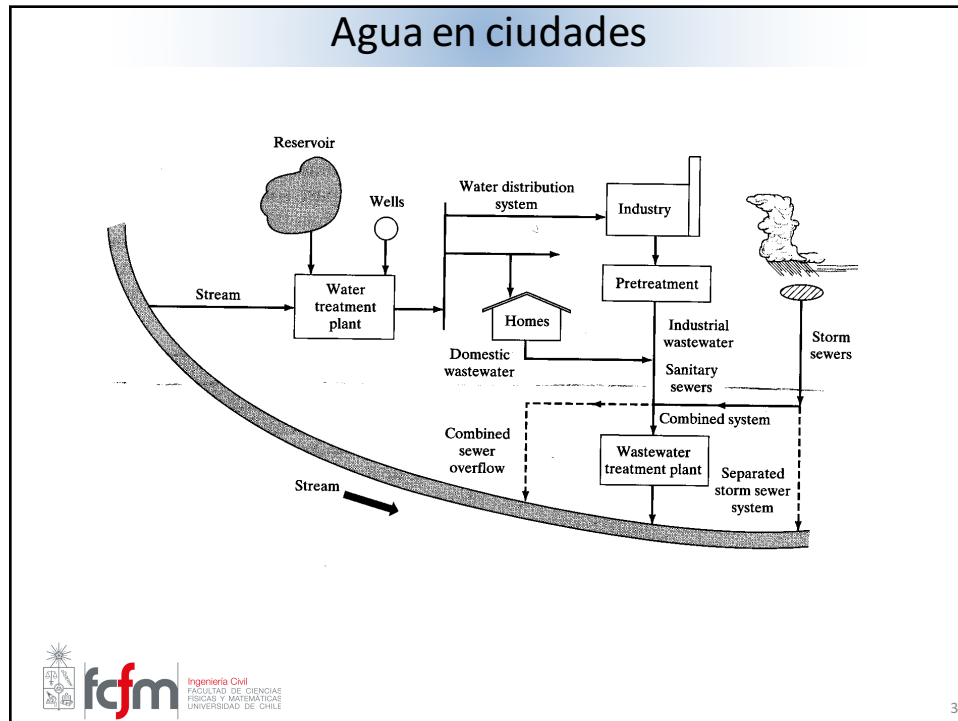
Proveer la **cantidad** y **calidad** de agua requerida para diferentes necesidades de la sociedad.

Tres aspectos fundamentales:

- Determinar **requerimientos** de **cantidad** y **calidad del agua** requerida para cada uso
- Identificar fuentes de abastecimiento tomando en cuenta disponibilidad y calidad
- Definir el proyecto de ingeniería para satisfacer un determinado uso

Esquema Conceptual de un Sistema de Suministro de Agua





¿Qué es agua dura?

Dureza en el agua – causada por cationes multivalentes (minerales)

Especies predominantes = Ca^{2+} , Mg^{2+}

Especies menos comunes = Fe^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Al^{3+}

Total Hardness (TH) o Dureza total $\approx \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$

Classification	Hardness	
	meq/L	mg/L as CaCO_3
Extremely soft to soft	0-0.9	0-45
Soft to moderately hard	0.9-1.8	46-90
Moderately hard to hard	1.8-2.6	91-130
Hard to very hard	2.6-3.4	131-170
Very hard to excessively hard	3.4-5	171-250
Too hard for ordinary domestic use	>5	>250

Source: L.A. Lipe and M. D. Curry, "Ion Exchange Water Softening," a discussion for water treatment plant operators, 1974-75 seminar series sponsored by Illinois Environmental Protection Agency.

Algunas consecuencias de la dureza en agua:

- Depositiones (escamas) en tuberías
- Reduce la efectividad de los detergentes
- Causa sabores indeseados



<http://www.diy-life.com/2010/07/23/the-daily-fix-remove-hard-water-stains/>



http://members.tripod.com/v_3dank/effects_of_hard_water.htm

5

Diferenciación entre tipos de dureza

Dureza de carbonatos o carbonate hardness (CH)

Asociada a aniones de carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-). También llamada dureza temporal.

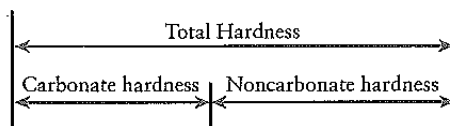
CH es igual al menor entre Alcalinidad o TH

Dureza de No-Carbonatos o non-carbonate hardness (NCH)

Asociada a cualquier otro anión. Dureza permanente.

NCH = TH - CH

Diagrama de barras para determinar distribución de dureza



Todas las especies deben ser calculadas en meq/L o mg/L CaCO_3

Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-

6

Alcalinidad

Alcalinidad o alkalinity (Alk) – medida de la capacidad del agua de resistir cambios en el pH.

En aguas naturales, la alcalinidad proviene más que todo de la atmósfera y de la disolución de suelos calcáreos.

Iones como: CO_3^{2-} , OH^- y HCO_3^- pueden neutralizar al H^+

Cuando se reporta en moles/L, se puede calcular como:

$$= \left(\frac{\text{molHCO}_3^-}{L} \right) \left(\frac{1\text{molAlk}}{1\text{molHCO}_3^-} \right) + \left(\frac{\text{molCO}_3^{2-}}{L} \right) \left(\frac{2\text{molAlk}}{1\text{molCO}_3^{2-}} \right) + \left(\frac{\text{molOH}^-}{L} \right) \left(\frac{1\text{molAlk}}{1\text{molOH}^-} \right) - \left(\frac{\text{molH}^+}{L} \right) \left(\frac{1\text{molAlk}}{1\text{molH}^+} \right)$$

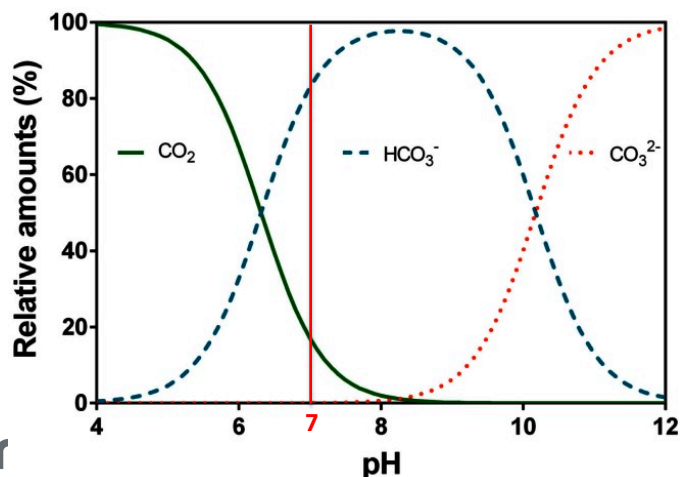
$$\text{Alcalinidad} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

A pH NEUTRO, Alk es aproximadamente = $[\text{HCO}_3^-]$

Carbonatos prevalentes a pH ≈ 7

$$\text{Alcalinidad} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

A pH NEUTRO, Alk es aproximadamente = $[\text{HCO}_3^-]$



Dureza y alcalinidad

Dureza y alcalinidad se reportan en a) meq/L o b) mg/L CaCO₃

a) meq/L: convertir masa (mg/L) a peso equivalente (meq/L)

$$C_q = \frac{C}{EW}$$

C_q = concentración en meq/L

EW = peso equivalente en g/eq o mg/meq

C = concentración en mg/L

$$EW = \frac{MW}{n}$$

n = valencia o carga iónica

b) mg/L CaCO₃: convertir peso equivalente a mg/L CaCO₃ usando el peso equivalente del CaCO₃ igual a 50

$$C_{CaCO_3} = C_q \times 50.0$$

C_q = concentración en meq/L

C_{CaCO₃} = concentración en mg/L como CaCO₃

Ejemplo 1 (extra credit): La concentración de calcio en una muestra de agua es 100 mg/L. Cuál es la concentración en meq/L y mg CaCO₃/L?

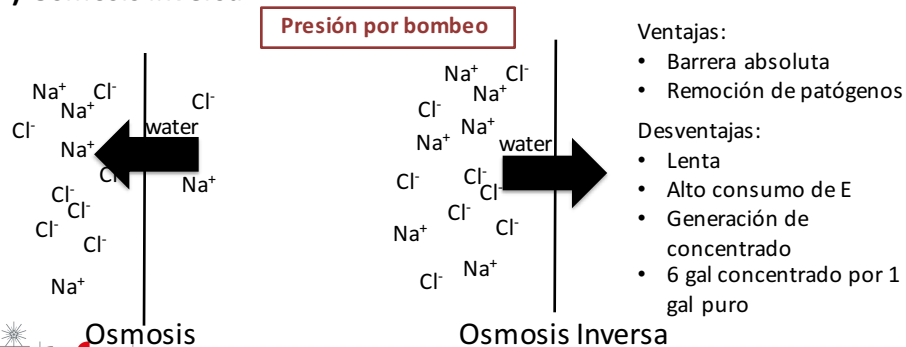
Ejemplo 2 (extra credit): El análisis de una muestra de agua con pH 7.5 arrojó los resultados de la tabla. Encuentre la TH, CH, NCH, Alk, todas expresadas en como CaCO_3 . Además encuentre los sólidos disueltos totales (SDT) de la muestra.

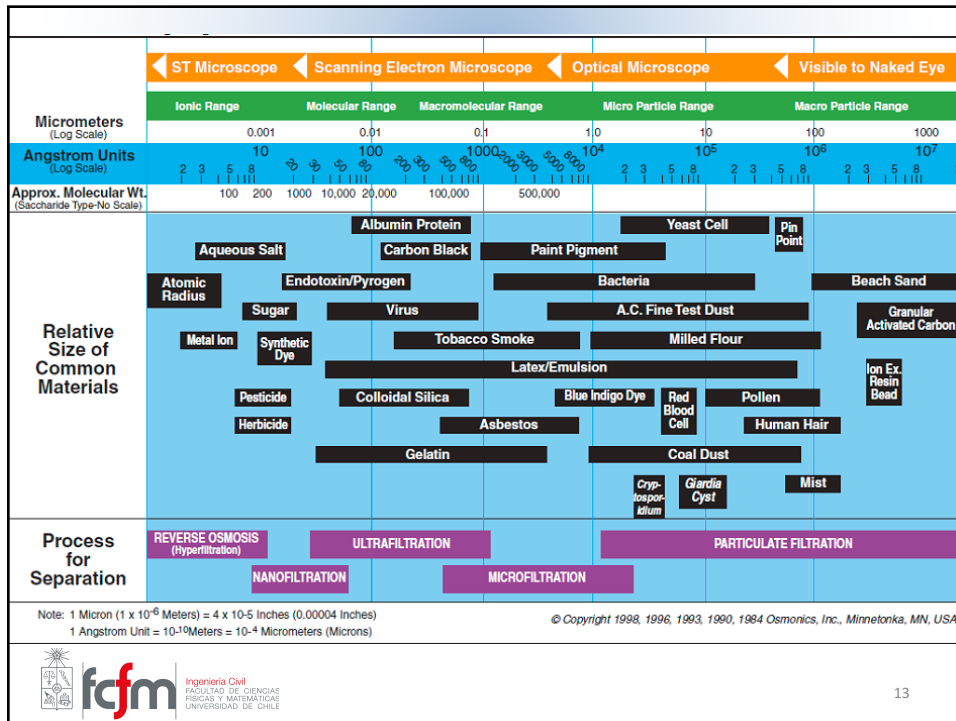
Cationes (mg/L)		Aniones (mg/L)	
Ca^{2+}	80	Cl^-	100
Mg^{2+}	30	SO_4^{2-}	201
Na^+	72	HCO_3^-	165
K^+	6		

Métodos de ablandamiento

- 1) Osmosis Inversa
- 2) Intercambio Iónico
- 3) Ablandamiento Cal/Soda Ash

1) Osmosis Inversa

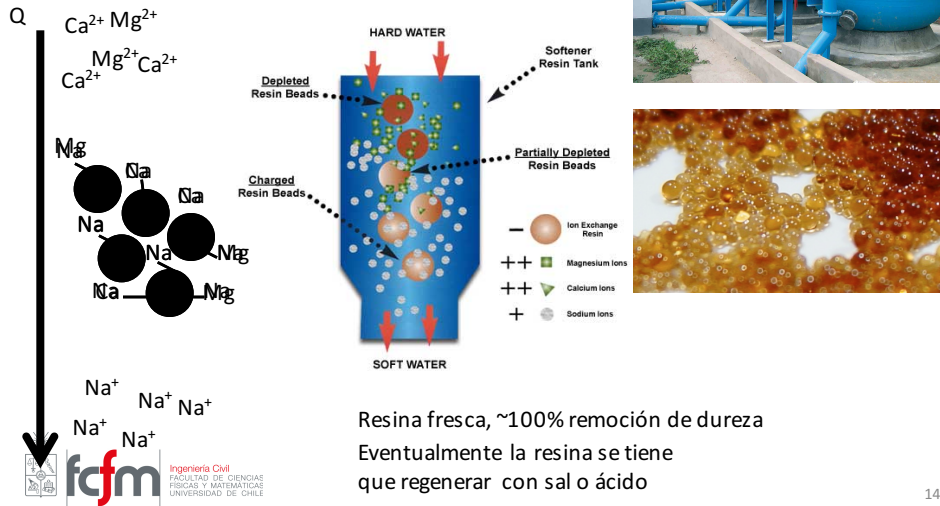




Métodos de ablandamiento

2) Intercambio Iónico

Aplicable a aguas con alto contenido de NCH.
 No hay adición de químicos.



Métodos de ablandamiento

3) Ablandamiento Cal/Soda Ash

Método más usado

3a) Cal se adiciona para remover **dureza de carbonatos** debido a Ca^{2+} y Mg^{2+}
Cal (CaO) o cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es usada para subir el pH

▪ **Cuando el pH alcanza 10,3**

CO_3^{2-} es la especie de alcalinidad predominante

Se forma CaCO_3 y se precipita fuera de la solución

✓ Se va la CH de Ca^{2+}

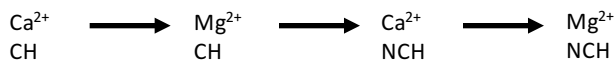
▪ **Cuando el pH alcanza 11**

Se forma $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$ y se precipita

✓ Se va la CH de Mg^{2+}

3b) Se adiciona Soda ash (Na_2CO_3) para remover NCH de Ca^{2+} y Mg^{2+}

Soda ash es más costosa que la Cal



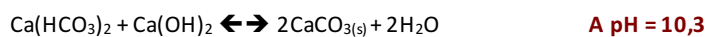
Al finalizar se necesita neutralizar el CO_2



15

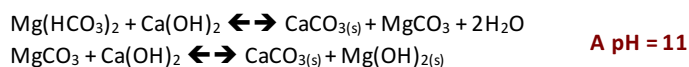
Reacciones de Ablandamiento

Dureza de carbonatos por Calcio o Calcium carbonate hardness (CCH)



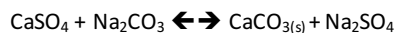
Adición de Cal

Dureza de carbonatos por Magnesio o Magnesium carbonate hardness (MCH)

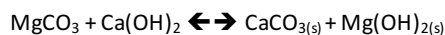
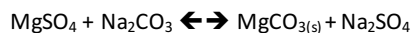


Adición de Soda Ash

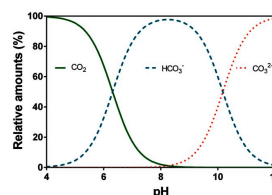
Dureza de no-carbonatos por Calcio o Calcium noncarbonate hardness (CNCH)



Dureza de no-carbonatos por Magnesio o Magnesium noncarbonate hardness (MNCH)



Neutralización con dióxido de carbono



16

Tratamiento de Agua

Secuencia de procesos físicos y físico-químicos, destinados principalmente a remover o reducir el contenido de sustancias indeseables para el consumo humano (definidos por norma NCh 409).

1) Plantas de tratamiento específico/limitado

Fuente de agua de alta calidad (subterránea) y sólo necesita tratamiento para un uso específico.

Ejemplo: desinfección, control de corrosión, fluoración, remoción de hierro/manganeso, etc.

2) Planta de Ablandamiento

Usadas para remover dureza (minerales) del agua. Generalmente la fuente es agua subterránea.

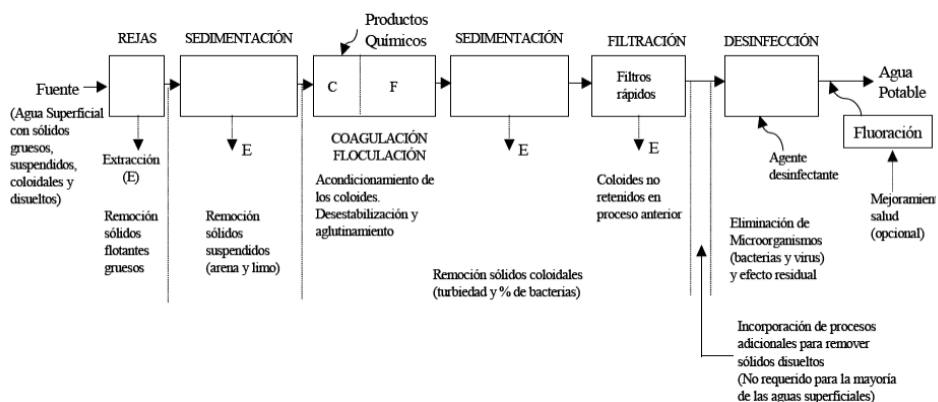
3) Planta de Coagulación/Filtración

Usada para tratar aguas superficiales.

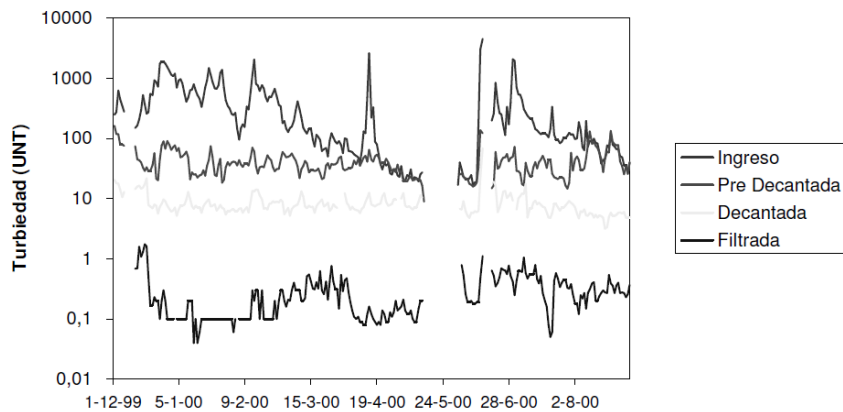


Plantas de Filtración/Coagulación

Esquema General Planta de Tratamiento de Agua Potable del Tipo Filtración Rápida

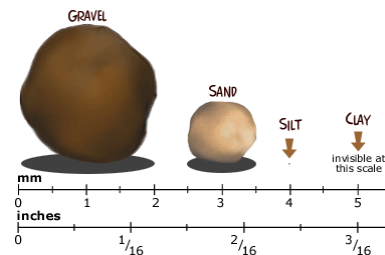


Efecto de procesos unitarios sobre la turbiedad



Coagulación-floculación

Objetivo: Desestabilizar las partículas coloidales (coagulación) para posibilitar su aglutinamiento (floculación) y posterior sedimentación.



Coagulación

Coloides cargados **electronegativamente** se desestabilizan al agregar iones de carga positiva (coagulante), como Al^{+3} ó Fe^{+3} . El coagulante debe ser mezclado rápidamente (30 segundos).

Floculación

Mezcla suave de la suspensión para producir contacto entre partículas y formar *flocs*.

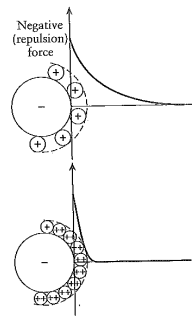
Coagulación-floculación

Mecanismos de remoción

1) Neutralización de carga

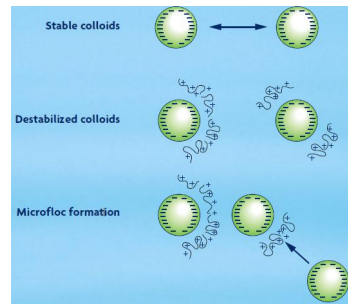
Coagulante contrarresta la carga de los coloides

Coloides tienen carga negativa y el coagulante tiene carga positiva. La partícula se desestabiliza y comienza a agregarse.



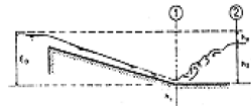
2) Bridging

La macromolécula de coagulante (polímero) son pegajosas y sirven de puente entre coloides.

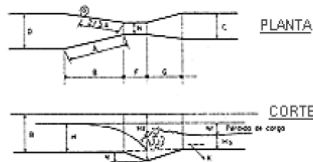


Coaguladores

Hidráulicos



a) CANAL RECTANGULAR CON FONDO INCLINADO



b) CANALETA PARSHALL

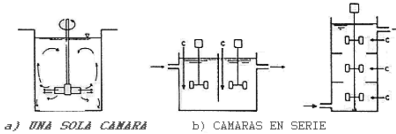


c) VERTEDERO RECTANGULAR



Mecánicos

■ Coagulación en una cámara y en cámaras en serie.



DISPOSITIVO	PUNTO DE APLICACION DEL COAGULANTE
Canaleta Parshall	En la garganta al pié del resalto
Vertedero Triangular	Sobre la napa, aguas abajo de éste
Cambio de Pendiente	Al pié del resalto
Compuerta	Al pié del resalto
Mezclador Mecánico	En la entrada del agua cruda

Coaguladores: Canaleta Parshall



Tanques de coagulación-floculación

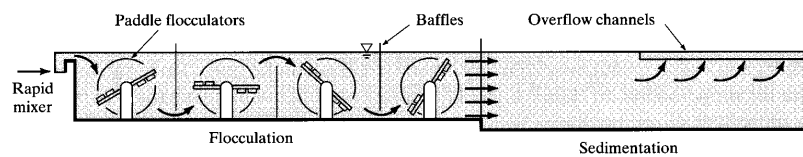
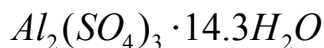


FIGURE 6.3 Cross section of flocculation and sedimentation tanks. (Source: *Water and Wastewater Technology 3/E* by Hammer and Hammer, © 1996. Reprinted by permission of Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

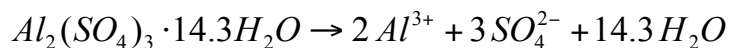
- 1) Coagulantes y aditivos se adicionan en tanques de mezclado llamados **“tanques de mezcla rápida”**
- 2) A continuación el agua se mueve a los **tanques de floculación** donde paletas o hélices mantienen la suspensión.
- 3) El agua continua a los **tanques de sedimentación** donde los flocs se decantan.

Durante la coagulación...

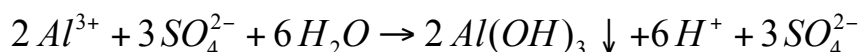
Coagulante más común: sulfato de aluminio hidratado o **Alum**



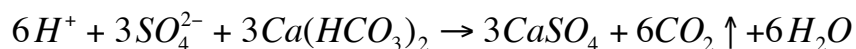
El sulfato de aluminio se ioniza en agua produciendo Al^{3+} y SO_4^{2-}



La mayor parte del Al^{3+} se combina con OH^- , formando $Al(OH)_3$ que precipita y arrastra los coloides



El exceso de iones hidrógeno (H^+) tiende a disminuir el pH de la solución, lo que es perjudicial para el proceso de coagulación en su conjunto. Para evitar esta situación se incorpora bicarbonato de calcio



Adición de coagulante

El Alum consume alcalinidad (HCO_3^-)

1 meq/L alum consume 1 meq/L alk

$$EW = \frac{MW}{n} \rightarrow \text{Alum} = Al_2(SO_4)_3 \rightarrow MW = 2 \times 27 + 3 \times 32 + 12 \times 16 = 600 \text{ g/mol}$$

$$n = 2 \times 3 \text{ or } 3 \times 2 = 6$$

$$EW = \frac{MW}{n} = \frac{600}{6} = 100 \frac{g}{eq} \text{ or } mg/meq$$

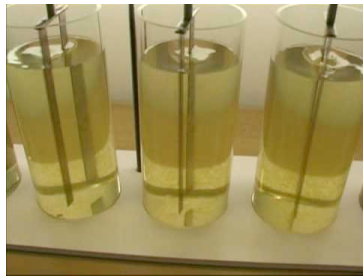
Cuando el Alum remueve turbiedad o SS, $Al(OH)_3$ (EW = 26 mg/meq) se precipita y se vuelve en lodos.

1 meq/L alum crea 1 meq/L lodo.

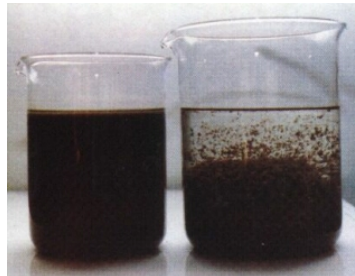
Lodo creado por floculación/sedimentación = Lodo químico + SS removido



Formación de flocs

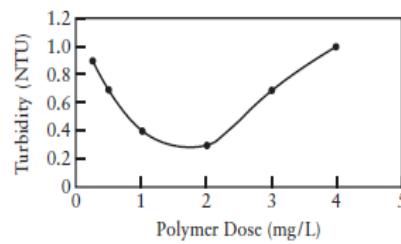


Test de Jarra



http://www.aquatreat.be/en/afval_info_en.htm

El test de jarra se hace para determinar la dosis optima de alum y/o polímero

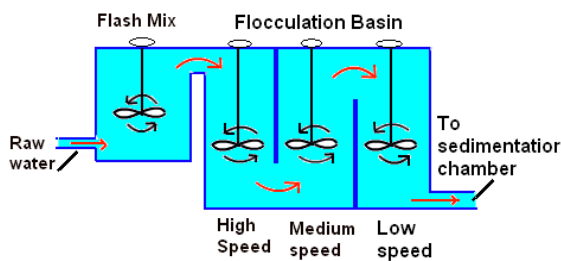


Polymer dose versus turbidity.



27

Floculación



En el tanque de **floculación**, paletas o helices rotan lentamente para favorecer la formación de flocs.

Parámetros de diseño:

- Tamaño de paleta
- Velocidad de rotación

En todos los floculadores el volumen se determina como:

$$V = Q * Td$$

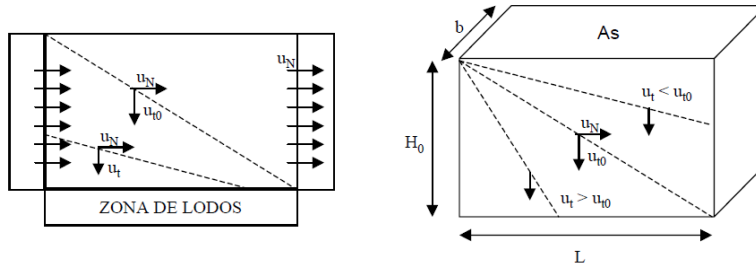
Q, caudal
Td, tiempo de detención

Tiempos de detención típicos son de 20 a 40 minutos, en tanques de 3 a 4 m de profundidad

28

Sedimentación

Sedimentador de Flujo Horizontal



u_{t0} : velocidad terminal de sedimentación de la partícula que sigue trayectoria crítica

A_s : Área superficial ($L \times b$)

Valores usuales:

Desarenación: $u_{t0} = 100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-día}$

Sedimentación: $u_{t0} = 40\text{-}60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-día}$ (sólidos suspendidos).

$$u_{t0} = \frac{Q}{A_s} (\text{m}^3 / \text{m}^2 - \text{día})$$

Table 10.3 Typical Settling Rates

Particle Diameter (mm)	Typical Particle	Settling Velocity (m/s)
1.0	Sand	2×10^{-1}
0.1	Fine sand	1×10^{-2}
0.01	Silt	1×10^{-4}
0.001	Clay	1×10^{-6}



Condiciones de sedimentación

Condiciones controladas durante la coagulación y floculación:
Tamaño, forma y densidad de partícula o floc.

Condiciones no controladas:
Densidad y viscosidad del fluido.

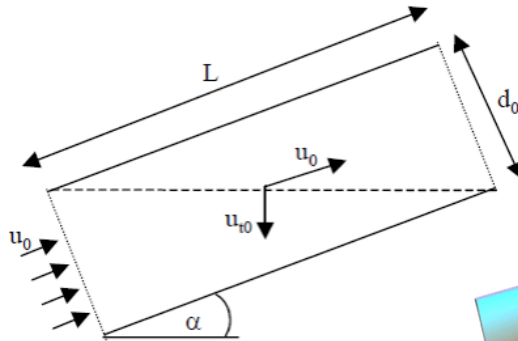
Table 10.3 Typical Settling Rates

Particle Diameter (mm)	Typical Particle	Settling Velocity (m/s)
1.0	Sand	2×10^{-1}
0.1	Fine sand	1×10^{-2}
0.01	Silt	1×10^{-4}
0.001	Clay	1×10^{-6}



Sedimentadores

Sedimentador de Flujo Oblicuo

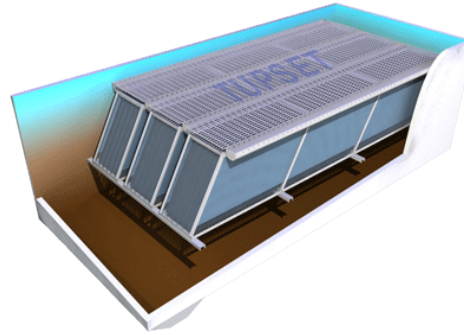


L: longitud entre módulo

d_0 : espacio libre entre módulos

u_0 : velocidad del flujo

α : ángulo de inclinación c/r a la horizontal

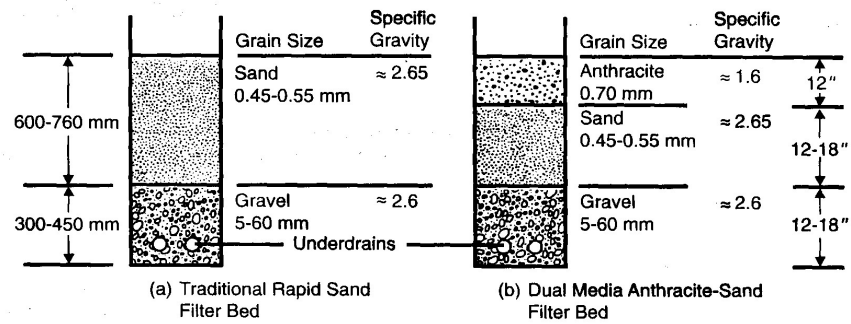


Sedimentadores circulares

Filtración

Objetivo: Remover partículas que no se retuvieron en los procesos previos. Este proceso garantiza un agua de baja turbiedad.

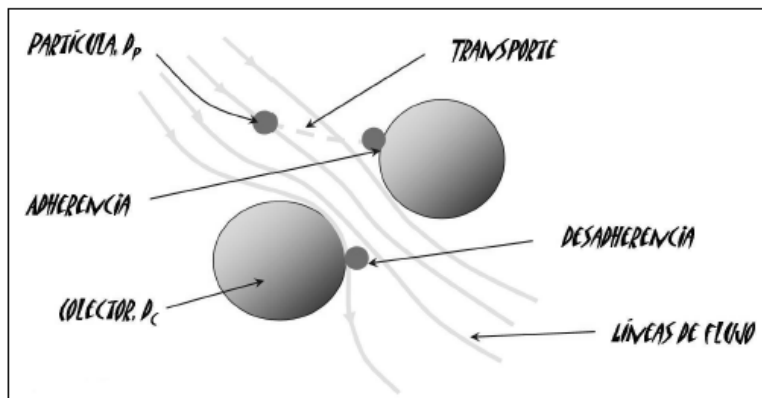
Se utiliza un medio granular con porosidad suficiente para retener sólidos suspendidos y coloidales



Filtración: Mecanismos

El proceso de filtración por tanto se puede considerar que ocurre en dos etapas distintas, pero complementarias.

- Transporte de las partículas dentro de los poros
- Adherencia a los granos del medio.



Filtros

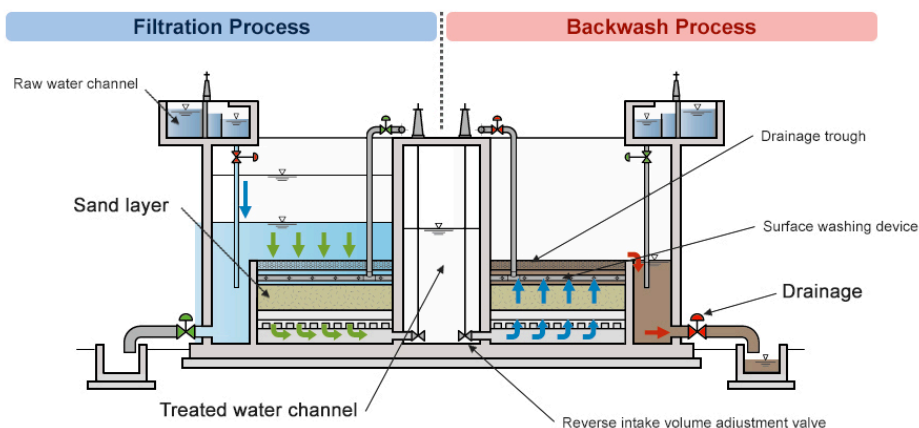
Un filtro se compone de las siguientes partes principales:

- Medio filtrante
- Soporte del medio filtrante
- Sistema de drenaje
- Sistema de lavado

Tasa (m ³ /m ² /d)	Medio Filtrante	Sentido de flujo	Carga sobre el lecho
Rápidos	Arena	Ascendentes	Gravitacionales
	Antracita	Descendentes	A presión
	Mixtos	Flujo mixto	
Lentos	Arena	Descendentes	Gravitacionales

UNIVERSIDAD DE CHILE

- Filtración rápida se realiza con tasas entre 120 y 360 m³/m²-día y requieren proceso previo de coagulación-floculación
- Filtración lenta se realiza con tasas de entre 4 y 10 m³/m²-día y no requieren proceso previo (filtración directa, sólo para aguas de baja turbiedad)

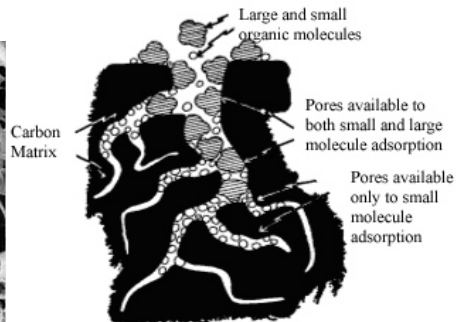


Carbon Activado

Es un material extremadamente absorbente utilizado para remover **contaminantes orgánicos** que causan olor y sabor

Se produce el carbón a partir de madera, material vegetal, o hueso (calentando en ausencia de aire)

Luego se activa calentándolo en presencia de de aire, CO₂, o vapor, para eliminar residuos y aumentar tamaño de poros



Desinfección

Para asegurar que se eliminan patógenos

El desinfectante más común es el cloro

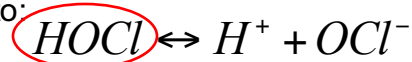
Otros desinfectantes incluyen ozono, luz ultravioleta, y altas temperaturas

La reacción que ocurre es:

- El cloro gas se hidroliza y forma ácido hipocloroso



- El ácido hipocloroso se disocia en protones e iones hipoclorito:

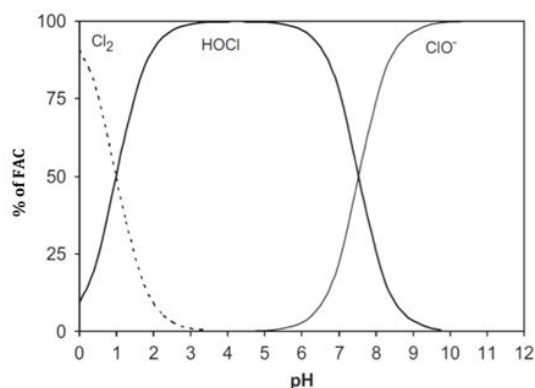


→ Disminución de pH de la solución



Desinfección con cloro

El pH del agua determina cuánto de ácido hipocloroso se disocia
La suma de ambas formas de cloro se conoce como **cloro libre disponible** (para desinfección)



Distribución de las especies de cloro disponible libre en solución acuosa

HOCl – ácido hipocloroso
OCl⁻ - ion hipoclorito
Cl₂ – cloro gaseoso

La actividad biocida del HOCl es 2-4x mayor a la del OCl⁻



Desinfección

Los parámetros de diseño son la dosis y el tiempo de contacto

TC = Concentración (mg/L) x tiempo de contacto (mins)

- La tasa de muerte de patógenos para una determinada dosis NO sigue una reacción de primer orden, por tanto se usan relaciones empíricas para relacionar dosis y tiempo de contacto a fin de alcanzar un porcentaje de destrucción de patógenos.
- Tiempo de contacto: al menos 30 min (usualmente 2 horas)

TABLE 1.5—CT Values (CT_{99.9}) FOR 99.9 PERCENT INACTIVATION OF GIARDIA LAMBLIA CYSTS BY FREE CHLORINE AT 20 °C¹

Free residual (mg/l)	pH						
	≤ 6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	≤ 9.0
≤ 0.4	36	44	52	62	74	89	105
0.6	38	45	54	64	77	92	109
0.8	39	46	55	66	79	95	113
1.0	39	47	56	67	81	98	117
1.2	40	48	57	69	83	100	120
1.4	41	49	58	70	85	103	123
1.6	42	50	59	72	87	105	126
1.8	43	51	61	74	89	108	129
2.0	44	52	62	75	91	110	132
2.2	44	53	63	77	93	113	135
2.4	45	54	65	78	95	115	138
2.6	46	55	66	80	97	117	141
2.8	47	56	67	81	99	119	143
3.0	47	57	68	83	101	122	146

¹ These CT values achieve greater than a 99.99 percent inactivation of viruses. CT values between the indicated pH values may be determined by linear interpolation. CT values between the indicated temperatures of different tables may be determined by linear interpolation. If no interpolation is used, use the CT_{99.9} value at the lower temperature, and at the higher pH.



Compuestos químicos para desinfección

- Hipoclorito de sodio (cloro comercial o lejía) – NaOCl
- Problema de la desinfección por cloro: Se combina con sustancias orgánicas naturales y forma trihalometanos → **Cancerígenos**
- Cloro combinado o cloramina: formado por la reacción química entre compuestos nitrogenados (amonio) y el cloro
 - Monocloramina (NH_2Cl)
 - Dicloramina (NHCl_2)
 - Tricloramina (NCl_3)
- Comparadas con el cloro libre, la cloramina...
 - Es un desinfectante débil: requieren TC más largos
 - Generan menos subproductos de desinfección
 - Mas estables y producen un residual más duradero

Compuestos químicos para desinfección

Ozono – Desinfectante más fuerte que el cloro libre.

- Valores de TC bajos.
- Muy inestable → no puede ser utilizado como residual.
- Costoso.
- Forma bromatos, un compuesto inorgánico con efectos a la salud.

Dióxido de Cloro o ClO_2 – Desinfectante emergente.

- Forma cloratos (ClO_3^-) y clorito (ClO_2^-) como subproducto (disinfection byproducts)
- Muy efectivo en destruir protozoos, virus, y parásitos. Oxida todos los metales y materia orgánica a CO_2 y agua. Más efectivo a pH alto comparado con otras formas de cloración.
- Se debe generar in-situ. Muy costoso y requiere experticia para su manejo. Muy flamable.

ClO_2 and UV – Desinfectante emergente.

- UV no se puede usar como residual.

Desinfectante residual

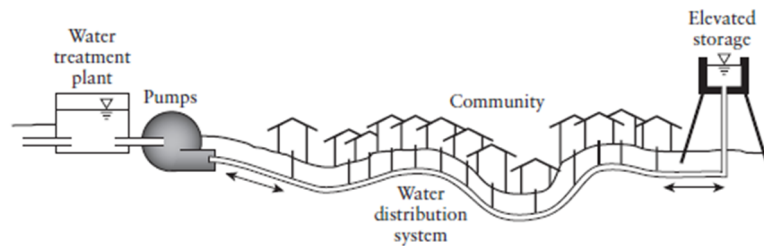


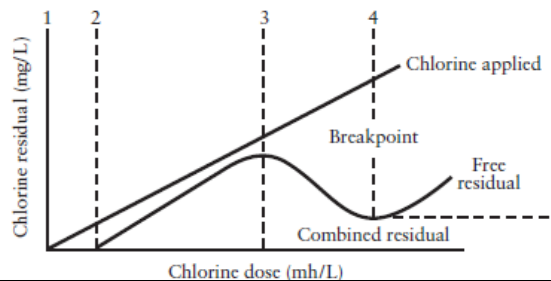
Figure 10.34 During periods of high water demand, the water flows from both the water plant and the elevated storage tanks to meet the demand. During the low-demand periods, the pumps fill the elevated storage tanks.

Cómo nos aseguramos que el agua potable que sale de la planta se mantendrá libre de bacterias, virus, y parásitos?

Desinfección

Del cloro agregado al agua, una parte se consume en oxidar materia orgánica e inorgánica, y el resto queda disponible para desinfección

- Breakpoint o punto de quiebra: el amonio es completamente oxidado por el cloro
 - $[\text{Cl}_2]/[\text{NH}_3] = 1.5$, no queda cloro residual
 - $[\text{Cl}_2]/[\text{NH}_3] < 1.5$, queda cloro residual combinado (cloraminas)
 - Máxima concentración de cloraminas cuando $[\text{Cl}_2]/[\text{NH}_3] = 1$



Desinfectante residual

Table 10.4 Chlorine Residual Limits

Disinfectant	Minimum Residual* (mg/L)		MRDL** (mg/L)	MRDLG*** (mg/L)
	Leaving Plant	In Distribution System		
Chloramines (as Cl ₂)	2.0		4.0	4.0
Combined residual		0.5		
Chlorine (as Cl ₂)	2.0		4.0	4.0
Chlorine dioxide (as ClO ₂)	2.0		0.8	0.8
Free chlorine residual		0.2		

* From Illinois and Missouri regulations.

** MRDL = maximum residual disinfectant level.

*** MRDLG = maximum residual disinfectant level goal.

Fluoración

Romero et al., 2017. Consecuencias de la fluoración del agua potable en la salud humana.
Rev Med Chile, 145: 240-249.

- Se práctica en Chile desde 1953 con un programa piloto en Curicó.
- La concentración óptima de flúor recomendada en agua potable está entre 0,6 y 1,0 mg/L, con límite máximo de 1,5 mg/L.
- No hay pruebas científicamente contundentes de que la fluoración del agua potable beneficia la salud dental

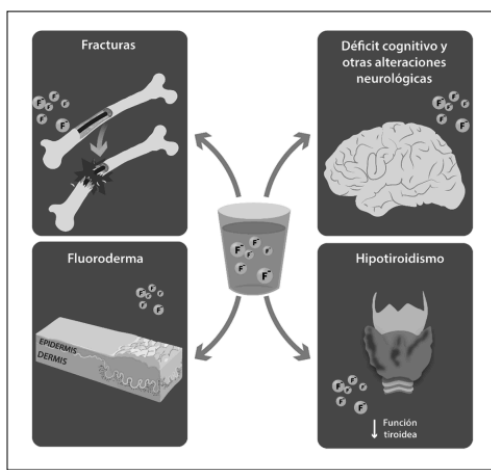


Figura 1. Posibles efectos del Fluoruro (F) en el organismo. Cuadrante superior izquierdo; muestra que la ingesta de F pudiera aumentar el riesgo de fracturas en la edad adulta por trastornos en la calcificación. Cuadrante inferior izquierdo; muestra lesiones a nivel de la dermis, conocidas como fluoroderma. Cuadrante superior derecho; muestra posibles efectos adversos del F a nivel del sistema nervioso central resultando en déficit cognitivo. Cuadrante inferior derecho; la ingesta de F, puede reducir la función tiroidea.