

## DIMENSIONAMIENTO DE SUAVIZADORES

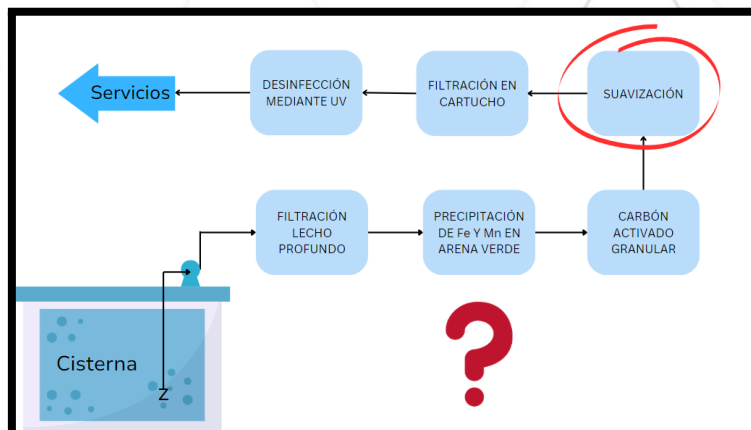
GERMÁN GROSÓ  
PAMELA MORENO

18 de Junio

Departamento recursos humanos:

Departamentos de intendencia y vigilancia:

Hoy les presentamos a personas de tres departamentos imprescindibles de Carbotecnia.



Antes de instalar un tren de tratamiento de agua, debemos cuestionar qué etapas deben conformarlo. En muchas ocasiones encontramos que han instalado un proceso de suavización, cuando el agua no lo requiere (por diversas razones: porque el agua no tiene dureza o la dureza es muy baja; porque suavizar el agua es más costoso que remediar el problema que genera; etc.). Además de haber invertido en equipos innecesarios, el usuario sigue adquiriendo sal que no le aporta nada.

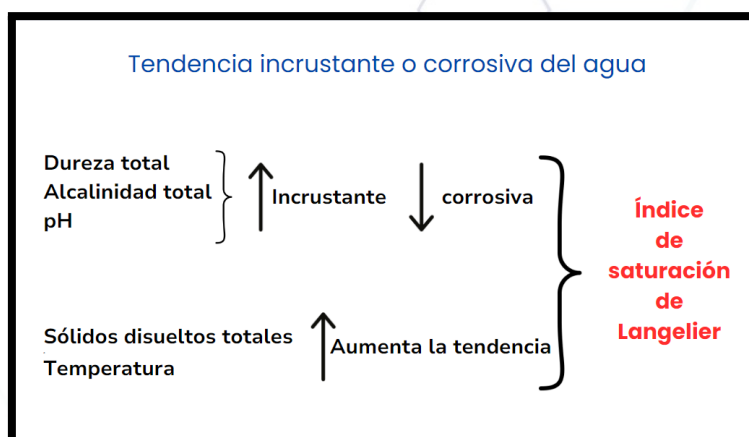
**Principales electrolitos**

	CATIONES	ANIONES	
<b>Dureza total</b> pH $[H^+][OH^-] = 1 \times 10^{-14}$ Si aumenta el pH, es porque disminuye la concentración de hidrógeno y aumenta la concentración de hidróxidos	- Na <sup>+</sup> (sodio)	- Cl <sup>-</sup> (cloruros)	<b>Alcalinidad total</b>
	- <b>Ca<sup>2+</sup> (calcio)</b>	- <b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bicarbonatos)</b>	
	- <b>Mg<sup>2+</sup> (magnesio)</b>	- <b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (carbonatos)</b>	
	- H <sup>+</sup> o H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> (hidrógeno)	- <b>OH<sup>-</sup> (hidróxidos)</b>	
	- K <sup>+</sup> (potasio)	- SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (sulfatos)	
	- Fe <sup>2+</sup> (hierro)	- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (nitratos)	
	- Mn <sup>2+</sup> (manganeso)	- F <sup>-</sup> (fluoruros)	
	- Ba <sup>2+</sup> (bario)	- PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (fosfatos)	
	- Sr <sup>2+</sup> (estroncio)	- S <sup>2-</sup> (sulfuros)	
	- Cu <sup>2+</sup> (cobre)	- Largo etc.	
	- Zn <sup>2+</sup> (zinc)		
	- Largo etc.		
	$\Sigma$ <b>Sólidos disueltos totales</b>		

Las sales inorgánicas que se disuelven en agua “ionizan”. Esto es: se separan en dos partes, una con carga positiva, llamada “catión” y otra con carga negativa, llamada “anión”. A los cationes calcio y magnesio se les ha llamado “dureza total”. Al conjunto de aniones bicarbonato, carbonato e hidróxido se les llama “alcalinidad total”. Cuando un agua contiene dureza y alcalinidad total, presenta una tendencia particularmente incrustante. Cuando un agua contiene muy poco o nada de alguno de estos grupos de compuestos, tiende a corroer el hierro, el acero, el cobre y otros metales.

La realidad es que, no solamente el calcio y el magnesio, sino otros cationes divalentes distintos al calcio y al magnesio también forman sales incrustantes. Sin embargo, esos otros cationes divalentes suelen estar presentes en el agua en concentraciones mucho más bajas que el calcio y el magnesio. Y otros aniones, como fosfatos, fluoruros y silicatos, también tienden a incrustar, aunque también suelen estar en concentraciones más bajas que la alcalinidad total.

Cuando hemos hablado de carbón activado en webinars anteriores, la preocupación de fondo ha sido la toxicidad que pueden causar las moléculas orgánicas que buscamos adsorber con el carbón. En este webinar, al hablar de la tendencia incrustante o corrosiva del agua, la preocupación no tiene que ver con toxicidad, sino con la afectación a tuberías, equipos de tratamiento de agua, calderas, calentadores de agua, y otros.



Hay índices que, a partir de los datos de dureza total, alcalinidad total, pH, sólidos disueltos totales y temperatura reflejan si un agua tiene tendencia incrustante, equilibrada o corrosiva. El más conocido es el Índice de saturación de Langelier. Con los datos de los parámetros mencionados, se calcula el valor del índice mediante una gráfica o una calculadora digital, como la que publica Lenntech en internet. El índice es adimensional y puede tener valores negativos a positivos. Valores de entre -0.3 y +0.3 corresponden a un agua equilibrada. Valores mayores a +0.3 indican que el agua tiene tendencia incrustante. Mientras mayor es el valor positivo, el agua es más incrustante. Valores menores a -0.3 corresponden a un agua corrosiva y mientras el valor es más negativo, el agua es más corrosiva. Cuando las tuberías y los equipos con los que tendrá contacto el agua tienen metales oxidables (como hierro, acero al carbón, acero galvanizado o cobre), lo deseable es que el agua sea equilibrada. Cuando no hay presencia de metales oxidables en las tuberías y equipos con los que tendrá contacto el agua, es deseable que el agua no sea incrustante, y no importa que el agua sea corrosiva (con el tiempo, las incrustaciones terminan afectando casi todo: las tuberías se tapan, el carbón activado deja de adsorber, la arena verde deja de catalizar la reacción para precipitar hierro y manganeso, los tubos de cuarzo de las lámparas ultravioleta impiden que esta realice su función, las membranas de ósmosis inversa se tapan...).

Mientras mayor es la dureza total, la alcalinidad total y el pH, el agua tiene mayor tendencia incrustante. Mientras menor es el valor de estos parámetros, el agua tiene mayor tendencia corrosiva. Mientras mayor es la concentración de sólidos disueltos totales y la temperatura, mayor es la fuerza de la tendencia (incrustante o corrosiva). Más adelante, Pamela nos mostrará un ejemplo en el que calcula el Índice de Saturación de Langelier.

En la imagen previa mostramos que al multiplicar la concentración de iones hidrógeno (más correctamente, llamados iones hidronio, oxidanio u oxonio, pero usaremos el término "hidrógeno") por la concentración de iones hidróxido, siempre obtenemos un valor constante:

$$[H^+][OH^-] = 1 \times 10^{-14}$$

El valor de  $1 \times 10^{-14}$  es a  $25^\circ\text{C}$  y varía con la temperatura, aunque muy poco.

Esta relación se cumple, aunque al agua en cuestión se le hayan adicionado iones hidrógeno o iones hidróxido.

Por lo tanto, si la concentración del ion hidrógeno disminuye, la concentración del ion hidróxido aumenta en una proporción tal que el producto de ambas concentraciones sigue siendo  $1 \times 10^{-14}$  a  $25^\circ\text{C}$ .

Ya que los valores de las concentraciones de iones hidrógeno y iones hidróxidos pueden ser muy pequeños, se expresan en términos de pH y de pOH. El pH se define como:

$$pH = -\log[H^+]$$

Mientras mayor es la concentración de iones hidrógeno, menor es el valor del pH del agua.

El agua se comporta de manera que el rango de valores que puede tener el pH es de 0 a 14.

El pOH se define como:

$$pOH = -\log[OH^-]$$

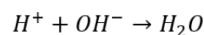
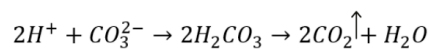
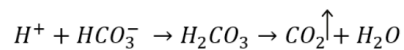
Mientras mayor es la concentración de iones hidróxido, menor es el valor del pOH del agua.

Y:

$$pH + pOH = 14$$

De todo esto, al aumentar el valor del pH del agua, aumenta la concentración de iones hidróxido en la misma y, por lo tanto, aumenta su alcalinidad total.

Los ácidos protónicos reaccionan con la alcalinidad y la descomponen



Cuando un agua tiene tendencia incrustante, puede corregirse esa tendencia agregando un ácido protónico (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u otro) o suavizando el agua.

Un ácido protónico es el que aporta al agua iones hidrógeno al ionizar en agua. Los iones hidrógeno descomponen la alcalinidad total y solo dejan como residuo en el agua el anión del ácido utilizado (cloruro, si se utilizó HCl; sulfato, si se utilizó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, etc.). Los carbonatos y bicarbonatos forman ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y agua. El ácido carbónico se descompone en CO<sub>2</sub> (que pasa al aire como gas) y en agua. Agregar ácido para disminuir la tendencia incrustante del agua es más barato que suavizarla. No obstante, resulta difícil controlar con precisión la dosis de ácido requerida. Si dosificamos muy poco de más, podemos llevar al agua a ser muy oxidante. Además, manejar ácidos protónicos fuertes (clorhídrico, sulfúrico y nítrico), que son los que ionizan totalmente y que, por lo tanto, son más efectivos para descomponer la alcalinidad total, implica un riesgo.



Una resina de intercambio iónico es un material polimérico que tiene la capacidad de intercambiar iones contenidos en la solución acuosa que fluye a través de la cama de resina. Las resinas de intercambio iónico están formadas por dos componentes principales:

## 1. Matriz polimérica

- La matriz polimérica constituye la estructura básica de la resina y está formada por un polímero de alta porosidad, generalmente un copolímero de estireno y divinilbenceno. Esta matriz proporciona la integridad física y la superficie necesaria para el intercambio iónico.
- El divinilbenceno actúa como un agente de entrecruzamiento que proporciona estabilidad y rigidez a la estructura del polímero, mientras que el estireno proporciona flexibilidad.

## 2. Grupos Funcionales

- Los grupos funcionales son los sitios activos en la superficie de la matriz polimérica donde ocurre el intercambio iónico. Estos grupos pueden ser ácidos o básicos, dependiendo del tipo de resina.
- Las resinas de intercambio catiónico contienen grupos ácidos (como grupos sulfonato,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ) que pueden intercambiar iones positivos (cationes) como  $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ .
- Las resinas de intercambio aniónico contienen grupos básicos (como grupos amina cuaternaria,  $-\text{NR}_4^+$ ) que pueden intercambiar iones negativos (aniones) como  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Se producen en forma de esferas con rango de tamaño de partícula que suele ser 16x40 o 16x50.

Las resinas de intercambio iónico, al igual que otros sólidos que intercambian iones, se aplican en la purificación o en la modificación química de agua y de soluciones acuosas. Tanto las resinas **catiónicas** como las **aniónicas**, pueden ser **fuertes** o **débiles**.

## Resinas de Intercambio Catiónico:

- **Ácidas fuertes:** tienen grupos sulfonato ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ). Son capaces de intercambiar cationes a un amplio rango de pH.
- **Ácidas débiles:** tienen grupos carboxilato ( $-\text{COOH}$ ). Intercambian cationes a un pH más limitado y son más sensibles a cambios en el pH.

## Resinas de Intercambio Aniónico:

- **Básicas fuertes:** tienen grupos amina cuaternaria ( $-\text{NR}_4^+$ ). Pueden intercambiar aniones en un amplio rango de pH.
- **Básicas débiles:** tienen grupos amina terciaria ( $-\text{NR}_3$ ). Son eficaces en un rango de pH más limitado y son más sensibles a cambios en el pH.



Las resinas de intercambio iónico no son los únicos sólidos que intercambian iones. Existen otros que también lo hacen: algunos intercambian cationes y otros intercambian aniones. Algunos son productos naturales y otros los produce el ser humano. Los que intercambian cationes, tienen preferencia por distintos tipos de cationes. Y lo mismo sucede con los que intercambian aniones.

Regenerante de una resina catiónica	Ciclo de la resina
NaCl	$\text{Na}^+$
NaOH	$\text{Na}^+$
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{Na}^+$
KCl	$\text{K}^+$
KOH	$\text{K}^+$
HCl	$\text{H}^+$
$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}^+$
$\text{HNO}_3$	$\text{H}^+$

Las resinas de intercambio iónico pueden cargarse o regenerarse con distintos cationes (si la resina es catiónica o aniones (si la resina es aniónica). En ocasiones (no siempre) se ofrecen comercialmente

precargadas con algún catión o con algún anión específico. Por ejemplo, las resinas suavizadoras suelen ofrecerse cargadas con  $\text{Na}^+$  y se dice que se ofrecen “ciclo sodio”. El sodio puede provenir de distintos compuestos cuyo catión es sodio:  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , etc.

No obstante, la misma resina que originalmente se comercializa como “ciclo sodio”, se puede cambiar a “ciclo hidrógeno” si se regenera con un ácido protónico, como  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$  o  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Al volverse “ciclo hidrógeno”, esta resina ahora sirve para desmineralizar agua (en conjunto con una resina aniónica que se opere en “ciclo hidróxido”).

La resinas aniónicas pueden cargarse con hidróxidos (ciclo hidróxido) o con cloruros (ciclo cloruro).

Estas y otras diferencias permiten aplicar las resinas para lograr objetivos distintos y por diferentes caminos. Entre estos, están:

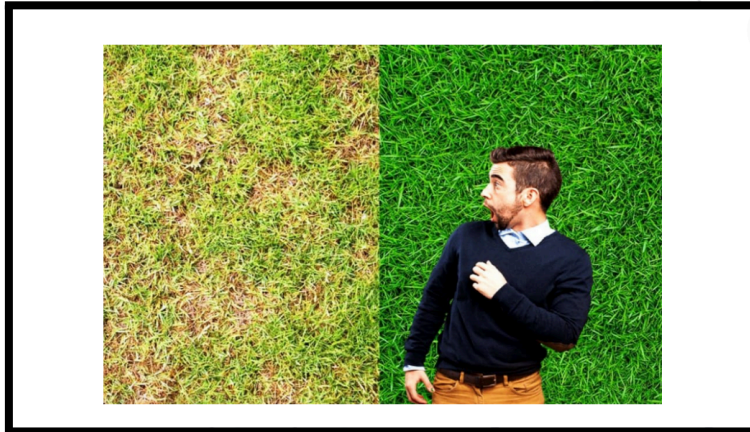
- Suavización mediante resina fuerte ciclo sodio.
- Dealcalinización mediante resina fuerte ciclo hidrógeno.
- Dealcalinización-suavización mediante resina débil ciclo hidrógeno.
- Dealcalinización mediante intercambio aniónico.
- Dealcalinización-suavización mediante intercambio catiónico-aniónico.
- Desilización mediante intercambio catiónico-aniónico.
- Deionización mediante resina catiónica fuerte y aniónica fuerte.
- Deionización mediante resina catiónica fuerte, resina aniónica débil, desgasificador y resina aniónica débil.
- Deionización mediante resina mixta (catiónica y aniónica en una sola cama).

#### Iones que generalmente prefieren las resinas de intercambio iónico

- Los de carga mayor
- Los de radio iónico menor

Preferencia	Ion Trivalente	Ion Divalente	Ion Monovalente
1	$\text{Al}^{3+}$ (aluminio)		
2	$\text{Fe}^{3+}$ (hierro(III))		
3		$\text{Ba}^{2+}$ (bario)	
4		$\text{Sr}^{2+}$ (estroncio)	
5		$\text{Ca}^{2+}$ (calcio)	
6		$\text{Mg}^{2+}$ (magnesio)	
7			$\text{K}^+$ (potasio)
8			$\text{NH}_4^+$ (amonio)
9			$\text{Na}^+$ (sodio)
10			$\text{H}^+$ (hidrógeno)
11			$\text{Li}^+$ (litio)

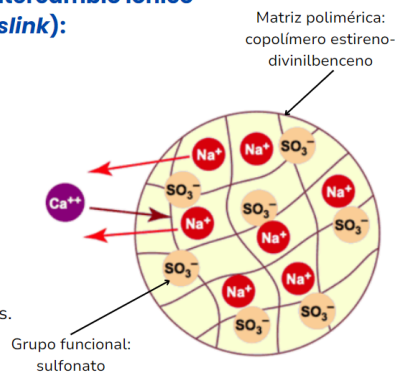
Una vez que se coloca una resina catiónica fuerte ciclo sodio en un suavizador, retendrá los cationes que prefiere por encima del sodio. Los más comunes son el calcio y el magnesio. Obsérvese que, generalmente, las resinas catiónicas prefieren los cationes de mayor carga. Entre los cationes de la misma carga, prefieren los de menor radio iónico. Cuando la resina catiónica utilizada en suavización se ha agotado, ya no retiene dureza con eficiencia y es momento de regenerarla.



Si suavizamos agua con alta dureza (digamos, por encima de 15 granos por galón... más adelante veremos qué es esta variable) y regamos plantas con el agua suavizada, provocaremos el amarillamiento de las plantas, debido al alto contenido de sodio en el agua suavizada. Esto nos recuerda que siempre hay que analizar químicamente los efectos de la suavización de agua.

### Calidad de una resina de intercambio iónico (grado de *crosslink*):

- Alta cantidad de grupos funcionales.
- Grupos funcionales bien distribuidos.
- Alta porosidad.
- Buena estabilidad química, mecánica y térmica.
- Baja cantidad de partículas fracturadas.
- Mínima cantidad de impurezas.



No todas las resinas de intercambio iónico tienen la misma calidad. Esta depende de los atributos descritos en la imagen anterior. Debemos buscar, no la resina más barata, sino la que nos dé el mayor beneficio/costo y la mayor garantía de cumplimiento de la calidad.

### Otros efectos de una alta dureza en agua

- Provoca sensación de acartonamiento en la piel y el pelo ya que disuelve las grasas naturales de estos.
- Se ligan a los fosfatos, que son fuertemente aniónicos. Ya que la acción de la mayoría de los detergentes depende de los fosfatos y de otros surfactantes aniónicos, la dureza disminuye su efectividad.
- Provoca un sabor característico (no agradable para la mayoría) en agua potable.

El agua dura no solamente tiene mayores posibilidades de poseer una tendencia incrustante. Puede tener otros efectos indeseables, como los que se mencionan en la imagen anterior.

<p><b>Unidades para medir dureza</b> mEq/L mg/L como CaCO<sub>3</sub> o ppm como CaCO<sub>3</sub> gr/gal gr = granos g = gramos 1 gr = 65.7235 mg equivalentes a CaCO<sub>3</sub> 1 gr/gal = 17.1 mg/L como CaCO<sub>3</sub></p> <p><b>Unidades para medir la capacidad de las resinas de intercambio iónico</b> Eq/L kgr/ft<sup>3</sup> 1 kgr = 1000 gr</p>
--

En el área más ortodoxa de la química del agua, la concentración de compuestos que ionizan cuando se disuelven en una solución acuosa se expresa en **mEq/L**. El término mEq significa "miliequivalente químico". Un mEq de un compuesto es:

$$mEq \text{ del compuesto} = \frac{\text{masa molar del compuesto en mg}}{\text{carga neta de la parte catiónica}} = \frac{\text{mg del compuesto}}{mEq}$$

Numéricamente, la carga neta de la parte aniónica es igual que la carga neta de la parte catiónica, aunque con signo negativo.

Por ejemplo, en el ácido fosfórico, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, la parte catiónica son tres iones hidrógeno (3 H<sup>+</sup>) y la parte aniónica es un ion fosfato (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>). La carga neta de la parte catiónica es +3 y la carga neta de la parte aniónica es -3.

Para convertir unidades de concentración de un compuesto, de mg/L a mEq/L:

$$\text{Concentración en } \frac{mEq}{L} = \frac{\text{Conc. en mg/L}}{mEq \text{ del compuesto}}$$

### Ejemplo de conversión de unidades, de mg/L a mEq/L:

La concentración de Ca<sup>2+</sup> en cierta agua es 17 mg/L y la concentración de Mg<sup>2+</sup> es 8 mg/L. Expresar ambas concentraciones en mEq/L y reportar la dureza total de esta agua en dichas unidades.

Cálculos:

Empezamos por calcular el valor de un mEq de cada uno de los iones mencionados:

$$mEq \text{ del Ca}^{2+} = \frac{40}{2} = 20 \frac{mg \text{ Ca}^{2+}}{mEq}$$

$$mEq \text{ del } Mg^{2+} = \frac{24.3}{2} = 12.15 \frac{mg \text{ } Mg^{2+}}{mEq}$$

Como vimos unas líneas atrás,

$$\text{Concentración en } \frac{mEq}{L} = \frac{\text{Conc. en mg/L}}{mEq \text{ del compuesto}}$$

De esto:

$$\text{Concentración de Ca} = \frac{17 \text{ mg } Ca^{2+} / L}{20 \text{ mg } Ca^{2+} / mEq} = 0.850 \frac{mEq}{L}$$

$$\text{Concentración de Mg} = \frac{8 \text{ mg } Mg^{2+}}{12.15 \text{ mg } Mg^{2+} / mEq} = 0.658 \frac{mEq}{L}$$

$$\text{Dureza total} = \text{Conc. de Ca} + \text{Conc. de Mg} = 0.850 + 0.658 = 1.508 \frac{mEq}{L}$$

En el ramo del intercambio iónico, además de expresar concentraciones en mEq/L, se utiliza la unidad llamada **mg/L como CaCO<sub>3</sub>**.

Esta unidad expresa la concentración de un compuesto (que ioniza al disolverse en solución acuosa) en mg de CaCO<sub>3</sub> equivalentes (desde el punto de vista de su capacidad para unirse con otros iones) por litro de solución.

La relación entre la concentración de un compuesto (que ioniza en solución acuosa) en mg/L y su concentración en mg como CaCO<sub>3</sub>/L es:

$$\text{Concentración en } \left[ \frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \right] = \left[ \text{Conc. en } \frac{mg}{L} \right] * \left[ \frac{mEq \text{ del CaCO}_3}{mEq \text{ del compuesto}} \right]$$

### Ejemplo:

La concentración de Ca<sup>2+</sup> en cierta agua es 17 mg/L y la concentración de Mg<sup>2+</sup> es 8 mg/L. Expresar ambas concentraciones en mg CaCO<sub>3</sub>/L y reportar la dureza total de esta agua en estas unidades.

Cálculos:

En el ejemplo previo calculamos el valor de un mEq de Ca<sup>2+</sup> y de un mEq de Mg<sup>2+</sup>. Ahora hay que calcular el valor de un mEq de CaCO<sub>3</sub>:

$$mEq \text{ del CaCO}_3 = \frac{100}{2} = 50 \frac{mg \text{ CaCO}_3}{mEq}$$

A partir de estos valores:

$$\text{Conc. de Ca} = 17 \frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{L}} * \frac{50 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{mEq}}}{20 \frac{\text{mg Ca}^{2+}}{\text{mEq}}} = 42.5 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}}$$

$$\text{Conc. de Mg} = 8 \frac{\text{mg Mg}^{2+}}{\text{L}} * \frac{50 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{mEq}}}{12.15 \frac{\text{mg Mg}^{2+}}{\text{mEq}}} = 32.9 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}}$$

$$\text{Dureza total} = \text{Conc. de Ca} + \text{Conc. de Mg} = 42.5 + 32.9 = 75.4 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}}$$

Otra unidad de medición de masa que se utiliza en el intercambio iónico en Estados Unidos es el “grano” (**grain**). Es una unidad de masa, obsoleta actualmente en muchos ámbitos, que utilizaron varios sistemas de medición, incluidos los sistemas avoirdupois, Troy y Apotecario. Se abrevia como **gr** (a diferencia de los gramos, cuya abreviatura es g). El valor exacto de un grano es 64.79891 mg (miligramos).

Cuando la concentración de un compuesto (que ioniza en agua) se expresa en gr/gal (granos por galón), equivale a 64.79891 mg como CaCO<sub>3</sub> por galón. Esto es:

$$\frac{1 \text{ grano}}{\text{gal}} = 64.79891 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{gal}}$$

$$\frac{1 \text{ grano}}{\text{gal}} = 17.1 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}}$$

### Ejemplo:

La concentración de Ca<sup>2+</sup> en cierta agua es 17 mg/L y la concentración de Mg<sup>2+</sup> es 8 mg/L. Expresar ambas concentraciones en gr/gal y reportar la dureza total de esta agua en estas unidades.

En el ejemplo anterior calculamos la concentración de estos dos cationes en mg CaCO<sub>3</sub>/L. A partir de dichos valores:

$$\text{Conc. de Ca} = 42.5 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} * \frac{1 \frac{\text{gr}}{\text{gal}}}{17.1 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}}} = 2.485 \frac{\text{gr}}{\text{gal}}$$

$$\text{Conc. de Mg} = 32.9 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} * \frac{1 \frac{\text{gr}}{\text{gal}}}{17.1 \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}}} = 1.924 \frac{\text{gr}}{\text{gal}}$$

$$\text{Dureza total} = \text{Conc. de Ca} + \text{Conc. de Mg} = 2.485 + 1.924 = 4.409 \frac{\text{gr}}{\text{gal}}$$

Unidades con las que se expresa la capacidad de las resinas de intercambio iónico

La capacidad de las resinas de intercambio iónico normalmente se expresa en Eq/L o en kgr/ft<sup>3</sup>.

Eq (equivalente) corresponde a 1000 mEq.

L corresponde a un litro de resina. Por lo tanto, Eq/L es la capacidad de intercambio de un litro de resina.

kgr corresponde a 1000 gr.

ft<sup>3</sup> corresponde a un ft<sup>3</sup> de resina. Por lo tanto, kgr/ft<sup>3</sup> es la capacidad de intercambio de un ft<sup>3</sup> de resina.

## Equipos que utilizan resinas de intercambio iónico

Unidades para medir TCCV (min)

**gpm/ft<sup>3</sup>** (los ft<sup>3</sup> son de resina)

**BV/h**

BV/h = volúmenes de cama de resina por hora

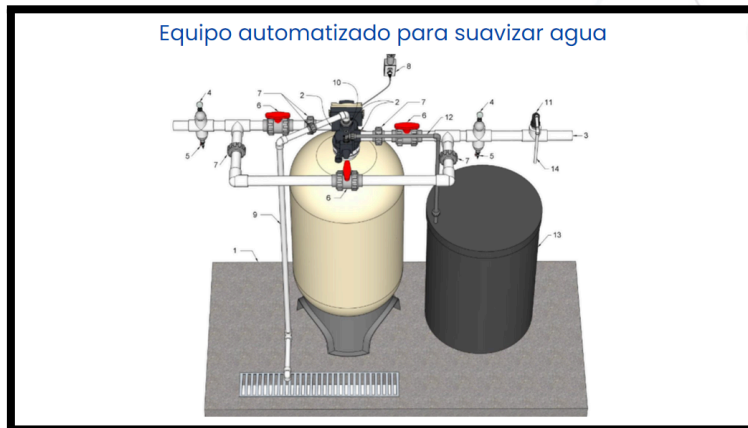
Unidades para medir velocidad de flujo o CH (gpm/ft<sup>2</sup>)

**m/h**

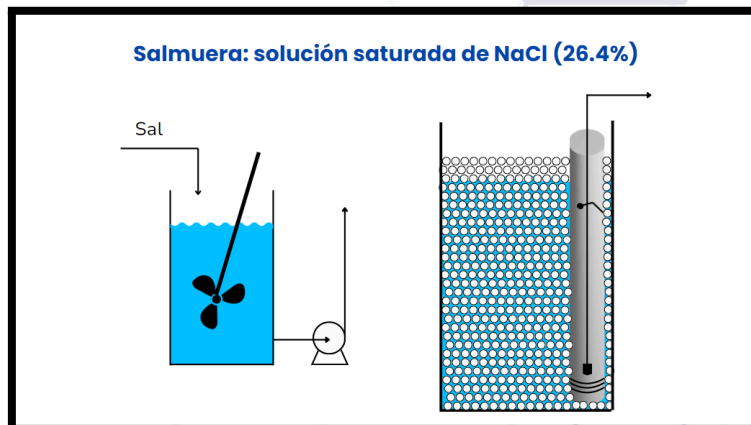
En el ámbito del carbón activado granular, uno de los parámetros de diseño fundamentales es el tiempo de contacto en cama vacía (TCCV). En el ámbito de las resinas de intercambio iónico, en lugar del TCCV se utilizan unidades que corresponden al inverso del TCCV: gpm/ft<sup>3</sup> o BV/h.

El término gpm/ft<sup>3</sup> se refiere al flujo de la solución acuosa, en gpm, que circula por cada ft<sup>3</sup> de resina.

El término BV/h se refiere al número de volúmenes de resina que circulan por unidad de volumen de resina en una hora. Podría decirse: es el flujo, en ft<sup>3</sup>/h que circula por cada ft<sup>3</sup> de resina.



Los suavizadores conformados por recipientes *composite*, válvulas de instalación superior y tanques de polietileno para formar la salmuera aparecieron en el mercado a finales del siglo 20. Son tan prácticos y tienen tantas ventajas competitivas que actualmente son los más usados. De una manera muy simple, automatizan la operación del suavizador.



El tanque que aparece en el lado izquierdo de la imagen representa el tanque que siempre se utilizaba para formar la solución de NaCl requerida para regenerar las resinas suavizadoras hasta antes de finales del siglo 20. Dicha solución debía tener una concentración cercana al 10% (10 g de NaCl por 100 g de solución).

El tanque en el lado derecho de la imagen es el tipo de tanques que más se utilizan actualmente. Cuenta con una tubería por la que llega el agua (desde la válvula de instalación superior) para formar la salmuera y por la que, más adelante, la válvula de instalación superior succiona la salmuera. Esta tubería cuenta con una válvula de flotador al nivel al que debe quedar la salmuera. También cuenta con una pichancho en su parte inferior que impide que la válvula de instalación superior succione aire. La salmuera debe estar saturada una vez que se succiona para regenerar la resina. En la saturación, la salmuera tiene una concentración de 26.4% de NaCl (26.4 g de NaCl por 100 g de solución).

El tanque de instalación superior succiona la salmuera por medio de un vénturi en la que esta se mezcla con agua que funciona como "fluido motriz" (el flujo que provoca la succión). En el vénturi, la mezcla de salmuera y de agua debe dar como resultado una solución con

concentración de NaCl cercana al 10% (que es la concentración requerida para regenerar la resina suavizadora)


El tanque de salmuera siempre debe mantenerse con el nivel de sal por encima del nivel de líquido (agua que se agrega al tanque para formar la salmuera, o salmuera que ya se formó). Por lo tanto, hay que considerar que parte del volumen estará ocupado por sal en pélet o sal en grano y que el resto del volumen será el que puede ocupar el líquido. Si se usa sal en pélet, el porcentaje de espacio que ocupará el líquido es del 40 o 45%. Si se usa sal en grano, el porcentaje de espacio que ocupará el líquido es del 30%.

Si se deja el nivel de sal por debajo del nivel de líquido, la válvula de instalación superior succionará mayor volumen de salmuera del que debería succionar, y el consumo de sal podría aumentar hasta el triple.

## Salmuera

26.4%  
NaCl

1.5 h  
a 20°C



A partir del momento en el que vertemos el agua en la cama de sal, en una hora y media se habrá disuelto la sal hasta llegar al punto de saturación, en el que el porcentaje de NaCl será de 26.4%.

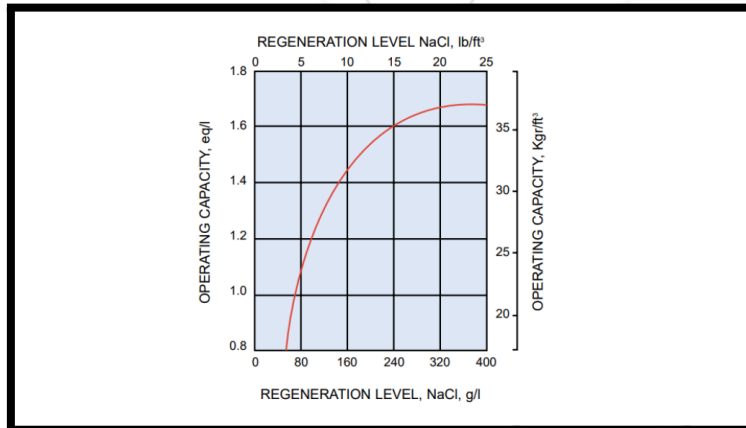
En el tanque de salmuera, la sal que no se disuelve, no pierde dureza. Simplemente se irá haciendo más pequeña conforme baja y llega al fondo del tanque.

## ¿Sal en grano o pélet?

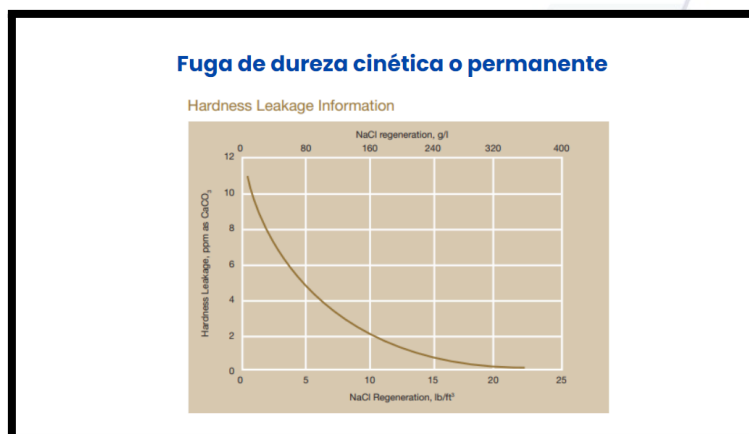


Parámetros de calidad de la sal para regenerar resina de suavizadores

Puede usarse sal en grano o pélet. Las dos funcionan igual de bien. La sal en grano no se vuelve una masa de sal en la parte inferior del tanque, que impida el flujo de la salmuera hacia la tubería por la que la succiona el vénturi de la válvula superior. Lo importante es utilizar una sal de buena pureza. Esto es: de un alto porcentaje de NaCl, un bajo contenido de sales solubles distintas al NaCl y un bajo contenido de compuestos insolubles.



Al dimensionar un suavizador, podemos elegir el “nivel de regeneración” que deseamos. Esto es: la cantidad de sal que utilizaremos para regenerar la resina, medida en lb de NaCl por ft<sup>3</sup> de resina (o en g de NaCl por litros de resina). Podemos observar que no conviene utilizar un nivel de regeneración muy alto (muy a la derecha de la gráfica) ya que mientras más sal utilizamos para regenerar, la recuperación de la capacidad operativa de la resina aumenta en menor proporción en que aumenta la cantidad de sal que utilizamos. En el caso de la gráfica, si dosificamos 20 lb de sal por ft<sup>3</sup> obtendremos la misma capacidad operativa que si dosificamos 25 lb. En la mayoría de las resinas suavizadoras, el mayor nivel de regeneración conveniente es de entre 5 y 10 lb/ft<sup>3</sup>.



Con base en el nivel de regeneración con el que decidamos operar, tendremos una fuga de dureza cinética o permanente. Esta fuga es inevitable. Para el caso de la resina que corresponde a la gráfica de la imagen, si el nivel de regeneración que elegimos es de 10 lb/ft<sup>3</sup>, la fuga permanente de dureza es de 2 ppm como CaCO<sub>3</sub>. Esta fuga no es importante cuando solamente requerimos obtener un agua equilibrada (no incrustante). No obstante, debemos tomarla en cuenta en aplicaciones en las que muy bajos niveles de dureza tienen un efecto indeseable.

## Control de la válvula de instalación superior

Θ V

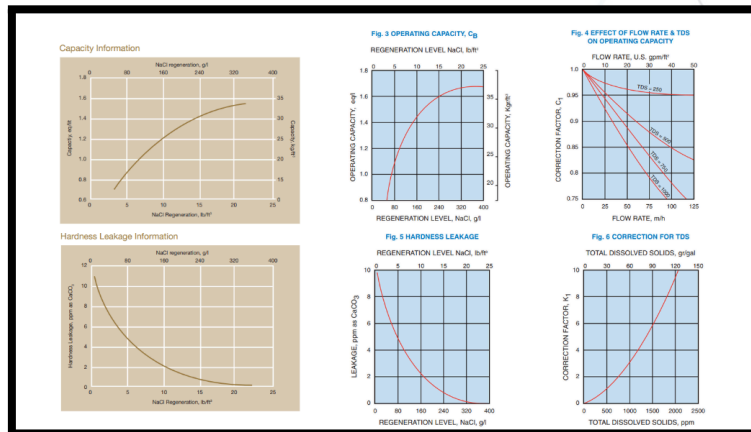
Precio: + 25 - 30%

Mayor aprovechamiento  
de la sal

Hay válvulas de instalación superior que se programan por tiempo (cada cierto número de días) o por volumen de agua suavizada. Las segundas tienen actualmente un precio superior en 25 a 30% respecto a las primeras. No obstante, tienen la ventaja de que aprovechan mejor la capacidad de la resina. Estas válvulas pueden recibir la instrucción de no regenerar en un horario inconveniente para el usuario aun cuando hayan suavizado el volumen de agua programado. En este caso, retardan la regeneración al horario que programa el usuario.



La mayoría de las válvulas regeneran con el flujo de la salmuera en sentido descendente. Sin embargo, las hay que regeneran con el flujo en sentido ascendente. La regeneración en sentido ascendente puede ahorrar alrededor del 5% de sal. Esto se debe a dos razones: (1) La salmuera no se diluye con el agua que hay en la parte superior del suavizador (por encima de la cama de resina); y (2) El calcio y el magnesio que se desprenden de la resina que se está regenerando, fluyen hacia la parte superior de la cama, en la que la resina está saturada y no los retiene.



Hay resinas suavizadoras que brindan información más detallada que otras. Por ejemplo, en la imagen anterior, lo que se resuelve con las dos gráficas en fondo rosa que corresponden a una marca y tipo de resina, se resuelve con las cuatro gráficas en fondo azul que corresponden a otra marca y tipo de resina. Esto no forzosamente significa que la resina que aporta información más detallada sea la mejor para todos los casos. Por otro lado, en cuanto a quienes diseñamos el suavizador, no debemos asustarnos o ponernos tensos al ver tanta información. Las fichas técnicas o los documentos que genera cada fabricante nos guían para utilizar la información que publican. De hecho, las unidades y los parámetros reportados permiten deducir (por sus unidades) cómo utilizarlos para diseñar el suavizador. En caso de duda, con gusto lo auxiliamos en Carbotecnia.

## EJEMPLO DE CÁLCULO DE COSTO DE SUAVIZACIÓN DE AGUA POR CONCEPTO DE CONSUMO DE SAL, DETERMINACIÓN DEL TIPO DE SUAVIZADOR RECOMENDADO Y DIMENSIONAMIENTO DEL MISMO

### Caso de estudio

Cierto usuario cuenta con un pozo profundo (nivel estático mayor a 50 m). El agua presenta las siguientes características:

DQO < 2 mg/L.

SST = 5 mg/L.

Dureza total = 700 mg/L como  $\text{CaCO}_3$

SDT = 1450 mg/L

pH = 7.6

Alcalinidad total = 155 mg/L como  $\text{CaCO}_3$

Temperatura típica del agua = 20°C.

El agua se clora previo a almacenarse en una cisterna de 100,000 L.

Parte de esta agua se requiere para alimentar a un equipo que operará 24 horas por día y 7 días por semana. No se cuenta con tanques de balance ni espacio. El usuario solicita que el agua esté equilibrada (que no tenga tendencia incrustante ni corrosiva).

El flujo instantáneo de alimentación al equipo es de 70 gpm.

Si el agua es incrustante, el usuario no desea dosificar un ácido para corregirla, sino un suavizador.

Si se requiere de un suavizador el usuario no quiere que se contemple un sobrediseño para su dimensionamiento.

### Abordaje

Flujo instantáneo de diseño = 70 gpm (sin sobrediseño que en muchos casos es del 10%).

Determinamos con la calculadora de Lenntech el Índice de Langelier a 20°C, y encontramos que es de 0.74. Corresponde a un agua bastante incrustante.

## Calculadora del Índice de Saturación Langelier

Esta calculadora le ayudará a calcular el potencial de incrustación de su agua usando el Índice de Saturación de Langelier

Introduzca los valores de su análisis de agua. Todos los campos con \* son requeridos.

Si no posee un análisis de agua puede usar los siguientes valores de la Tabla 2. Seleccione una de las opciones en la parte baja de la Tabla 2.

Tabla 1: Introducción de datos

pH	<input type="text" value="7.6"/>	
Conductividad en SDT	<input type="text" value="1450"/>	mg/L
[Ca <sup>2+</sup> ]	<input type="text" value="700"/>	mg/L
[HCO <sub>3</sub> ]	<input type="text" value="155"/>	mg/L
Temperatura agua	<input type="text" value="20"/>	grados °C

Tabla 2: Datos adicionales

pH =	7.7	8	8.6	
SDT =	20	34483	273	mg/l
[Ca <sup>2+</sup> ]	5	400	49	mg/l
[HCO <sub>3</sub> ]	10	140	121	mg/l
T =	20	20	20	grados °C
	<input type="button" value="Ejemplo"/>	<input type="button" value="Agua de mar"/>	<input type="button" value="Agua de grifo"/>	

Tabla 3: Resultados del Índice de Saturación Langelier

pH <sub>s</sub>	<input type="text" value="6.9"/>
ISL	<input type="text" value="0.74"/>
Indicación basada en Langelier (1936)	Water is supersaturated with respect to calcium carbonate (CaCO <sub>3</sub> ) and scale forming may occur.
Indicación basada en Langelier mejorado por Carrier (1965)	Scale forming but non corrosive.

ISL (Carrier)	Indicación
-2,0<ISL<-0,5	Corrosión severa
-0,5<ISL<0	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones
ISL = 0,0	Equilibrada pero posible corrosión leve
0,0<ISL<0,5	Formación leve de incrustaciones y corrosiva
0,5<ISL<2	Formación de incrustaciones pero no corrosiva

Si disminuimos la dureza del agua hasta un valor de 140 mg/L, el Índice de Langelier de la misma va a ser el que corresponde a los siguientes parámetros aproximados:

Dureza total = 140 mg/L como CaCO<sub>3</sub>

SDT = 1450 mg/L

pH = 7.6

Alcalinidad total = 155 mg/L como CaCO<sub>3</sub>

Índice de Langelier a 20°C = 0.039.

Es un agua muy equilibrada.

### Determinación del consumo de sal por ciclo de regeneración

Vamos a utilizar una resina marca Resinex, tipo K-8.

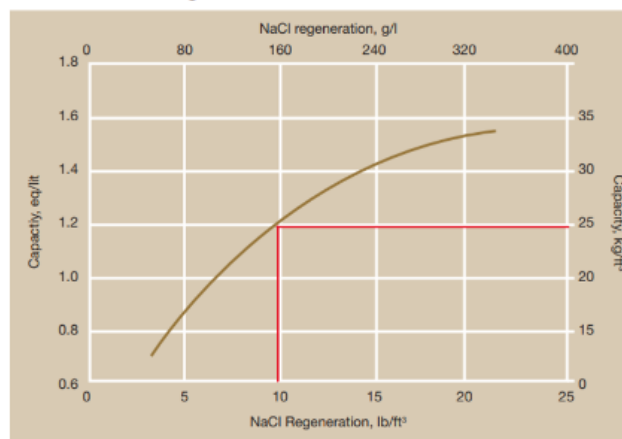
Se conoce como “nivel de regeneración”, el grado de recuperación de la capacidad de intercambio de la resina. Mientras mayor es la cantidad de NaCl utilizada para regenerar, mayor es la capacidad que recupera la resina.

Los fabricantes de resina reportan una gráfica que permite leer el nivel de regeneración logrado.

Podremos observar que la línea de la gráfica tiene una menor pendiente en el lado derecho de la misma. Esto significa que, a altas cantidades de NaCl utilizado, la recuperación de capacidad es menor. Por lo tanto, hay que elegir un punto en el que la pendiente no haya disminuido mucho. Para algunas resinas, este punto corresponde a 5 lb de NaCl aplicado por  $\text{ft}^3$  de resina a regenerar y para otras, este punto llega a estar en alrededor de 10 lb de NaCl.

Para el caso de la resina Resinex K-8, la gráfica de nivel de regeneración es la siguiente:

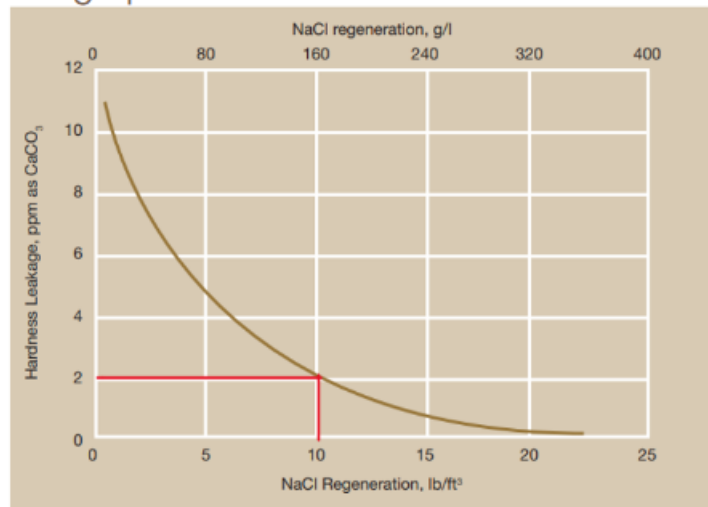
Nivel de regeneración:



Podemos decir que el máximo nivel de regeneración al que la pendiente de la curva no ha caído demasiado es de alrededor de 10 lb de NaCl por  $\text{ft}^3$ . Entonces, elegiremos dicho punto, que corresponde a una capacidad de 25  $\text{kg}/\text{ft}^3$ .

La fuga permanente o cinética de dureza para este nivel de regeneración se lee en la siguiente gráfica de la FT:

## Fuga permanente o cinética de dureza:



El valor que leemos es de 2 mg/L como CaCO<sub>3</sub>.

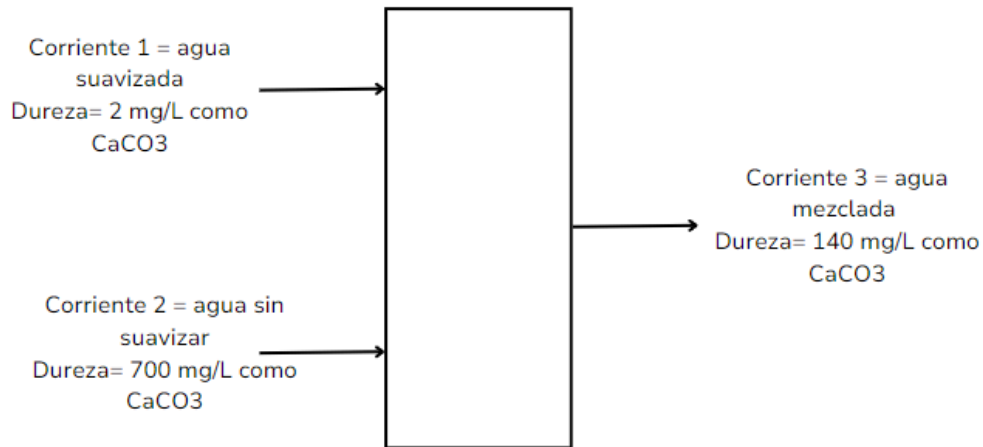
Si hubiéramos optado por suavizar toda el agua habríamos obtenido un agua severamente corrosiva:

Tabla 3: Resultados del Índice de Saturación Langelier

pH <sub>s</sub>	9.4
ISL	-1.8
Indicación basada en Langelier (1936)	Water is undersaturated with respect to calcium carbonate. Undersaturated water has a tendency to
Indicación basada en Langelier mejorado por Carrier (1965)	Serious corrosion.

ISL (Carrier)	Indicación
-2,0 < ISL < -0,5	Corrosión severa
-0,5 < ISL < 0	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones
ISL = 0,0	Equilibrada pero posible corrosión leve
0,0 < ISL < 0,5	Formación leve de incrustaciones y corrosiva
0,5 < ISL < 2	Formación de incrustaciones pero no corrosiva

Ya que queremos obtener un agua con una dureza de 140 mg/L como CaCO<sub>3</sub>, mediante un balance de materia, calculamos el porcentaje de agua que hay que suavizar y el que no es necesario suavizar:



Ya que el agua es un fluido incompresible, un balance de masa equivale a un balance de flujo volumétrico:

$$V_3 = 70 \text{ gpm}$$

$$V_1 + V_2 = 70 \text{ gpm}$$

Balance de dureza:

$$2V_1 + 700 V_2 = 140(70) = 9800$$

$$2(70 - V_2) + 700 V_2 = 9800$$

$$V_2 = \frac{9800 - 140}{698} = 13.84$$

$$V_1 = 70 - 13.84 = 56.16$$

Por lo tanto, el agua que se requiere suavizar es 56.16 gpm.

El fabricante de esta resina publica en la ficha técnica la siguiente tabla que permite definir parámetros de diseño:

#### Standard Design Conditions

Bed depth	> 700 mm
Service flow rate	2-5 gpm/ft <sup>3</sup>
Backwash expansion	50 - 75%
NaCl concentration for regeneration	8-15%
Regeneration level	80-300 g/l
NaCl flow rate for regeneration	0.25-0.50 gpm/ft <sup>3</sup>
Rinse rate (slow)	1-3 bed volumes at regeneration flow rate
Rinse rate (fast)	3-6 bed volumes at service flow rate
Turbidity	<5.0 NTU
Free chlorine	<1.0 ppm

El flujo de servicio que señala la tabla es de entre 2 y 5 gpm/ft<sup>3</sup>.

Si elegimos un valor intermedio, el flujo de servicio sería de 3.5 gpm/ft<sup>3</sup>, y el volumen de resina requerido sería de:

$$\text{Volumen mínimo de resina} = 56.16 \text{ gpm} * \frac{\text{ft}^3}{3.5 \text{ gpm}} = 16 \text{ ft}^3$$

Hay recipientes con capacidad de 15 y de 20 ft<sup>3</sup> de resina. Estamos en un punto cercano a 15. Ya que habíamos elegido un flujo de servicio intermedio (respecto al rango recomendado), podemos ajustar dicho flujo para que el volumen de resina adecuado sea de 15 ft<sup>3</sup>:

$$\text{Flujo de servicio} = \frac{56.16 \text{ gpm}}{15 \text{ ft}^3} = 3.74 \text{ gpm/ft}^3$$

$$\text{Este volumen de resina retendría} = 25000 \frac{\text{gr}}{\text{ft}^3} * 15 \text{ ft}^3 = 375000 \text{ gr}$$

La dureza del agua, en unidades de gr/gal es:

$$\text{Dureza total} = 700 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ (como CaCO}_3\text{)} * \frac{1 \frac{\text{gr}}{\text{gal}}}{17.1 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} = 40.93 \frac{\text{gr}}{\text{gal}}$$

El volumen de agua que se suaviza en cada ciclo es:

$$\text{Volumen de agua que se suaviza por ciclo} = 375,000 \text{ gr} * \frac{\text{gal}}{40.93 \text{ gr}} = 9,162 \text{ gal}$$

$$\text{Volumen de agua que se suaviza por ciclo} = 34.68 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el consumo de sal es de:

$$\text{Consumo de sal por ciclo} = \frac{10 \text{ lb}}{\text{ft}^3} * 15 \text{ ft}^3 = 150 \text{ lb} = 68 \text{ kg}$$

No obstante, se suavizan 34.68 m<sup>3</sup> por ciclo, estos se mezclan con agua cruda en la proporción que calculamos para obtener una mezcla con dureza de 140 mg/L como CaCO<sub>3</sub>.

$$\text{Volumen de la mezcla} = \frac{34.68 \text{ m}^3 * 70 \text{ m}^3}{56.16 \text{ m}^3} = 43.23 \text{ m}^3$$

$$\text{Consumo de sal} = \frac{68 \text{ kg}}{43.23 \text{ m}^3} = 1.5 \text{ kg/m}^3$$

Si el precio de la sal es de alrededor de \$ 12.9 por kg, el costo de suavización por concepto de consumo de sal es de \$ 19.35 por m<sup>3</sup>.

Recomendamos siempre empezar por calcular el costo de suavización por consumo de sal ya que hay proyectos (no es este caso) que no se justifican por dicho costo (que resulta muy alto). Piensen que suavizar les costara por consumo de sal \$ 100 por m<sup>3</sup> (quizás resulta más conveniente perforar otro pozo, comprar pipas o buscar otra solución).

## Determinar el tipo de suavizador

Es importante conocer el tiempo que durará cada ciclo, ya que se requieren 2 h para que la sal se disuelva y que la salmuera quede lista.

Tiempo del ciclo de regeneración:

$$\text{Tiempo por ciclo} = 9162 \text{ gal} * \frac{\text{min}}{56.16 \text{ gal}} = 163 = 2 \text{ h } 43 \text{ min}$$

Este tiempo es suficiente (mayor a 2 h). Sin embargo, hay que recordar que se dijo que el equipo requiere operar 24 h/día y 7 días/semana. Hay dos opciones:

1. Tener un suavizador sobrado en capacidad, que vaya llenando un tanque de agua suavizada con volumen suficiente para parar el suavizador 2 h cuando requiere regenerarse.
2. Tener un twin alternado.

En el primer caso, se puede regenerar por tiempo o por volumen suavizado. En general, es mejor regenerar por volumen ya que se asegura el aprovechamiento de la sal, que es el principal costo operativo.

En este caso, elegiremos diseñar un twin alternado, que no requiere de un tanque. Por lo tanto, requerimos que el tiempo de duración del ciclo sea mayor a 4 h.

Si queremos que el ciclo dure 4 h, el volumen de resina por recipiente debe ser de:

$$\frac{15 \text{ ft}^3 * 240 \text{ min}}{163 \text{ min}} = 22 \text{ ft}^3$$

Podemos ver si instalamos 22 ft<sup>3</sup> de resina en recipientes de 20 ft<sup>3</sup> o si nos vamos a recipientes para 30 ft<sup>3</sup>.

Decidimos elegir un twin alternado con recipientes con 20 a 30 ft<sup>3</sup>.

## Dimensionamiento

Considerando los recipientes disponibles en el mercado el dimensionamiento que haremos es con un recipiente 42"x72" twin cargado con 30 ft<sup>3</sup>. Esto con el objetivo de que el tiempo entre cada ciclo sea mayor y no estar en el límite.

Con esto el diseño quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Flujo de servicio} = \frac{56.16 \text{ gpm}}{30 \text{ ft}^3} = 1.87 \text{ gpm/ft}^3$$

- La velocidad de flujo puede ser menor al parámetro que se especifica en la FT.

$$\text{Este volumen de resina retendría} = 25000 \frac{\text{gr}}{\text{ft}^3} * 30 \text{ ft}^3 = 750,000 \text{ gr}$$

El volumen de agua que se suaviza en cada ciclo es:

$$\text{Volumen de agua que se suaviza por ciclo} = 750,000 \text{ gr} * \frac{\text{gal}}{40.93 \text{ gr}} = 18,924 \text{ gal}$$

$$\text{Tiempo por ciclo} = 18,924 \text{ gal} * \frac{\text{min}}{56.16 \text{ gal}} = 326.28 = 5.44 \text{ h}$$

- El tiempo es suficiente para la formación de salmuera.

$$\text{Volumen de agua que se suaviza por ciclo} = 71.64 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el consumo de sal es de:

$$\text{Consumo de sal por ciclo} = \frac{10 \text{ lb}}{\text{ft}^3} * 30 \text{ ft}^3 = 300 \text{ lb} = 136 \text{ kg}$$

No obstante, se suavizan 34.68 m<sup>3</sup> por ciclo, estos se mezclan con agua cruda en la proporción que calculamos para obtener una mezcla con dureza de 140 mg/L como CaCO<sub>3</sub>.

$$\text{Volumen de la mezcla} = \frac{71.64 \text{ m}^3 * 70 \text{ m}^3}{56.16 \text{ m}^3} = 89.29 \text{ m}^3$$

$$\text{Consumo de sal} = \frac{136 \text{ kg}}{89.29 \text{ m}^3} = 1.5 \text{ kg/m}^3$$

Como habíamos determinado anteriormente el costo de suavización por concepto de consumo de sal es de \$ 19.35 por m<sup>3</sup>.

### Dimensiones del tanque de salmuera

Es importante determinar el volumen que ocupara la salmuera para determinar el recipiente requerido.

Una salmuera requiere estar saturada, esto se logra cuando el agua no es capaz de disolver más sal. La saturación del agua se logra con un porcentaje de sal del 26.4%. Para determinar el volumen también requerimos la densidad de la salmuera, que es de 1.2 kg/L.

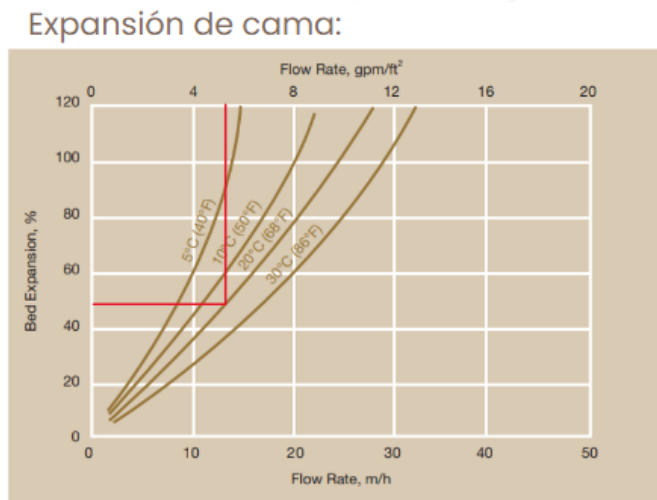
$$\text{Volumen de salmuera} = 136 \text{ kg} * \frac{100 \text{ kg salmuera}}{26.4 \text{ kg NaCl}} * \frac{\text{L}}{1.2 \text{ kg}} = 429.3 \text{ L de salmuera}$$

La sal en pélet tiene una porosidad del 40% por lo que hay que considerar un volumen mínimo del tanque de:

$$\text{Volumen del tanque de salmuera} = 429.3 \text{ L de salmuera} * \frac{100 \text{ L del tanque}}{40 \text{ L de salmuera}} = 1073.25 \text{ L}$$

### Retrolavado del suavizador 42"x72"

La carga hidráulica de retrolavado se lee en la siguiente gráfica de la FT:



La carga hidráulica de retrolavado es de 5.5 gpm/ft<sup>2</sup>, considerando una expansión de cama del 50% a una temperatura de 20°C.

$$A_T = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (3.5)^2}{4} = 9.62 \text{ ft}^2$$

$$\text{Flujo de retrolavado} = 5.5 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2} * 9.62 \text{ ft}^2 = 52.92 \text{ gpm}$$