

**CARACTERIZACION DEL AGUA RECIRCULADA Y OPTIMIZACIÓN DE LA  
DOSIFICACIÓN DE LECHADA DE CAL EN EL AGUA RESIDUAL DEL INGENIO  
RISARALDA S.A.**

**PRISCILA GARCÍA ROMO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
PEREIRA  
2010**

**CARACTERIZACION DEL AGUA RECIRCULADA Y OPTIMIZACIÓN DE LA  
DOSIFICACIÓN DE LECHADA DE CAL EN EL AGUA RESIDUAL DEL INGENIO  
RISARALDA S.A.**

**PRISCILA GARCÍA ROMO**

**PROYECTO DE GRADO, REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
TECNÓLOGA QUÍMICA**

**DIRECTORA: NORMA PATRICIA DURÁN**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
PEREIRA  
2010**

## TABLA DE CONTENIDO

1. JUSTIFICACION .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
3. OBJETIVOS .....	4
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
4. MARCO DE REFERENCIA .....	5
4.1 DEFINICION Y CARACTERISTICAS.....	5
4.2 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA Y SU EFECTO EN LA RATA DE CORROSIVIDAD.....	6
4.2.1 Turbiedad.....	6
4.2.2 Conductividad. ....	7
4.2.3 Oxigeno Disuelto. ....	8
4.2.4. pH.....	10
4.2.5 Temperatura.....	12
4.2.6 Alcalinidad. ....	13
4.2.7 Acidez.....	14
4.2.8 Dureza .....	15
4.2.9 Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Disueltos Totales .....	17
4.3 AGUAS INDUSTRIALES .....	18
La calidad del agua de muchos ríos del mundo se está deteriorando y está afectando negativamente al medio ambiente acuático por los vertidos industriales de metales pesados, sustancias químicas o materia orgánica .....	18
4.3.1 Problemas que se presentan en sistemas de enfriamiento .....	20

4.4 CORRECCIÓN DE PH O NEUTRALIZACIÓN AL AGUA .....	26
4.5 ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER (LSI) O ÍNDICE DE SATURACIÓN DE CARBONATO DE CALCIO (SI) .....	33
4.5.1 Limitaciones del método. La precipitación de aguas sobresaturadas pueden ser inhibidas por fosfatos particularmente polifosfatos, acrilatos estos agentes pueden actuar como secuestrantes del carbonato de calcio.....	34
5. METODOLOGIA.....	40
5.1 RECOLECCION DE MUESTRAS.....	40
5.2 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN .....	40
5.3 DOSIFICACION DE LECHADA DE CAL PARA AMBOS CICLOS .....	42
6. RESULTADOS Y DISCUSION .....	45
6.1 ANALISIS DEL OBJETIVO 1 .....	45
6.2 ANALISIS DEL OBJETIVO 2 .....	51
6.3 ANALISIS DEL OBJETIVO 3 .....	55
7. ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA.....	56
7.1 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SATURACIÓN DEL CARBONATO DE CALCIO COMO INDICADOR DE CORROSIVIDAD PARA LAS AGUAS RESIDUALES.....	56
7.2 ANALISIS DEL IMPACTO DE UN CICLO ADICIONAL A CADA SISTEMA DE AGUA RESIDUAL (LAVADO DE CAÑA Y CICLO DE ENFRIAMIENTO) .....	64
8. CONCLUSIONES.....	68
9. RECOMENDACIONES.....	70
10. BIBLIOGRAFIA .....	71

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Molécula de agua en 3D. ....	5
Figura 2. Principio de medida para los rayos dispersados por una partícula. ....	6
Figura 3. Esquema interior de un electrodo para Oxígeno Disuelto .....	10
Figura 4. Efecto de procesos metabólicos en la alcalinidad .....	13
Figura 5. Estructuras de la calcita y aragonita .....	28

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Conductividad del agua según su naturaleza. ....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2. Calidad del agua para la vida acuática en función de la concentración de oxígeno disuelto.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 3. Calidad de agua en función de su contenido de alcalinidad.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4. Clasificación del agua según su grado de dureza. ....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 5. Valores característicos de la ceniza del bagazo. ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 6. Características de la calcita y aragonita. ....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 7. Tiempo de sedimentación para una mezcla de agua-cal variable.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 8. Parámetros para diseñar un sistema de neutralización. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 9. Clasificación del índice de langelier según su valor.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 10. Clasificación del índice de langelier por Carrier. ....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 11. Clasificación del índice de incrustación/corrosividad en función del índice de estabilidad de Ryznar.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 12. Clasificación de la corrosividad en función del índice de Riddick.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 13. Estimación de las constantes de equilibrio y los coeficientes de actividad .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 14. Valores precalculados para el <math>pK_2</math>, <math>pK_s</math> y <math>A</math> de temperaturas seleccionadas. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 15. Relación de Concentración masa y Grados Baumé de una lechada de cal.....</i>	<i>42</i>

<i>Tabla 16. Relación de la concentración masa de una lechada de cal en función de su grado baumé (°Bé).....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 17. Valores condensados de la caracterización del afluente del lavado de caña.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 18. Valores condensados de la caracterización del efluente del lavado de caña.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 19. Valores condensados de la caracterización del afluente del ciclo de enfriamiento.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 21. Dosificación óptima para cada ciclo según la densidad de la lechada de cal en grados baumé (°Bé) .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 22. Dosificación de lechada de cal 11° °Baumé para el ciclo lavado de caña en función de la altura del caudal .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 23. Dosificación de lechada de cal 11° °Baumé para el ciclo enfriamiento en función de las bombas trabajando.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 24. Caracterización fisicoquímica después de realizar una dosificación óptima de lechada de cal al ciclo lavado de caña.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 25. Caracterización fisicoquímica después de realizar una dosificación óptima de lechada de cal al ciclo de enfriamiento. ....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 26. Comparación del índice de corrosividad del langelier para cada sistema al trabajar con sólidos disueltos totales o la conductividad.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 27. Comparación del índice de corrosividad antes y después de una dosificación óptima de lechada de cal. ....</i>	<i>62</i>

*Tabla 29. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del agua lavado de caña antes y después de la mezcla con agua de piletas. .... 66*

## TABLA DE GRAFICOS

Gráfico 1. Efecto del oxígeno disuelto en la tasa de corrosión.....	9
Gráfico 2. Efecto el pH en la tasa de corrosión. ....	11
Gráfica 3. Efecto de la temperatura en la tasa de corrosión. La tasa de corrosión se dobla aproximadamente cada 40-50F de aumento de temperatura.....	12
Gráfica 4. Correspondencia de grados baumé con la concentración masa de las lechadas de cal. ....	43
Gráfica 5. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente del lavado de caña. ....	47
Gráfico 6. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente del ciclo de enfriamiento. ....	50
Gráfico 7. Comportamiento de cada sistema de agua residual según la dosificación óptima en función de la densidad de lechada de cal.....	52
Gráfico 8. Modelo del gráfico de control para el índice de saturación de Langelier. .....	63
Gráfico 9. Comportamiento del índice de corrosividad en el año 2009 para ambos ciclos de aguas residuales.....	63
Grafico10. Impacto de la mezcla del agua cruda en el agua de enfriamiento .....	65
Grafico 11. Impacto de la mezcla de agua de pileta con agua de lavado de caña.	67

## TABLA DE ANEXOS

ANEXO A. TABLA DE DOSIFICACION VS DENSIDAD RELATIVA DE LA LECHADA DE CAL (°BAUME) PARA UN VOLUMEN DE 500mL.....	74
ANEXO B.DATOS CARACTERIZACION LAVADO DE CAÑA ..... (AFLUENTE- SALIDA DEL CLARIFICADOR) .....	75
ANEXO C.DATOS CARACTERIZACION LAVADO DE CAÑA ..... (EFLUENTE- FOSO RESIDUALES A CLARIFICADOR) .....	76
ANEXO D. DATOS CARACTERIZACION CICLO ENFRIAMIENTO ..... (AFLUENTE-FOSO PLANTA DE AGUA) .....	77
ANEXO E.DATOS CARACTERIZACION CICLO ENFRIAMIENTO ..... (EFLUENTE- FOSO ENFRIAMIENTO RESIDUALES) .....	78
ANEXO F. TABLAS DE TITULACIÓN DE LECHADA DE CAL HASTA PH (6.9-7.5) AL AGUA DEL CICLO LAVADO DE CAÑA.....	79
ANEXO G. TABLAS DE TITULACIÓN DE LECHADA DE CAL HASTA PH (6.9-7.5) AL AGUA DEL CICLO DE ENFRIAMIENTO .....	82
ANEXO H.INDICE DE CORROSIVIDAD PARA AMBOS CICLOS EN EL AÑO 2009	85
ANEXO I.DIAGRAMA DEL CICLO LAVADO DE CAÑA .....	86
ANEXO J.DIAGRAMA DEL CICLO DE PILETAS .....	88
ANEXO K.DIAGRAMA DEL CICLO DE ENFRIAMIENTO .....	89
ANEXO L.MANUAL DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.....	90

## 1. JUSTIFICACION

Es claro que los procesos de transformación física o química apuntados hacia la producción de elementos que sirven al hombre, conllevan a un deterioro, desgaste o contaminación del recurso empleado.

El consumo de agua juega un papel importante dentro de la empresa como para la naturaleza, porque es un medio indispensable para la producción de azúcar y su constante obtención del río genera un impacto sobre el ambiente. Debido a esto la recirculación de agua es una salida ecológica que el Ingenio Risaralda adopta, permitiendo la solución de problemas de tipo económico.

Generalmente, las aguas industriales que son recirculadas tienen características que son importantes mejorar antes de volver a ser reutilizadas, por ejemplo, el agua utilizada en el ciclo de lavado de caña, acarrea trazas de azúcar y tierra, además de mezclarse con el agua que se utiliza para recoger sobre húmedo las cenizas obtenidas en las calderas después de la quema de bagazo, es por ello, que el agua final, mezcla de estas dos, contiene muchos sólidos suspendidos y su pH se ve afectado, pocos esfuerzos se han hecho para mejorar la naturaleza de este, porque la dosificación de un corrector de pH como la cal no está establecida, y solo agregan cantidades de manera intermitente sin tener en cuenta dosis óptimas que lleven al pH deseado.

Por otro lado existe un ciclo de agua el cual se utiliza para los tachos en el área de elaboración, esta agua genera presión de vacío, y sale con una alta temperatura, además de trazas de azúcar arrastradas de estos equipos, esta agua es llevada a una piscina de enfriamiento y posteriormente a unos lagos; el agua no posee ningún tratamiento químico antes de ser recirculada, y se ha encontrado que después de salir de los lagos el pH de esta es de alrededor 4-5, trayendo problemas de corrosión ácida a las tuberías de acero al carbono por las que se transporta.

En ambos casos el mayor problema es la corrosividad del agua que provoca cambios en las tuberías en cuestión de meses, entonces es importante evaluar y establecer una dosificación óptima de lechada de cal para ambos ciclos de agua recirculada, porque generará menos pérdidas económicas al evitar la corrosión ácida, así como también, caracterizar variables físico-químicas e implementar elementos que permitan mejorar la calidad del agua utilizada.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los ingenios de azúcar están localizados generalmente en las áreas rurales, debido a sus características especiales, como necesidad de mucha agua, facilidades de recirculación, almacenamiento y disposición final del agua del proceso; la industria azucarera es del tipo húmedo, es decir, necesita de considerables cantidades de agua en sus procesos y operaciones, como tal, su localización más apropiada es cerca a un río.

Este es el caso del Ingenio Risaralda el cual decidió tomar la menor cantidad posible de caudal del Río Mapa, formando ciclos cerrados de agua, ésta después de pasar por un proceso determinado, es tratada para conseguir sus características iniciales y así volver a utilizarla en el mismo proceso, pero realmente lo que se consigue es modificar solo algunos parámetros como disminución de sólidos suspendidos y descenso de temperatura, las demás variables no se tienen en cuenta y por lo tanto estas aguas son consideradas aguas residuales, no solo por no tratarse el resto de parámetros, sino porque también salen de un proceso final.

El ciclo actual de estas aguas esta complejamente interconectado y compuesto inicialmente por: una entrada inicial de un caudal de agua a un foso de succión inicial en la planta de agua, allí hay 4 bombas de succión las cuales llevan un 90% del agua hacia el área de elaboración para generar presión de vacío en los tachos, el 10% restante es llevado por un remanente hacia las calderas para realizar una recolección en húmedo de las cenizas que resultan de la quema de bagazo para la obtención de vapor sobrecalentado, esta agua con cenizas en posteriormente llevada a unas piletas de sedimentación para realizar una recuperación del agua y recoger la ceniza acumulada allí, para otros usos como abono, el agua que se recupera es descargada en el segundo ciclo “lavado de caña- clarificador” que se explicará más adelante.

Continuando con el caudal dirigido a elaboración, este después de cumplir su función, es llevado por medio de un canal hacia el foso de ciclo de enfriamiento, las características de dicha agua son: alta temperatura , trazas de azúcar y tierra, luego por medio de una bomba se lleva a una piscina de enfriamiento, y allí por medio de unas boquillas, el agua es liberada a una presión de 5psi con el objetivo de perder calor, después se la lleva a dos lagos que están comunicados entre si, para sedimentar algunos sólidos y dar tiempo para que la temperatura del agua disminuya, por ultimo esta agua es llevada de nuevo por un canal hacia el foso de succión inicial, a su vez este cauce antes de llegar al foso de succión esta conectado por una compuerta con una derivación del río Mapa para que a ciertas horas o según las necesidades se abra y se mezcle con el agua de los lagos, para

bajar aun más la temperatura del agua, o se aumente el caudal por necesidades de la misma planta. Ver ANEXO K.

El otro ciclo cerrado es el de lavado de caña, comienza con un caudal de agua que se dirige a las mesas de lavado de caña, allí el agua sale a presión por unas flautas para eliminar tierra de la caña que entra a la fabrica, y cae en un canal el cual se dirige hacia un foso de succión; a este mismo canal se descarga el agua recuperada de la piletas de cenizas mezclándose así con el agua del lavado de caña.

En este foso hay una bomba horizontal la cual lleva el agua hacia el clarificador, allí por medio de un brazo mecánico se arrastra toda la tierra, bagazo y ceniza que contiene el agua, los lodos son succionados en el interior y son descargados en unas tolvas; el agua es desbordada hacia el perímetro del clarificador y es recogida en un tanque para ser llevada de nuevo a las mesas de lavado de caña por medio de tuberías. Ver ANEXO I.

Ahora bien, los problemas planteados a partir de estos circuitos son:

- El agua en el ciclo “enfriamiento”, no tiene ningún tipo de tratamiento químico, llevándola a poseer características desagradables, como mal olor, espumas, sólidos en suspensión, pH bajo, entre otros, y a raíz de esto las tuberías han sido afectadas por corrosión acida, generando un costo en el cambio de tubos o reparaciones constantes.
- Para el ciclo de “lavado de caña” aunque hay un tratamiento de sedimentación con el clarificador, esto no es suficiente para eliminar la ceniza y los sólidos suspendidos, también presenta un bajo pH de hasta 4 y por lo tanto se trata de adicionar cal en el foso de succión de manera intermitente pero, en realidad no hay una preparación o dosificación real, así que el pH no se maneja como debería llevando a desgaste de las tuberías.
- Las condiciones del agua de ambos ciclos es indeterminada, porque no se le hace ningún tipo de seguimiento riguroso ni constante, esto trae problemas porque al no saber la calidad del agua que se maneja, se corre riesgo biológico por enfermedades en todo el ciclo ya que los trabajadores entran en contacto con ella, además, hay otras variables como dureza, temperatura y alcalinidad que influyen en incrustaciones o corrosividad en la tubería, y esto también es un inconveniente a tratar.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar el agua recirculada del Ingenio Risaralda S.A. por medio de 10 variables fisicoquímicas y optimizar la dosificación de la lechada de cal para mejorar su calidad, con el propósito de evitar problemas de corrosividad en las tuberías de acero al carbono.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Hacer el análisis físico-químico de las 10 variables obtenidas (turbiedad, conductividad, pH, temperatura, acidez, alcalinidad, dureza, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto) en los caudales de agua de los ciclos Enfriamiento y Lavado de caña.
- Buscar la dosificación óptima de la lechada de cal por medio del equipo de jarras para ambos ciclos.
- Redactar el manual de operación de la planta de aguas residuales del Ingenio Risaralda S.A.

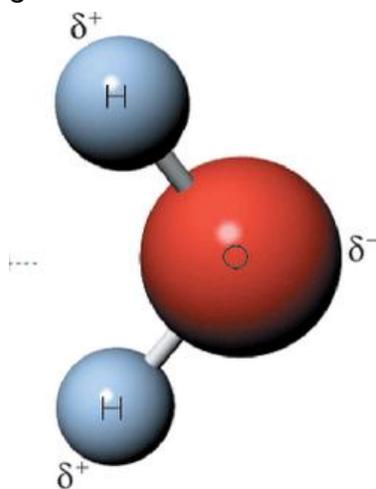
## 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 DEFINICION Y CARACTERISTICAS

El agua (del latín *aqua*) es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno ( $H_2O$ ). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida.

Se estima que aproximadamente el 70% del agua dulce se consume en la agricultura. El agua en la industria absorbe una media del 20% del consumo mundial, empleándose como medio en la refrigeración, el transporte y como disolvente de una gran variedad de sustancias químicas. El consumo doméstico absorbe del orden del 10% restante. [1]

*Figura 1. Molécula de agua en 3D.*



*Fuente. [www.kalipedia.com](http://www.kalipedia.com)*

Las propiedades fisicoquímicas más notables del agua son:

- El agua es insípida e inodora en condiciones normales de presión y temperatura. El color del agua varía según su estado: como líquido, puede parecer incolora en pequeñas cantidades, aunque en el espectrógrafo se prueba que tiene un ligero tono azul verdoso. El hielo también tiende al azul y en estado gaseoso (vapor de agua) es incolora.

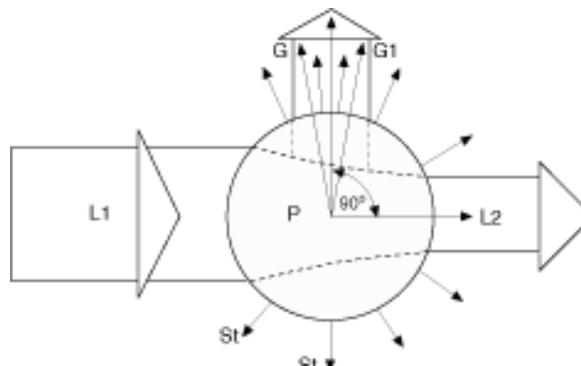
- El agua bloquea sólo ligeramente la radiación solar UV fuerte, permitiendo que las plantas acuáticas absorban su energía.
- El agua es un disolvente muy potente, al que se ha catalogado como el disolvente universal, y afecta a muchos tipos de sustancias distintas. Las sustancias que se mezclan y se disuelven bien en agua -como las sales, azúcares, ácidos, álcalis, y algunos gases (como el oxígeno o el dióxido de carbono, mediante carbonación)- son llamadas *hidrófilas*, mientras que las que no combinan bien con el agua -como lípidos y grasas- se denominan sustancias *hidrofóbicas*.
- El agua pura tiene una conductividad eléctrica relativamente baja, pero ese valor se incrementa significativamente con la disolución de una pequeña cantidad de material iónico, como el cloruro de sodio. [2]

## 4.2 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA Y SU EFECTO EN LA RATA DE CORROSIVIDAD

### 4.2.1 Turbiedad.

4.2.1.1 Fundamento. La turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta.

*Figura 2. Principio de medida para los rayos dispersados por una partícula.*



*Fuente. [www.flotech.com.sg](http://www.flotech.com.sg)*

La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas, y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. Las partículas que imparten

turbiedad al agua constituyen defensas para los microorganismos, ya que estos pueden meterse dentro de ellas para escudarse contra los agentes de desinfección especialmente el cloro.

La unidad de turbiedad, fue definida "como la obstrucción óptica de la luz, causada por una parte por millón de sílice en agua destilada"[3]

La unidad de la turbiedad es 1mg SiO<sub>2</sub>/L H<sub>2</sub>O  
1 unidad nefelométrica de turbiedad (NTU) = 7.5 ppm de SiO<sub>2</sub>

4.2.1.2 Análisis. La muestra debe agitarse y observar que no haya burbujas dentro del dispositivo de vidrio que la contiene, si el equipo no lee la muestra, se debe realizar diluciones y al resultado obtenido multiplicarlo por su factor de dilución correspondiente.

La determinación de turbidez es aplicable a cualquier muestra de agua que esté libre basuras y partículas gruesas que puedan asentarse con rapidez. Se obtienen resultados falsos por material de vidrio sucio, por la presencia de burbujas y por los efectos de vibración que puedan alterar la visibilidad en la superficie de la muestra de agua. [4]

#### 4.2.2 Conductividad.

4.2.2.1 Fundamento. La conductividad es una variable que se controla en muchos sectores, desde la industria química a la agricultura. Esta variable depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es inversamente proporcional a la resistividad del mismo. La unidad de medición utilizada comúnmente es el Siemens/cm (S/cm), con una magnitud de 10 elevado a -6 , es decir microSiemens/cm (µS/cm). [5]

*Tabla 1. Conductividad del agua según su naturaleza.*

<b>Tipo de agua</b>	<b>Conductividad del agua</b>
Agua pura	0.055 µS/cm
Agua destilada	0.5 µS/cm
Agua de montaña	1.0 µS/cm
Agua para uso doméstico	500 a 800 µS/cm
Agua de mar	52 µS/cm

4.2.2.2 Análisis. Con los instrumentos convencionales, la medida de la conductividad se obtiene aplicando un voltaje entre dos electrodos y midiendo la

resistencia de la solución. Las soluciones con conductividad alta producen corrientes más altas.

La temperatura influye en dicho movimiento, por lo que es necesario tomarla en cuenta cuando se realizan mediciones de precisión. Generalmente, para realizar mediciones comparativas, la temperatura de referencia es de 20 °C ó 25 °C. Para corregir los efectos de la temperatura, se utiliza un factor de compensación  $\beta$ . Se expresa en % / °C que varía de acuerdo con la composición de la solución que se está midiendo. En la mayor parte de las aplicaciones, el coeficiente  $\beta$  se fija en 2% / °C. [6]

#### 4.2.3 Oxígeno Disuelto.

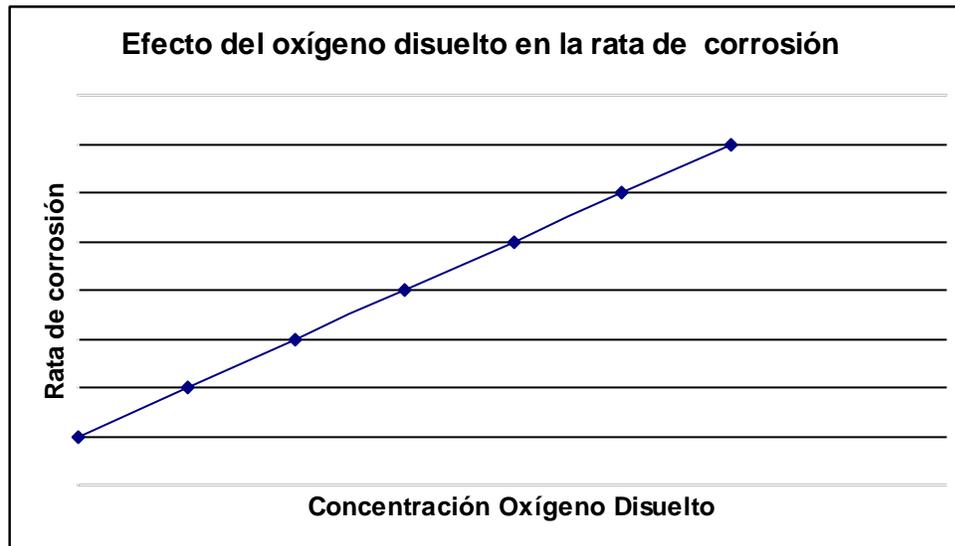
4.2.3.1 Fundamento. Proviene de la mezcla del agua con el aire ocasionada por el viento y también se genera de la fotosíntesis que realizan las plantas acuáticas. La solubilidad del oxígeno es directa con la presión atmosférica e inversamente proporcional con la temperatura y las sales disueltas. A continuación se muestran valores aproximados del oxígeno disuelto apropiado para la vida acuática.

*Tabla 2. Calidad del agua para la vida acuática en función de la concentración de oxígeno disuelto*

<b>Concentración de oxígeno disuelto (mg/L)</b>	<b>Calidad del agua para vida acuática</b>
0.0-4.0	Mala
4.1-7.9	Aceptable
8.0-12.0	Buena

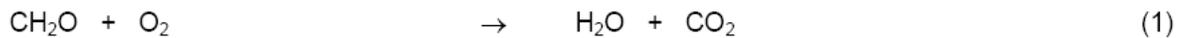
4.2.3.2 Factor corrosivo. El oxígeno disuelto es un factor importante en la tasa de corrosión, ya que este elemento por un lado destruye la capa protectora de hidrógeno (despolariza) y por otro lado, baja la concentración del ion hierro en el agua al formar con ellos compuestos insolubles que precipitan, tal como se observa en el gráfico 1, al existir una proporcionalidad de tasa de corrosión sobre el hierro, en función de la concentración de oxígeno en el medio. El ataque del oxígeno también se agudiza si hay un aumento de la temperatura y disminución del pH.

Gráfico 1. Efecto del oxígeno disuelto en la rata de corrosión.



Si el agua que se maneja es de tipo residual con una gran cantidad de materia orgánica, las bacterias se ven favorecidas, disminuyendo la cantidad de oxígeno disuelto hasta niveles cercanos a cero, y aumentando la acidificación en el medio. [7]

A continuación se describe la secuencia de reacciones bioquímicas que pueden ocurrir en cualquier cuerpo de aguas con alto contenido de materia orgánica:



4.2.3.3. Análisis. Existen dos métodos para medir el oxígeno disuelto en el agua; el método de winkler y el método de medición por electrodo específico, este último método es excelente para analizar el oxígeno disuelto en aguas muy contaminadas, aguas muy coloreadas y efluentes con desechos fuertes, es recomendable usar cuando las condiciones no permiten usar el método de winkler.

Existen dos tipos de sensor:

- Polarográfico: Debe aplicarse un voltaje para realizar la lectura.
- Galvánico: El propio sensor genera un voltaje relacionado con el oxígeno en contacto con la membrana.

El potencial del electrodo se genera por la reducción del oxígeno en una superficie que actúa como cátodo y además como catalizador de la reacción, así:

Cátodo de oro: (reducción)

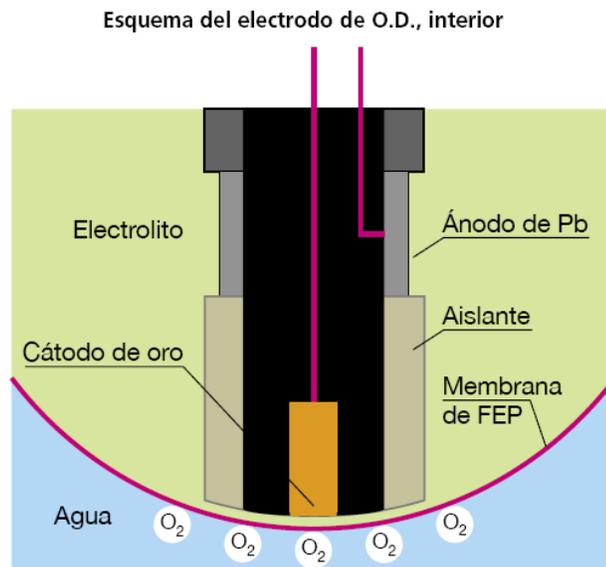


Cátodo de plomo: (oxidación)



El electrodo para medir oxígeno disuelto consume oxígeno de la muestra obtenida y por ello es importante mantenerla en constante movimiento, sino hay movimiento la lectura disminuirá lentamente y si la agitación es excesiva el electrodo puede tomar oxígeno del ambiente generando valores superiores al real. [8]

Figura 3. Esquema interior de un electrodo para Oxígeno Disuelto



Fuente. [www.crison.es](http://www.crison.es)

#### 4.2.4. pH.

4.2.4.1 Fundamento. El pH indica la concentración de iones hidronio [H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>] presentes en determinadas sustancias, es una medida de la tendencia de su acidez o de su alcalinidad.

$$pH = - \log [H^+] \quad (9)$$

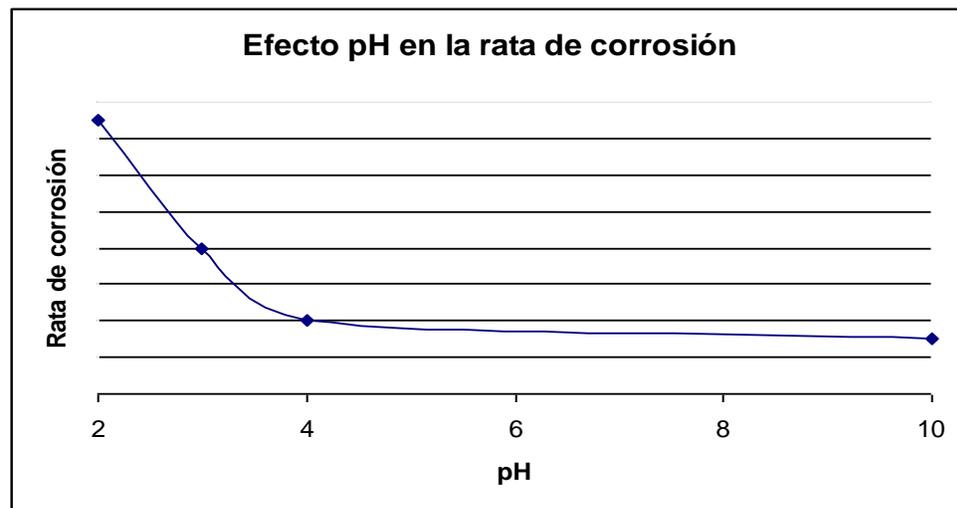
Un pH muy ácido o muy alcalino, puede ser indicio de una contaminación industrial; el valor del pH en el agua, es utilizado también cuando nos interesa conocer su tendencia corrosiva o incrustante, y en las plantas de tratamiento de agua.

4.2.4.2 Factor corrosivo. El pH es la variable que influye en el éxito de tratamientos de aguas residuales como coagulación química, absorción de carbón activado, intercambio de iones, oxidación química, son absolutamente dependientes del rango de pH.

Generalmente, las descargas de aguas residuales requieren de un pH entre 6.5 y 8.5 y muchos de los tratamientos necesitan sostener el pH en un rango mínimo de mas o menos 0.5 unidades de pH. A mas bajo pH, mas acelerado el proceso de corrosión. En aguas de pH muy bajo, la producción de hidrogeno es tan grande que desprende en burbujas, aumentando la velocidad de corrosión.

El control de esta variable es en general difícil de realizar debido a la dependencia altamente no lineal entre los reactivos que ingresan al sistema y el pH que se establece. Esta no linealidad ya aparece en la definición, por la expresión (9), en el siguiente gráfico se puede ver que por debajo de un pH de 4, la lámina de óxido de hierro es continuamente disuelta; pero en el rango de 4-10 la corrosión depende del oxígeno disuelto y es independiente del pH [7]

Gráfico 2. Efecto el pH en la tasa de corrosión.



4.2.4.3. Análisis. Se realiza midiendo el potencial generado (en milivolts ) por un electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión  $H^+$  , este potencial es comparado contra un electrodo de referencia, que genera un potencial constante e independiente del pH.

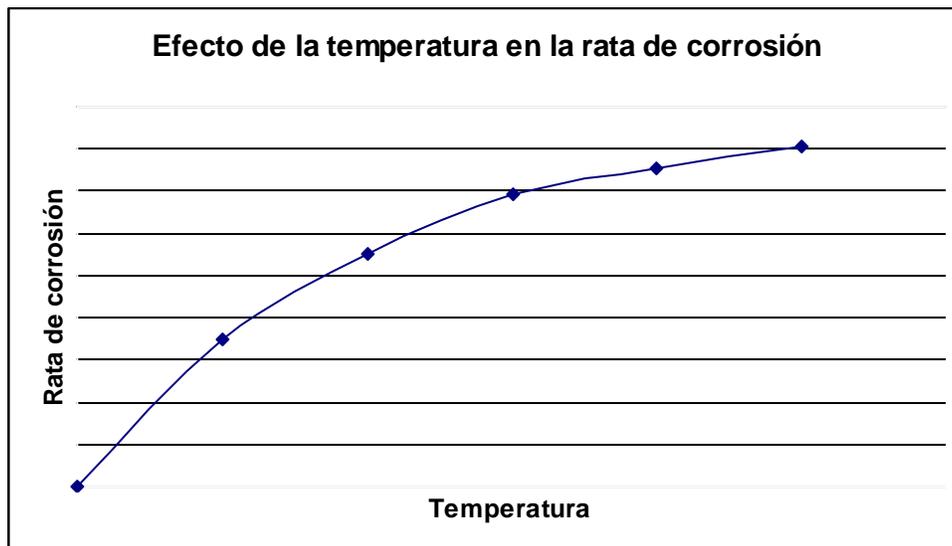
El electrodo de vidrio es relativamente inmune a las interferencias del color, turbidez, material coloidal, cloro libre, oxidantes y reductores. La medición se afecta cuando la superficie de la membrana de vidrio esta sucia con grasa o material orgánico insoluble en agua, que le impide hacer contacto con la muestra, por lo anterior se recomienda la limpieza escrupulosa de los electrodos. [9]

#### 4.2.5 Temperatura.

4.2.5.1 Fundamento. La temperatura del agua tiene gran importancia por el hecho de que los organismos requieren determinadas condiciones para sobrevivir. Este parámetro influye en el comportamiento de otros indicadores de la calidad del recurso hídrico, como el pH, el déficit de oxígeno, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas.

4.2.5.2 Factor corrosivo. La temperatura acelera todas las reacciones químicas, además cambia el punto de balance de todos los carbonatos, por esto la corrosión se acelera en tuberías que transportan agua caliente. [7]

*Gráfica 3. Efecto de la temperatura en la rata de corrosión. La rata de corrosión se dobla aproximadamente cada 40-50F de aumento de temperatura.*



4.2.5.3. Análisis. La medición de este parámetro se realiza a través de un termómetro, aprovechando la propiedad de la dilatación por lo que se prefiere el uso de materiales con elevado coeficiente de dilatación, de modo que, al aumentar la temperatura, su estiramiento es fácilmente visible.

#### 4.2.6 Alcalinidad.

4.2.6.1 Fundamento. Definimos la alcalinidad total como la capacidad del agua para neutralizar ácidos y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas (carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos).

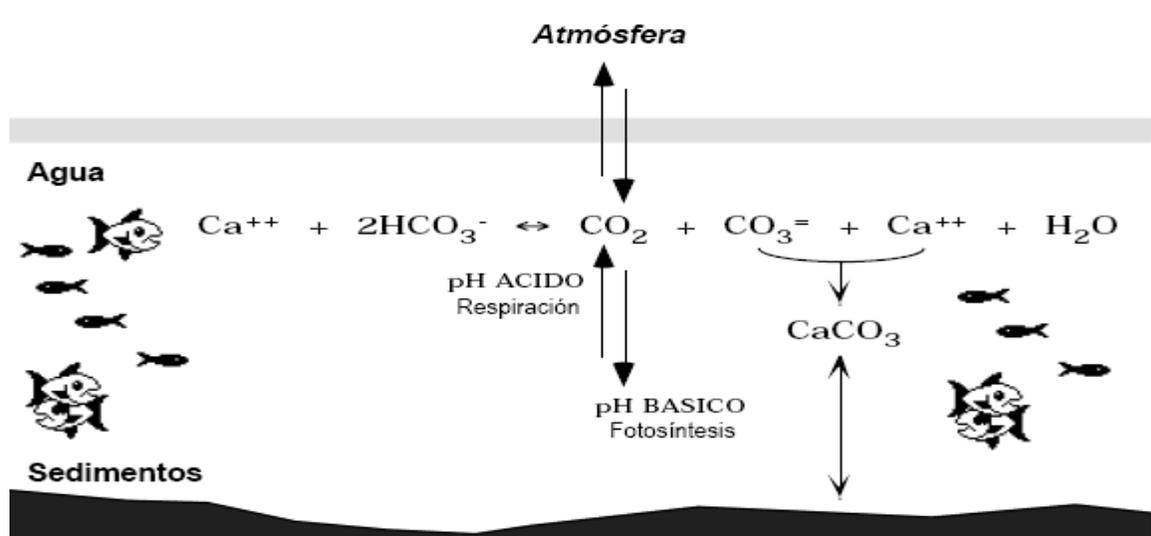
No sólo representa el principal sistema amortiguador (tampón, buffer) del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva de CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis. Según su capacidad amortiguadora se han propuestos diferentes clasificaciones para la calidad del agua, la más aceptada se muestra a continuación: [10]

Tabla 3. Calidad de agua en función de su contenido de alcalinidad.

Calidad agua	Alcalinidad (mg/L)
Minimo aceptable	20
Pobrementemente amortiguada	<25
Moderadamente amortiguada	25-75
Muy amortiguada	>75

Es evidente que las proporciones de las especies iónicas de bióxido de carbono son alteradas significativamente por cambios en pH. A un pH < 6, CO<sub>2</sub> es la especie dominante. A valores de pH entre 7 y 9, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> predomina, mientras que CO<sub>3</sub><sup>=</sup> comienza a aumentar su concentración a valores de pH > 9.

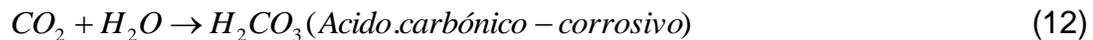
Figura 4. Efecto de procesos metabólicos en la alcalinidad



Fuente. [www.uprm.edu](http://www.uprm.edu)

4.2.6.2. Factor corrosivo. Cuando las aguas tienen alcalinidades inferiores se vuelven muy sensibles a la contaminación, ya que no tienen capacidad para oponerse a las modificaciones que generen disminuciones del pH (acidificación). Si el tratamiento al agua ha sido con zeolitas, la alcalinidad está generalmente en forma de bicarbonatos; si se ha ablandado con cal es casi carbonato puro.

Cuando los carbonatos y bicarbonatos se exponen a las temperaturas altas se rompen liberando CO<sub>2</sub>.



La cantidad de CO<sub>2</sub> es proporcional a la alcalinidad. Cuando la alcalinidad pasa de ciertos límites se precipitan carbonatos, formándose una película que protege la tubería; en cambio si la alcalinidad es inferior a este límite, el agua tiende a disolver carbonatos dejando la superficie de la tubería expuesta a corrosión. [7]

4.2.6.3 Análisis. La alcalinidad se determina por titulación con una solución estándar de un ácido mineral fuerte a los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y el ácido carbónico, existen diferentes formas de expresar la alcalinidad:

- Alcalinidad “M” o total= neutralización del ácido hasta un pH de 4.3.
- Alcalinidad “p” o a la fenolftaleína= neutralización del ácido hasta un pH de 8.3.
- Alcalinidad al “OH”= corresponde a la fracción de OH<sup>-</sup>, se calcula a partir de valores de p y M. (Alk “OH”= 2\*p-M)

Si es agua residual de industria o se sospecha la presencia de silicatos, fosfatos, boratos entre otras bases se recomienda titular hasta 4.5 [10]

#### 4.2.7 Acidez.

4.2.7.1 Fundamento. Capacidad para neutralizar OH<sup>-</sup>, la acidez es debida a la presencia de ácidos minerales, ácidos fuertes, ácidos débiles tales como el humico y fúlvico y los productos de hidrólisis de las sales de metales (como hierro y aluminio) y CO<sub>2</sub> proveniente de la descomposición aerobia y anaerobia de la materia orgánica que al combinarse con el agua produce el ion H<sup>+</sup>.



4.2.7.2 Factor Corrosivo. La acidez en el agua puede estar asociada a la presencia de ácidos débiles tales como el dióxido de carbono, a la presencia de ácidos fuertes como el sulfúrico, clorhídrico y nítrico y a la presencia de sales fuertes que provienen de bases débiles, tales como las de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), hierro III ( $\text{Fe}^{+3}$ ) y aluminio III ( $\text{Al}^{+3}$ ). Aunque la acidez del  $\text{CO}_2$  tiene poca importancia desde el punto de vista de la potabilidad desde el punto de vista industrial es muy importante debido al poder corrosivo de las sustancias ácidas presentes en el agua.

Estas sustancias ácidas presentes en el agua, aumentan su corrosividad e interfieren en la capacidad de reacción de muchas sustancias, alterando el pH del agua y produciendo reacciones secundarias rompiendo el ciclo ecológico, se podría decir que a mayor acidez, mayor capacidad corrosiva. [11]

4.2.7.3. Análisis Se realiza para cuantificar las sustancias ácidas contenidas en una muestra de agua, la forma más frecuente es realizar una titulación con una base fuerte ( $\text{NaOH}$  0.02N), hay dos determinaciones:

- Acidez mineral: viraje de 4.3 con naranja de metilo o azul de bromofenol.
- Acidez carbonácea o total: viraje de 8.3 con fenolftaleína.

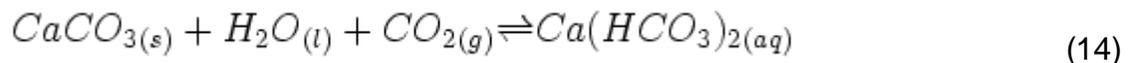
Si la muestra es muy coloreada o turbia se recomienda titular con pH en vez de indicadores, además no remover materia oleosa o sólidos suspendidos porque pueden contribuir con la acidez. [12]

#### 4.2.8 Dureza

4.2.8.1 Fundamento. La dureza del agua indica la cantidad total de iones alcalinotérreos calcio y magnesio presentes en el agua y constituye un parámetro de calidad de las aguas de interés. La dureza del agua tiene una distinción compartida entre dureza temporal (o de carbonatos) y dureza permanente (o de no-carbonatos)

- **Dureza temporal**

La dureza temporal se produce por carbonatos y puede ser eliminada al hervir el agua o por la adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de calcio).



El carbonato de calcio es menos soluble en agua caliente que en agua fría, así que hervir (que contribuye a la formación de carbonato) se precipitará el bicarbonato de calcio fuera de la solución, dejando el agua menos dura.

Los carbonatos pueden precipitar cuando la concentración de ácido carbónico disminuye, con lo que la dureza temporal disminuye, y si el ácido carbónico aumenta puede aumentar la solubilidad de fuentes de carbonatos, como piedras calizas, con lo que la dureza temporal aumenta. Todo esto está en relación con el pH de equilibrio de la calcita y con la alcalinidad de los carbonatos. Este proceso de disolución y precipitación es el que provoca las formaciones de estalagmitas y estalactitas.

- **Dureza permanente**

Esta dureza no puede ser eliminada al hervir el agua, es usualmente causada por la presencia del sulfato de calcio y magnesio y/o cloruros en el agua, que son más solubles mientras sube la temperatura. Puede ser eliminada utilizando el método SODA (Sulfato de Sodio). También es llamada "dureza de no carbonato"

4.2.8.2. Factor corrosivo. Este parámetro no genera corrosividad sino que dependiendo de las concentraciones teóricas el agua genera un efecto de incrustación.

El agua dura deja depósitos sólidos o costras (por ejemplo: carbonato cálcico) en las tuberías pudiendo llegar a obstruirlas. [13]

*Tabla 4. Clasificación del agua según su grado de dureza.*

Concentración dureza	Clasificación agua
0 – 75 mg CaCO <sub>3</sub> /L	agua blanda
75 – 150 mg CaCO <sub>3</sub> /L	agua semi-dura
150 – 300 mg CaCO <sub>3</sub> /L	agua dura
más de 300 mg CaCO <sub>3</sub> /L	agua muy dura

4.2.8.3. Análisis. Se realiza mediante una titulación complexométrica de la siguiente manera:

- **Determinación de la dureza debida al calcio.** El calcio y el magnesio son ambos acomplejados por el EDTA a pH 10; la determinación de la dureza debida únicamente al calcio se hace a pH elevado (12-13), en este rango de pH, el magnesio precipita como Mg(OH)<sub>2</sub> y no interviene en la reacción; además el indicador utilizado para esta determinación solo se combina con el calcio.

El indicador *murexida* se emplea para determinar la dureza debida al  $\text{Ca}^{+2}$ , vira de rojo claro (cuando forma el complejo con el  $\text{Ca}^{+2}$ ) a violeta (cuando está libre).

- **Determinación de la dureza debida al magnesio.** La diferencia entre la dureza total y la dureza cálcica (expresada ambas como mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ), da directamente la dureza magnésica. [14]

#### 4.2.9 Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Disueltos Totales

4.2.9.1 Fundamento. Los sólidos suspendidos son el residuo no filtrable o material no disuelto, son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch previamente pesado. El crisol con su contenido se seca a  $103\text{-}105^\circ\text{C}$ ; el incremento de peso, sobre el inicial, representa el contenido de sólidos suspendidos.

Los sólidos disueltos son el residuo no filtrable (sales y residuos orgánicos), son determinados directamente o por diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos

Un método alternativo y más sencillo para estimar los sólidos disueltos totales es utilizando la medida de conductividad del agua. Se ha encontrado que existe una correlación directa entre conductividad y concentración de sólidos disueltos totales (TDS, por sus siglas en inglés) para cuerpos de agua dulce y salobres.

4.2.9.2 Factor Corrosivo. La determinación de sólidos suspendidos totales es importante para evaluar la concentración o fuerza de aguas residuales y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento. La determinación de sólidos disueltos totales (TDS), en función de la corrosividad se usa para calcular el índice de Langlier, como factor de incrustación o corrosividad del sistema acuoso. Un elevado TDS indica lo siguiente:

La concentración de los iones disueltos puede hacer que el agua sea corrosiva, de sabor salado o salobre o dar lugar a la formación de incrustaciones, e interfieren y disminuyen la eficiencia de las calderas de agua caliente. [15]

Por otro lado, los sólidos suspendidos son estéticamente desagradables, y al sedimentar en forma de lodo en el fondo de un lago o de un río, se convierten en un peligro acuático, ya que este lodo cubre el fondo del lago formando una cama de material el cual destruye la fauna comestible para los peces. Los depósitos que contengan material orgánico, pueden disminuir las reservas de oxígeno y pueden producir gases anóxicos como el sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y metano. [16]

### 4.3 AGUAS INDUSTRIALES

La industria precisa el agua para múltiples aplicaciones, para calentar y para enfriar, para producir vapor de agua o como disolvente, como materia prima o para limpiar. La mayor parte, después de su uso, se elimina devolviéndola nuevamente a la naturaleza. Estos vertidos, a veces se tratan, pero otras veces el agua residual industrial vuelve al ciclo del agua sin tratarla adecuadamente.

La calidad del agua de muchos ríos del mundo se está deteriorando y está afectando negativamente al medio ambiente acuático por los vertidos industriales de metales pesados, sustancias químicas o materia orgánica

De la calidad de agua que se recibe en una planta y de su utilización final, depende los tratamientos a que esta debe someterse, generalmente el agua que entra en una planta tiene uno de los siguientes usos:

- Agua potable: Dependiendo de la contaminación bacteriológica que tenga es o no sometida a cloración.
- Agua contra incendios: Debe ser tratada químicamente para controlar su corrosión y propagación microbiológica.
- Agua para producción de vapor: El agua debe pasar por un pretratamiento (resinas intercambio iónico) y tratamiento químico.
- Agua de enfriamiento: Debe ser tratada químicamente para poder ser aprovechada al máximo y evitar la corrosión e incrustaciones de los metales y aleaciones de que están compuestos los intercambiadores de calor y las redes de distribución por donde circula.
- Aguas Residuales: Todas las aguas utilizadas que van a salir de la planta deben ser tratadas para evitar la contaminación ambiental y estar dentro de los parámetros preestablecidos por la autoridad competente. [17]

Para un ingenio azucarero, las tres principales fuentes de agua residual son:

- (1) agua de lavado de caña.
- (2) agua de condensación de las columnas barométricas.
- (3) agua de lavado de equipo y tuberías, también el agua de ceniza cuando se recogen en húmedo las cenizas de las calderas. La cantidad de desechos líquidos y sus características varían ampliamente, dependiendo de las condiciones locales y de los métodos de operación.

➤ Agua lavado de caña

El agua utilizada en el lavado de caña constituye la mayor fuente de contaminación de un ingenio, aunque puede ser disminuida considerablemente si la recolección se efectúa manualmente, en términos generales, el agua de lavado de caña contiene concentraciones altas de sólidos suspendidos de los cuales una gran cantidad se presenta en forma coloidal o finamente divididos.

Debido al daño que sufre la caña cuando se recolecta por medios mecánicos, el agua de lavado puede contener concentraciones sustanciales de azúcar, por lo que, desde el punto de vista de la DBO, este desecho constituye la mayor fuente de contaminación.

➤ Agua de condensados

El agua de condensados, representa la mayor fuente de contaminación después del agua de lavado de caña, y cuando ésta no se lava, el agua de condensados representa el total de contaminación orgánica del proceso, atribuyéndole esta característica al arrastre de azúcar dentro del evaporador o bien a un control inadecuado. [18]

➤ Agua de ceniza

Los gases emitidos por calderas que utilizan bagazo de caña y otros tipos de biomasa similares deben, obligatoriamente, pasar por una etapa de lavado eficiente para remoción de las partículas sólidas que son arrastradas. La opción de lavado de gases *vía húmeda*, aunque adecuada y de bajo costo, topa en la dificultad de contar con un proceso eficiente de remoción de la ceniza del agua.

El total de ceniza esperado puede ser relacionado directamente a la capacidad de generación de vapor de la caldera. La cantidad de bagazo mal quemado depende de la eficiencia de quema de la caldera, la cual depende del tipo y de las condiciones operacionales del equipo. Calderas más modernas tienden a generar menos bagazo mal quemado. Los sólidos minerales dependen de los procesos de cosecha y transporte de la caña, bien como, de la existencia y de los tipos de sistemas de lavado de la caña en la industria. Con el aumento de la cosecha mecanizada, y la consecuente reducción de la utilización de agua de lavado en la caña, mayor cantidad de esos sólidos viene siendo admitida en las calderas

De forma general, los sólidos residuales comprenden, además de ceniza de bagazo, grande cantidad de material no quemado y residuos minerales oriundos del suelo (arena y arcilla).

Tabla 5. Valores característicos de la ceniza del bagazo.<sup>1</sup>

Constituyente	Composición %
SiO <sub>2</sub>	92.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50
TiO <sub>2</sub>	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27
CaO	0.40
MgO	0.70
Na <sub>2</sub> O	0.01
K <sub>2</sub> O	0.70
SO <sub>3</sub>	0.50
MnO <sub>2</sub>	0.02
Perdidas por ignición	1.09
Total	100.00

La práctica de lanzamiento de estos residuos en el agua de lavado de la caña se ha ido volviendo cada día más inviable. Por un lado, las presiones ambientales para lanzamientos hídricos y, por otro, los costos del agua y los propios requisitos del proceso industrial, viene exigiendo la introducción de sistemas de reciclo de agua independientes y en circuito cerrado.

Aunque la opción de limpieza *vía húmeda*, tanto para la limpieza de gases cuanto para la limpieza de ceniceros, sea considerada la más adecuada con relación a los costos y a la eficiencia, topa en la necesidad de contarse con un proceso efectivo para la remoción de los sólidos del agua y, de esta forma, posibilitar su recirculación. [19]

#### 4.3.1 Problemas que se presentan en sistemas de enfriamiento

4.3.1.1 Crecimiento microbiano. Es uno de los problemas más frecuentes: agua a temperaturas próximas a 35°C, altas concentraciones de O<sub>2</sub>, luz UV, constituyen un microclima adecuado para crecimiento de microorganismos, los cuales a su vez

---

<sup>1</sup> REIN. Peter. Cane Sugar Engineering. Capítulo 27 Generación de vapor p- 620. Tabla 27.2

favorecen la corrosión al absorber o desprender oxígeno, formando depósitos o la generación de hidrógeno gaseoso por reacciones catódicas.

4.3.1.2 Incrustaciones. El agua utilizada para enfriamiento es un agua de origen natural, que se verá sometida a calentamiento, aún cuando sea mucho menor al que se da en un generador de vapor. Por lo tanto, encontraremos formación de incrustaciones, principalmente  $\text{CaCO}_3$  (también  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ).

Es posible estudiar las características particulares del agua que circula por el sistema, para determinar su tendencia a precipitar o disolver depósitos cálcicos.

### **A. Control de Incrustaciones**

El control de depósitos es un aspecto importante en sistema de recirculación de agua, es necesario reconocer el tipo de depósito y su apropiado tratamiento para su control.

Tipos de depósitos:

- I. Mineral: Precipitación de sales cristalinas al excederse sus solubilidades, desafortunadamente las incrustaciones minerales tienen gran tendencia a formarse en las áreas más críticas como las superficies de transferencia de calor.
- II. Carbonato de calcio: Es una sal inversamente soluble con respecto a la temperatura. Entre más aumente la temperatura, el carbonato de calcio tiene una gran tendencia a volverse insoluble y precipitar en las áreas de transferencia de calor.
- III. Sulfato de calcio: Muchos programas de inhibidores de corrosión se basan en zinc y fosfatos, una sobresaturación de algunos de estos 2 inhibidores puede resultar en un problema de depósito.
- IV. Hidróxido de zinc: El zinc puede ser precipitado en la forma de hidróxido, la solubilidad es una función del nivel de zinc, temperatura y pH.
- V. Aluminio: este elemento es normalmente insoluble en su forma de hidróxido. [20]

4.3.1.3 Corrosión. La corrosión ocurre debido a la interacción entre la superficie del material el cual está en contacto con el sistema acuoso, muchas veces bajo condiciones de stress. El stress puede ser químico en el sentido de que el medio acuoso sea ácido o alcalino, este puede ser visto en términos termodinámicos o electroquímicos. El stress puede ser metalúrgico en el sentido de que la superficie del material tenga defectos, el stress también puede ser térmico, como en un sistema de generación de vapor. En realidad, la corrosión puede ser la consecuencia de la combinación de todos los factores de stress mencionados. [21]

## Tipos de corrosión

La mayor problemática de la corrosión es la destrucción del metal al que afecta. Podemos hablar desde fracturas, hasta fugas en tanques, disminución de la resistencia mecánica de las piezas y muchas otras maneras de efectos por los ataques. Aún así, lo peor de todo es que si no son prevenidas estas clases de ataques por corrosión, la seguridad de las personas es algo que se ve permanentemente afectado.

- General o Uniforme

Es aquella corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme producto de la pérdida regular del metal superficial.

### Corrosión por Altas Temperaturas

Algunos metales expuestos a gases oxidantes en condiciones de muy altas temperaturas, pueden reaccionar directamente con ellos sin la necesaria presencia de un electrolito. Este tipo de corrosión es conocida como Empañamiento, Escamamiento o Corrosión por Altas Temperaturas.

Generalmente esta clase de corrosión depende directamente de la temperatura. Actúa de la siguiente manera: al estar expuesto el metal al gas oxidante, se forma una pequeña capa sobre el metal, producto de la combinación entre el metal y el gas en esas condiciones de temperatura. Esta capa o “empañamiento” actúa como un electrolito “sólido”, el que permite que se produzca la corrosión de la pieza metálica mediante el movimiento iónico en la superficie.

- Localizada

La segunda forma de corrosión, en donde la pérdida de metal ocurre en áreas discretas o localizadas.

La corrosión por fisuras es la que se produce en pequeñas cavidades o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no- metálico. En las fisuras, se deposita la solución que facilita la corrosión de la pieza. Se dice, en estos casos, que es una corrosión con ánodo estancado, ya que esa solución, a menos que sea removida, nunca podrá salir de la fisura. Además, esta cavidad se puede generar de forma natural producto de la interacción iónica entre las partes que constituyen la pieza.

## Corrosión por Picadura o “Pitting”

Es altamente localizada, se produce en zonas de baja corrosión generalizada y el proceso (reacción) anódico produce unas pequeñas “picaduras” en el cuerpo que afectan. Ocurre como un proceso de disolución anódica local donde la pérdida de metal es acelerada por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mucho mayor.

## Corrosión por Fricción o Fretting

Es la que se produce por el movimiento relativamente pequeño (como una vibración) de 2 sustancias en contacto, de las que una o ambas son metales. Este movimiento genera una serie de picaduras en la superficie del metal, las que son ocultadas por los productos de la corrosión y sólo son visibles cuando ésta es removida. [22]

### A. Control de corrosión

Una posible solución para controlar la corrosión, sería modificar las características agresivas del agua.

Es frecuente el uso de inhibidores de corrosión, los que actúan protegiendo la superficie del material metálico, cuya acción es la de despolarizar (disminuir o detener el flujo eléctrico) las reacciones de corrosión.

Existen inhibidores anódicos y catódicos, dependiendo sobre cual reacción actúan. En general, los catódicos precipitan sobre el metal formando una barrera protectora al ataque del oxígeno. Los anódicos promueven la formación de óxidos estables del metal, lo que limita la disolución del mismo.

Los controles usados para la corrosión pueden dividirse en 2 grupos:

1. Tratamiento anticorrosivo: como la aplicación de pinturas anticorrosivas y eliminación de CO<sub>2</sub>.
2. Uso de inhibidores  
Anódicos: molibdatos, ortofosfatos, nitritos, silicatos;  
Catódicos: zinc, polifosfatos, fosfonatos.

### B. Uso de inhibidores

Los inhibidores de corrosión se clasifican, según la reacción que controlen como catódicos o anódicos. Atendiendo al mecanismo de actuación pueden reaccionar

con el agente corrosivo, formar una película protectora o propiciar la formación de una película de óxido del propio metal que se intente proteger.

Raramente se usa un inhibidor de la corrosión único; en general se mezclan dos o más inhibidores completando sus ventajas individuales y superando las limitaciones respectivas. Algunas veces se combinan dos inhibidores catódicos, pero muy raramente dos anódicos. Entre los inhibidores más usados se encuentra el hexametáfosfato sódico (Calgén) y el pirofosfato sódico (Nalco).

### Cromatos

Son inhibidores anódicos que forman una película de óxidos férrico y crómico, composición similar a la que se forma en los aceros inoxidable. Los iones cloruro, y en menor medida los iones sulfato, pueden penetrar la barrera; en su presencia es conveniente aumentar la dosificación de cromatos. Actúan mejor en aguas alcalinas

Los tratamientos iniciales con cromatos eran caros porque usaban dosis muy elevadas de 200 a 300 ppm de cromato sódico, combinados con la adición de algo de ácido para mantener el pH entre 6-7 y evitar la precipitación de carbonato cálcico. Se conseguía inhibir con bastante efectividad la corrosión y la formación de incrustaciones, pero había que controlar que el cromato residual no llegase a mínimos para evitar la corrosión por picadura.

La combinación de los cromatos con otros inhibidores, particularmente los catódicos como el zinc y los polifosfatos, permitió reducir la dosificación de cromatos a 20-50ppm con mejores resultados y un mayor margen de seguridad sobre los ataques localizados.

Debido a la presión ambiental que ha proscrito los cromatos, se ha intentado reducir su dosificación a menos de 10 ppm pero existen dificultades para controlar adecuadamente el pH y otros parámetros con la exactitud necesaria.

En los circuitos cerrados el cromato sódico ha sido el inhibidor más empleado para proteger los materiales ferrosos, pero ha ido siendo reemplazado por combinaciones de nitritos e inhibidores orgánicos.

### Zinc

Las sales de zinc han sido muy utilizadas como inhibidores catódicos pero han sido progresivamente sustituidos por su toxicidad. Forman una película protectora muy rápidamente pero que al ser poco estable requiere normalmente una mezcla con otros inhibidores de efecto más duradero. No puede usarse con aguas alcalinas puesto que precipita a pH superior a 8, por lo que se mantiene en 7-8 para conseguir un funcionamiento satisfactorio.

## Poli fosfatos

El polifosfato es un inhibidor catódico que forma películas estables sobre las superficies catiónicas de la mayoría de los metales. Tiene la ventaja adicional de ser un buen estabilizante de depósitos. El polifosfato es una cadena polimérica de fosfatos siendo la forma de hexametáfosfato una de las más estables y utilizadas. El principal problema de los polifosfatos es que a altas temperaturas, o a pH bajo se hidrolizan liberando moléculas simples de ortofosfatos.

El ortofosfato es un inhibidor anódico de menor capacidad protectora y que en ciertas situaciones puede reaccionar con el calcio formando un fango, capaz de acelerar la corrosión por formación de células de oxigenación diferenciada

## Otros agentes

Algunas sales de molibdato son iguales o mejores inhibidores que las sales de cromato. Actúan como inhibidor anódico, formando una película de composición mixta óxidos de hierro-molibdeno. Su impacto ambiental es menor que el del cromo o zinc.

La adición de cal para ajustar la alcalinidad del agua al punto en que el índice de langelier pasa justamente del nivel agresivo a la zona de incrustante, es un método barato que ha sido utilizado en muchos suministros de agua potable, sin embargo no es recomendable su uso con los sistemas de recirculación abierta y vaporización por las implicaciones de la temperatura sobre el efecto agresivo e incrustante.

4.3.1.4 Tratamiento Químico General para aguas de enfriamiento. Las aguas de enfriamiento generalmente pasan por los siguientes tratamientos:

- A. Clarificación
- B. Filtración
- C. Tratamiento químico.

### C-1) Sistemas Cerrados:

Los sistemas de enfriamiento cerrados son aquellos en que las pérdidas de agua son mínimas y su tiempo de residencia puede pasar de los 18 meses. En este tipo de sistemas se utilizan tratamientos en base a cromatos con inhibidores de corrosión y dispersantes.

### C-2) Sistemas de un solo paso:

El agua pasa a través del sistema y es descargada. El programa a utilizar es en base a agentes clarificantes y dispersantes orgánicos. Si el agua es

extremadamente corrosiva debe utilizarse en forma continua un inhibidor de corrosión soluble en agua con propiedades bactericidas.

### C-3) Sistemas abiertos:

El agua en estos sistemas es enfriada por evaporación en las torres de enfriamiento; su ciclo va de la torre al sistema y regresa a las torres.

Su tratamiento químico es más especializado y su control debe ser mas exacto, los tipos generales de tratamiento químico que se utilizan son:

#### C-3-1) Tratamiento Acido:

- ◆ En base a cromatos, dispersantes orgánicos, pH determinado.
- ◆ En base a fosfatos dispersante poli-acrílico, pH determinado.

#### C-3-2) Tratamiento Básico

- ◆ Dispersantes orgánicos, , fosfato residual
- ◆ Fosfatos orgánicos, polifosfatos, dispersantes acrílicos a pH determinado. [23]

## 4.4 CORRECCIÓN DE PH O NEUTRALIZACIÓN AL AGUA

La neutralización o ajuste de pH, generalmente adición de un álcali o de un ácido a un residuo, para obtener un rango de pH cercano a 7.0 se usa para proteger fuentes receptoras de descargas alcalinas, acidas o para permitir el postratamiento de dichos residuos.

En toda fuente receptora, el pH es un factor importante para los sistemas de reacciones químicas y biológicas; la neutralización es importante para ejercer control de la corrosión, la presencia de orín en las tuberías y accesorios indica la necesidad de controlar este aspecto.

4.4.1 Proceso de fabricación de la cal viva y proceso de apagado de cal. La definición de caliza nos dice que son rocas constituidas, por más de 50% de calcita, junto con otros componentes como el aragonito, sílice, arcilla, óxidos de hierro, etc.

Las calizas constituyen uno de los tipos más abundantes de rocas sedimentarias, obteniéndose así diferentes orígenes como las calizas detríticas, químicas y orgánicas.

Como ya se mencionó el principal mineral formador de las calizas es la calcita y aragonito, por lo que para estudiar y comprender las calizas así como su

importancia como minerales industriales debemos conocer a la calcita y al aragonito. [24]

4.4.1.1 Formas cristalinas del carbonato de calcio (Aragonito y Calcita). Sustancias de la misma composición química pueden presentarse, como ocurre con el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), en diferentes formas cristalinas, ej. calcita = trigonal, que se endurece formando una piedra calcárea, y aragonita = romboidal, que no se endurece por tener una estructura cristalina inestable.

Los cristales de calcita forman literalmente miles de formas geométricas diferentes, hay más de 300 formaciones de cristales identificadas en la calcita, y tales formaciones se pueden combinar para producir las miles de variaciones de cristales diferentes. Esto plantea y explica la complejidad de la correcta interpretación de lo que realmente es y los efectos que produce el correcto tratamiento magnético del agua y de los minerales junto con otros compuestos que circulan por la misma.

La manipulación física no origina la formación de la estructura robusta de la calcita, sino de la pequeña estructura romboide de la aragonita, donde se ha perdido la capacidad de adhesión. Esto impide la formación de las costras duras en las paredes de las tuberías y maquinarias.

La aragonita es un poliforme de la calcita, lo que significa que tiene la misma composición química que la calcita, pero tiene una estructura diferente y, lo más importante, diferentes simetrías y formas cristalinas. La estructura más compacta de la aragonita se compone de grupos triangulares de iones de carbonato ( $\text{CO}_3$ ), con un ion de carbón en el centro del triángulo y tres iones de oxígeno en cada extremo. A diferencia de la calcita, los iones de carbonato no están dispuestos en un único plano apuntando en la misma dirección. Por el contrario, están dispuestos en dos planos que apuntan a direcciones opuestas; destruyendo así la simetría trigonal que es característica de la estructura de la calcita. [25]

*Tabla 6. Características de la calcita y aragonita.*

#### **ANÁLISIS FÍSICOS DEL $\text{CaCO}_3$**

<b>Características</b>	<b>Calcita</b>	<b>Aragonita</b>
Química	$\text{CaCO}_3$	$\text{CaCO}_3$
Grupo	Calcita	Aragonita
Estado	Sólido	Depósitos blandos
Simetría	Trigonal	Ortorrómbica
Otras características	Indices refractivos de 1,49 y 1,66 que producen un	La aragonita es fácilmente efervescente en el ácido

	<p>efecto importante de doble refracción (cuando un cristal se coloca en una sola línea se pueden apreciar dos líneas), fácilmente efervescente con ácidos diluidos y puede ser fluorescente, fosforescente, termoluminescente y triboluminescente.</p>	<p>clorhídrico frío y diluido. Es fluorescente y su índice refractivo es de 1,7.</p>
--	---	--

Figura 5. Estructuras de la calcita y aragonita

**CALCITA**



**ARAGONITA**



Fuente. [www.fluidforce.com](http://www.fluidforce.com)

4.4.1.2 Calcinación. El carbonato de calcio es calentado en hornos de tipo rotatorios horizontales para sacar el anhídrido carbónico y producir óxido de calcio; las altas temperaturas a las que ocurre este proceso afectan la calidad del CaO.

Los factores que afectan la calidad del Oxido de calcio son:

- 1) Composición química de la caliza
- 2) Temperatura de horneado durante la calcinación
- 3) Tiempo de permanencia del CaO en el horno
- 4) Permanencia del CO<sub>2</sub> en la atmosfera del horno de calcinación

El proceso químico se muestra a continuación:



Sin embargo el oxido de calcio (CaO) es inestable en presencia de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>). La forma más estable de la caliza es como hidróxido de calcio.

La adición de agua al óxido de calcio se conoce como hidratación de cal viva, dicho proceso es exotérmico y genera una gran cantidad de calor.



El proceso de hidratación cuando se hace con una cantidad de agua justa se llama: Hidratación seca. En este caso de hidratación el producto es un polvo seco. Cuando se usa un exceso de agua en la hidratación el proceso se llama "Apagado", en este caso el producto resultante de la hidratación tiene la forma de una lechada.

El proceso de apagado normalmente se hace con una gran cantidad de agua en exceso variando desde 3 a 6 partes de agua por 1 parte de CaO.

#### 4.4.1.3 Factores que afectan el proceso de apagado

- 1) Tipo de caliza usada en la calcinación
- 2) Temperatura de apagado
- 3) Relación Agua-CaO
- 4) Grado de agitación durante el apagado
- 5) Viscosidad de la lechada
- 6) Tiempo de apagado
- 7) Temperatura del agua

#### TIPO DE CALIZA

Los depósitos de carbonato de calcio, generalmente no son puros, estos tienen muchas impurezas como magnesio, aluminio y otros compuestos que afectan la calidad del hidrato producido partiendo de esa caliza. Los fabricantes de Oxido de calcio no tienen control sobre estos elementos incorporados a la caliza.

### TEMPERATURA DE APAGADO

La temperatura mas alta de apagado es de 98.9 °C , aunque en este proceso , las temperaturas mas practicas son entre 71.7- 85 °C, y dependiendo de la calidad de la cal puede haber liberación de calor entre 490 – 390 BTU

### RELACION AGUA-CAL

Este factor también afecta el tiempo de apagado por efecto de la temperatura de apagado, Mientras mas alta es la temperatura del proceso de apagado, mas corto es el tiempo de apagado. Controlando esta relación, el proceso de apagado no garantiza una temperatura constante. La temperatura variará de acuerdo a la variación de la temperatura del agua, la reactividad de la cal y la calidad del agua.

*Tabla 7. Tiempo de sedimentación para una mezcla de agua-cal variable*

<b>Relación agua-cal</b>	<b>Tiempo sedimentación de 50% (minutos)</b>
Cal apagada con una cantidad minima teórica de agua	10
Cal apagada con una cantidad 10 veces la teórica de agua	440

### GRADO DE AGITACION

El grado de agitación durante el proceso de apagado tiene impacto en el producto final. Una agitación muy pequeña da como resultado temperaturas disparejas, lo que produce en la cámara de apagado partículas frias y partículas calientes.

### VISCOSIDAD DE LA LECHADA

La viscosidad de la lechada de cal puede tener una gran variación de una cal a otra, ciertos cambios en las condiciones de hidratación o impurezas en la cal pueden incrementar la viscosidad de la lechada de cal, afectando el tiempo de sedimentación. Algunas veces la viscosidad crece con temperaturas de apagado de 82°C y superiores a esta.

### TIEMPO DE APAGADO

El tiempo de apagado es el tiempo requerido para completar el proceso de hidratación. Este tiempo varia de una cal a otra. Una cal de alta reactividad se hidrata completamente en 2-3 minutos. Una cal de reactividad media se hidrata completamente en 5-10 minutos. Una cal de baja reactividad, con magnesio se hidrata en 15-30 minutos.

## TEMPERATURA DEL AGUA

La temperatura del agua apagada tiene influencia sobre el proceso de apagado. La temperatura de entrada del agua de apagado y la relación de agua a cal tiene un efecto inverso en el tiempo de apagado.

4.4.1.4 Curvas de titulación. Las curvas de titulación deben desarrollarse continuamente en la operación de un proceso de neutralización para controlar y calibrar los equipos de dosificación. Lo pronunciado de la pendiente de las curvas de titulación cerca de los puntos de equivalencia incide lo difícil que es lograr, en la práctica, un control óptimo de pH.

El procedimiento puede ser el siguiente:

- ★ Se agregan 500mL del afluyente a un vaso de 1L
- ★ Se mantiene el contenido del vaso en agitación
- ★ Se agrega por ejemplo cal en cantidades pequeñas, verificando el pH de equilibrio para cada adición de cal y evitando que la cal se deposite dentro de la pipeta de dosificación.
- ★ Se continua la adición de cal, hasta alcanzar el pH deseado o de equilibrio
- ★ Se elabora la curva de titulación
- ★ Se repite el procedimiento con la dosificación para el pH deseado y se determina el tiempo de mezcla requerido para obtener el equilibrio de la reacción.

4.4.1.5 Métodos de neutralización. La neutralización puede hacerse por los siguientes métodos:

- Neutralización de residuos ácidos, con cal, en tanques de mezcla completa. La lechada de cal se usa en concentración del 8-15% de cal viva. Se usan procesos de conchada para caudales menores de  $400\text{ m}^3/\text{d}$ . En procesos de flujo continuo el control de pH es automático y si se usa aire para mezcla se recomiendan tasas de  $0.3\text{-}0.9\text{ m}^3 / \text{min} \cdot \text{m}^2$  para tanques de 3m de profundidad.
- Neutralización de residuos ácidos, con lechos de piedra caliza, de flujo ascensional preferiblemente. La carga hidráulica en lechos de flujo en descenso se limita a  $60\text{m}/\text{d}$  para asegurar un tiempo de contacto apropiado. La concentración de ácido se limita a 0.6%-  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para evitar el recubrimiento de la caliza con sulfato de calcio y la evolución excesiva de Dióxido de Carbono. Con lechos de caliza dolomítica se requiere mayor tiempo de contacto.

- Neutralización de residuos ácidos con diferentes sustancias alcalinas como NaOH al 50%,  $Na_2CO_3$  o  $NH_4OH$ .

La cal se compra en forma de cal viva y de cal hidratada. La densidad es aproximadamente de 880 a 1200  $kg/m^3$ . La adición de cal al agua crea condiciones que hacen que se precipite carbonato de calcio y como el pH se eleva sobre 10.5, se forma hidróxido de magnesio, que actúa como coagulante, cuando hay magnesio.

*Tabla 8. Parámetros para diseñar un sistema de neutralización.*

<b>Parámetros de diseño de sistemas de neutralización</b>	
Tanque de reacción	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Profundidad igual al diámetro</li> <li>★ Tiempo de retención de 5 a 30 minutos (30 para cal)</li> <li>★ Entrada del afluente por la parte superior</li> <li>★ Salida del efluente por el fondo</li> </ul>
Agitador	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ De turbina para tanques de menos de 4 <math>m^3</math></li> <li>★ De flujo axial para tanques de mas de 4 <math>m^3</math></li> </ul>
Sensor de pH	Preferible el sumergible sobre los de flujo directo
Bomba o válvula de control	Las bombas tiene un rango limitado a 10:1, las válvulas tienen rangos más amplios.

4.4.1.6 La sedimentación .Un tanque de sedimentación es una estructura a través de la cual fluye el agua a tan baja velocidad que el material suspendido caerá depositándose en el fondo del tanque, saliendo de éste un agua relativamente clara.

Generalmente se especifican periodos de retención de tres a seis horas y velocidades horizontales menores de 0.90m por minuto.

Probablemente los factores de operación más importantes de un tanque de sedimentación son:

- Que el agua al entrar en el tanque provoque la minima turbulencia
- El impedir corrientes en corto circuito o directas entre la entrada y la salida
- El efluente salga sin provocar disturbios para que no arrastre hacia afuera del tanque el material sedimentado

Con mucha frecuencia puede modificarse apropiadamente un tanque que no funciones correctamente haciendo cambios en los dispositivos de entrada y salida, o instalando tabiques desviadores para mejorar cualquiera de las funciones antes mencionadas. [24]

#### 4.5 ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER (LSI)<sup>2</sup> O ÍNDICE DE SATURACIÓN DE CARBONATO DE CALCIO (SI)

El índice de saturación del carbonato de calcio se usa para evaluar la tendencia incrustante o corrosiva del agua, este índice permite llevar un programa de control a las aguas industriales o domesticas.

Aguas sobresaturadas de carbonato de calcio tienden a precipitar mientras que las poco saturadas tienden a disolver todo el carbonato de calcio.

Muchas variables deben ser medidas para medir este índice entre ellas están:

- Alcalinidad total
- Dureza
- pH
- Temperatura
- Conductividad o sólidos totales

Se establece para una temperatura determinada y mide el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o corrosivo. Se define teóricamente como:

$$LSI = pH - pHs \quad (17)$$

Siendo pH, el pH al que se encuentra la muestra de agua y pHs el valor de pH del agua en equilibrio con el CaCO<sub>3</sub> en las concentraciones existentes de ion calcio e ion bicarbonato.

Debido a ello, cuando LSI tenga un valor negativo se tratará de un agua con tendencia corrosiva. En cambio, para valores de LSI positivos el agua tendrá una tendencia incrustante provocando la deposición de carbonato cálcico. [26]

Cabe indicar que el índice es de carácter cualitativo que cuantitativo y el valor de cero no debe ser tomado a la ligera, ya que por otro lado nadie ha cancelado la posibilidad de errores instrumentales y errores de aproximación. Por lo tanto los valores del LSI en el rango de -0.4 y +0.4 debe ser considerados como cero. [27]

---

<sup>2</sup> Aprobado por el comité de métodos estandarizados en 1993

Tabla 9. Clasificación del índice de langelier según su valor.

ISL	Indicación
ISL<0	Agua no saturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO <sub>3</sub> ). El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato cálcico (CaCO <sub>3</sub> ) presentes que protegen las tuberías y equipos.
ISL=0	Agua considerada neutral. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas.
ISL>0	Agua supersaturada con respecto a carbonato cálcico (CaCO <sub>3</sub> ). Posible formación de incrustaciones.

Tabla 10. Clasificación del índice de langelier por Carrier<sup>3</sup>.

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<LSI<2	Formación de incrustaciones pero no corrosiva

4.5.1 Limitaciones del método. La precipitación de aguas sobresaturadas pueden ser inhibidas por fosfatos particularmente polifosfatos, acrilatos estos agentes pueden actuar como secuestrantes del carbonato de calcio.

Los índices de saturación no se deben considerar como resultados absolutos, son mas bien complementos los cuales guían el comportamiento de un sistema acuoso, por otro lado parámetros que influyen la corrosividad no se tienen en cuenta y deben ser valorados por aparte como:

---

<sup>3</sup> Autor que mejora la propuesta del índice de langelier.

1. Oxígeno disuelto
2. Acidez
3. Sólidos suspendidos totales
4. Velocidad del agua
5. Cloruros[26]

4.5.2 Índices de corrosividad adicionales. El índice de langelier no es el único cuyo valor indica la tendencia corrosiva o incrustante del agua, sino que existen otros índices los cuales pueden ser de gran apoyo dependiendo del caso de estudio, los siguientes son:

- 1) Existe otro índice de corrosividad llamado Índice de estabilidad de Ryznar (RSI) y se expresa como:

$$ISR = 2pH_S - pH \quad (18)$$

De acuerdo al valor obtenido, se maneja una escala que indica la tendencia incrustante o corrosiva del agua.

*Tabla 11. Clasificación del índice de incrustación/corrosividad en función del índice de estabilidad de Ryznar*

ISR	Condición
3.0	Extremadamente incrustante
5.0	Severamente incrustante
5.5	Moderadamente incrustante
5.8	Levemente incrustante
6.0	Estable
6.5	Estable con leve tendencia corrosiva
7.0	Levemente corrosiva
8.0	Moderadamente corrosiva
9.0	Fuertemente corrosiva

- 2) El índice de Singley tiene en cuenta cloruros, sulfatos, alcalinidad, oxígeno disuelto, capacidad buffer, iones calcio, LSI, tiempo de exposición.

- 3) El índice de Larson (LI) también considera cloruros, sulfatos y alcalinidad total, si el índice es menor de 0.2 indica que el agua no es corrosiva
- 4) El índice de Riddick (RI), este considera dureza, alcalinidad, cloruros, nitratos, oxido de silicio, oxígeno disuelto. [28]

Tabla 12. Clasificación de la corrosividad en función del índice de Riddick

RI	Tendencia
Menor 5	Ninguna tendencia corrosiva
6-25	No corrosiva
25-50	Corrosiva levemente
51-75	Corrosiva moderada
76-100	corrosiva
Mayor 100	Muy corrosiva

4.6.3 Determinación analítica del pHs. Para comenzar con el análisis de este índice, primero se determina la ecuación de partida y todas sus variables.

El cálculo del pHs esta expresado de la siguiente manera:

$$\text{pHs} = \text{pK}_2 - \text{pK}_s + \text{p}[\text{Ca}_i] + \text{p}[\text{Alk}_t] + 5\text{p}f_m \quad (19)$$

Donde:

$K_2$  = Constante de segunda disociación<sup>4</sup> para el ácido carbónico a la temperatura del agua.<sup>5</sup>

$K_s$  = Constante de solubilidad del producto para el  $\text{CaCO}_3$  a temperatura del agua.

---

<sup>4</sup> Constante de disociación: Relación matemática que se establece a partir de las concentraciones de los compuestos químicos que se forman en una reacción de disociación al alcanzar su punto de equilibrio.

<sup>5</sup> Primera disociación del ácido carbónico:  $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$  segunda disociación del ácido carbónico:  $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$

[Ca<sub>t</sub>] = Calcio total, gramomol/ L

[Alk<sub>t</sub>] = Alcalinidad total, determinada por titulación del punto final de ácido carbónico, equivalentegramo / L.

f<sub>m</sub> = Coeficiente de actividad para especies monovalente<sup>6</sup> a temperatura específica.

En la ecuación anterior, la “p” de cada variable indica el  $-\log_{10}$  de esa variable. En los sistemas acuosos pueden formarse distintos isoformas del CaCO<sub>3</sub>, incluido la calcita, aragonita y vaterita<sup>7</sup>, cada uno con propiedades de solubilidad diferentes, (pK<sub>sc</sub>, pK<sub>sa</sub>, pK<sub>sv</sub>, correspondientemente)

Es así, como para el cálculo de la pK<sub>s</sub>, se ajustan estas diferencias para el compuesto de formación más probable, que para el agua natural es la calcita.

A continuación se muestran las ecuaciones teóricas para pK<sub>2</sub>, pK<sub>s</sub> y pf<sub>m</sub> en función de la temperatura (Kelvin).

*Tabla 13. Estimación de las constantes de equilibrio y los coeficientes de actividad*

<b>Estimación de constantes de equilibrio y coeficientes de actividad</b>
$pK_2 = 107,8871 + 0,03252849T - 5151,79/T - 38,92561 \cdot \log_{10}T + 563716,9/T^2$ <p style="text-align: center;">(20)</p>
$pK_{sc} = 171,9065 + 0,0077993T - 2839,319/T - 71,595 \cdot \log_{10}T$ (21)
$pK_{sa} = 171,9773 + 0,077993T - 2903,293./T - 71,595 \cdot \log_{10}T$ (22)
$pK_{sv} = 172,1295 + 0,077993T - 3074,688/T - 71,595 \cdot \log_{10}T$ (23)

---

<sup>6</sup> Especie monovalente: aquella que tiene una sola valencia tales como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, F, Cl, entre otros.

<sup>7</sup> Son minerales poliformos del grupo de los carbonatos, la calcita es el mineral de carbonato de calcio más estable frente a la aragonita y la vaterita cuyo fórmula química es igual pero de estructura cristalina inestable y soluble.

$$pf_m = A \left[ \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0,3I \right] \text{ v\u00e1lido para } I < 0,5 \quad (24)$$

Cuando se dispone de conductividad (25)  
 $I = 1,6 \times 10^{-5} C$

Cuando se dispone de TDS (26)  
 $I = \text{TDS} / 40\,000$

$$A = 1,85 \times 10^6 (ET)^{-1,5} \quad (27)$$

$$E = \frac{60954}{T + 116} - 68,937 \quad (28)$$

Donde:  
 I = Fuerza i\u00f3nica  
 C = conductividad,  $\mu\text{mhos} / \text{cm}$   
 TDS = s\u00f3lidos disueltos totales,  $\text{mg} / \text{L}$   
 $f_m$  = coeficiente de actividad para especies monovalentes  
 E = constante diel\u00e9ctrica  
 T = temperatura K (  $^{\circ}\text{C} + 273.2$  )

Seg\u00fan V.A. Prisyazhniuk, los c\u00e1lculos toman en cuenta solo la carga del i\u00f3n y la concentraci\u00f3n del mismo, por lo tanto no es de mayor importancia saber la composici\u00f3n de las sustancias de la soluci\u00f3n, lo que es relevante es la masa total de los iones y su carga. Estas consideraciones hacen posible reemplazar los c\u00e1lculos de la fuerza ionica y sus coeficientes de actividad de varios iones por la medida de la masa total de los s\u00f3lidos disueltos (TDS). [27]

Para ahorrar tiempo en los c\u00e1lculos los valores de  $pK_2$ , y  $pK_s$  se han calculado previamente para temperaturas seleccionadas, la siguiente tabla proporciona varios valores para los distintos amorfos del  $\text{CaCO}_3$ .

*Tabla 14. Valores precalculados para el  $pK_2$ ,  $pK_s$  y A de temperaturas seleccionadas.*

Temperatura $^{\circ}\text{C}$	$pK_2$	$pK_s$			A
		Calcita	Aragonita	Vaterita	
5	10,55	8,39	8,24	7,77	0,494
10	10,49	8,41	8,26	7,80	0,498
15	10,43	8,43	8,28	7,84	0,502
20	10,38	8,45	8,31	7,87	0,506

25	10,33	8,48	8,34	7,91	0,511
30	10,29	8,51	8,37	7,96	0,515
35	10,25	8,54	8,41	8,00	0,520
40	10,22	8,58	8,45	8,05	0,526
45	10,20	8,62	8,49	8,10	0,531
50	10,17	8,66	8,54	8,16	0,537
60	10,14	8,76	8,64	8,28	0,549
70	10,13	8,87	8,75	8,40	0,562
80	10,13	8,99	8,88	8,55	0,576
90	10,14	9,12	9,02	8,70	0,591

Ahora bien, para calcular los valores de  $[Alk_t]$  y  $[Ca_t]$  se realiza una división entre el valor obtenido en el análisis y sus mg / mol correspondiente como se muestran las siguientes ecuaciones:

$$[Ca_t] = [ \text{mg/L Ca}^{+2} ] / 40000 \quad (29)$$

$$[Alk_t]^8 = [ \text{mg/L alcalinidad total} ] / 50000 \quad (30)$$

Finalmente se han obtenido todas las variables de la ecuación (3), las cuales al reemplazarse dan como resultado el pHs buscado.

---

<sup>8</sup> Las unidades en este cálculo son de equivalentes-gramo / L

## **5. METODOLOGIA**

### **5.1 RECOLECCION DE MUESTRAS**

Como primer paso, se estudiaron los puntos de muestreo en cada ciclo; para el lavado de caña, el sistema contaminante y generador de cambios en el agua es el proceso que se lleva en las mesas de caña, por lo tanto este es el sistema de estudio y a partir de allí, los puntos de muestreo afluente y efluente son (salida del clarificador y llegada a fosos de residuales respectivamente), como se observa en el ANEXO I.

Por otro lado, para el ciclo de enfriamiento, se estableció que el proceso que produce cambios generadores de contaminación en el agua de estudio ocurre en elaboración y refinería, partiendo de este criterio, el afluente y efluente respectivo son (Foso planta de agua y foso residuales respectivamente). Ver ANEXO K.

El volumen de agua recolectado para cada ciclo fue de un promedio de 4 Litros por día, por medio de unos contenedores de plástico, los muestreos fueron puntuales especialmente en horas de la mañana.

### **5.2 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN**

A continuación se menciona brevemente como se realizan cada una de las pruebas con base al libro de Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 21<sup>st</sup> Edition. 2005, referenciando el número del método y su respectiva sección.

#### **5.2.1 pH.**

Después de la recolección del agua, esta se llevó de inmediato al laboratorio de aguas y se tomó un volumen aproximado de 200mL para medir su pH por medio de un pH-metro Mettler Toledo S20. (Método 4500-B, sección 4-90)

#### **5.2.2 Temperatura.**

La temperatura se midió "in situ" por medio de un termómetro bimetálico AsChcroft 74196. (Método 2550-A, sección 2-61)

#### **5.2.3 Oxígeno Disuelto.**

Se tomó 500mL de muestra en un beacker y se puso en movimiento con un agitador electromagnético para que el flujo de agua choque contra la superficie de la membrana del electrodo del Oxi-metro Schott Instruments OXY 12 y obtener la lectura respectiva. (Método 4500-G, sección 4-141)

#### 5.2.4 Turbiedad.

Se puso en agitación un volumen aprox. 200mL para que las partículas disueltas y coloides, se homogenicen, luego se tomó una celda de vidrio por los extremos para no engrasarla con los dedos, y se llenó con la muestra, observando que no haya presencia de burbujas de aire, se cerró y se limpió con un paño, se introdujo en el Turbidímetro Hach 2100N para obtener la respectiva lectura. (Método 2130-B, sección 2-9)

#### 5.2.5 Conductividad.

Se tomó 100mL de muestra agitada y se midió su conductividad por medio de un Conductímetro 712 Metrohm. (Método 2510-B, sección 2-47)

#### 5.2.6 Acidez.

Se sacaron 3 alícuotas de 50mL, y se titularon por medio de un equipo titulador automático Titrino SM, con NaOH 0.05 N hasta un pH 8.3. (Método 2310-B, sección 2-24)

#### 5.2.7 Alcalinidad.

Se sacaron 3 alícuotas de 50mL y se titularon con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02N hasta un pH 4.3(Método 2320-B, sección 2-27)

#### 5.2.8 Dureza.

Para ambos ciclos se realizaron diluciones de 10mL muestra en balones aforados de 200mL, algunas ocasiones, el agua de lavado de caña, era muy turbia y era necesario hacer diluciones de 10mL de muestra en balones de 250mL.

Se tomaron alícuotas de 50mL y se adicionó 1mL de solución buffer pH 10 y se tituló con una solución de EDTA 0.02N, hasta el viraje azul. (Método 2340-C, sección 2-37)

#### 5.2.9 Sólidos Suspendidos Totales.

Se taró previamente tres crisoles Gooch con filtro a una temperatura de 104°C y se enfriaron en el desecador, luego se tomaron 500mL de muestra y se puso en agitación, por medio de una pipeta volumétrica se tomó 5mL de muestra y se pasó al vacío a través del filtro depositado en el crisol Gooch, se enjuagó la pipeta con agua destilada y se deja pasar el vacío por un minuto hasta no ver rastro de agua en el crisol, a continuación se lleva a secar a 104°C por una hora, se enfría, se pesa y de nuevo al horno, hasta obtener un peso constante. (Método 2540-D, sección 2-58)

#### 5.2.10 Sólidos Disueltos Totales.

Se tara previamente dos cápsulas de porcelana a 104°C en un Horno Memmert, tomar 5mL de muestra agitada con una pipeta volumétrica y ponerla en la cápsula, llevar al horno hasta sequedad, sacar y enfriar, repetir el proceso de secado hasta obtener un peso constante. (Método 2540-C, sección 2-57)

### 5.3 DOSIFICACION DE LECHADA DE CAL PARA AMBOS CICLOS

Los puntos de dosificación para ambos ciclos, se realizan en la planta de tratamiento de aguas residuales, ya que por facilidad de espacio, la mezcladora de lechada de cal se encuentra ubicada en medio de los dos fosos (Lavado de caña y Ciclo enfriamiento), por lo tanto el agua que se utiliza para muestrear, titular y analizar se toma del efluente lavado de caña y del efluente sistema de enfriamiento.

La preparación de las lechadas de cal, se tomaron de la tabla propuesta en el manual de la tecnología azucarera, esta tabla está en función de la concentración masa (gCaO/Lsln) y su °Bé (grado baumé<sup>9</sup>) correspondiente, para efectos del análisis era necesario obtener una tabla la cual indicara cuanto debía preparar por cada °Bé, es así como se procedió a tomar la tabla inicial y se realizó una regresión lineal para obtener una ecuación la cual me permitiera buscar el °Bé deseado, de la siguiente forma:

*Tabla 15. Relación de Concentración masa y Grados Baumé de una lechada de cal<sup>10</sup>*

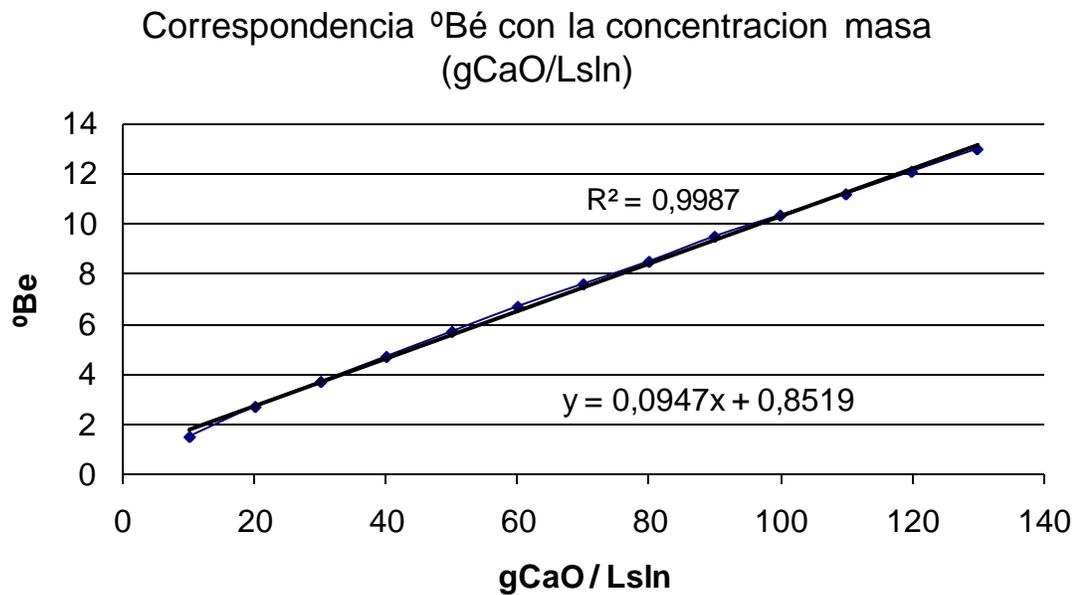
°Bé	Concentración masa gCaO Puro /Lsln
1,5	10
2,7	20
3,7	30
4,7	40
5,7	50
6,7	60
7,6	70
8,5	80
9,5	90
10,35	100
11,2	110
12,1	120
13	130

---

<sup>9</sup> Es la medida de densidad relativa de un líquido, mas no su concentración.

<sup>10</sup> Z.Bubnik. P. Kadlec. D Urban. M.Bruhns. Sugar Technologists Manual. Chapter 2: Physics and Chemistry. Table 2.2.4. p-87. 8th Edition. Bartens. Germany. 1995. ISBN 3-87040-056-0

Gráfica 4. Correspondencia de grados baumé con la concentración masa de las lechadas de cal.



A partir de la ecuación obtenida se generó una nueva tabla de la siguiente manera:

Tabla 16. Relación de la concentración masa de una lechada de cal en función de su grado baumé (°Bé)

°BE	Concentración masa gCaO/Lsln
1	1,56
2	12,12
3	22,68
4	33,24
5	43,80
6	54,36
7	64,92
8	75,48
9	86,04
10	96,60
11	107,16
12	117,72
13	128,28

La preparación de la lechada de cal, se realizó para un volumen de 800mL, ya que se necesitaban cantidades pequeñas para la dosificación y no había disponibilidad de beacker de 1L, para el cálculo también se tuvo en cuenta la pureza de la cal viva que se usa en la fabrica la cual es de un promedio de 90%, tomando como ejemplo el primer dato de la tabla 16 (1°Bé = 1.56gCaO/Lsln) se tiene que:

$$\frac{1.56gCaO}{1Lsln} \times \frac{100gcal}{90gCaO} \times \frac{1Lsln}{1000mL} \times 800mL = 1.39gCal$$

A continuación se toman 4 beackers y se adiciona a cada uno 500mL de muestra, se mide su pH, y se dosifican diferentes cantidades de la lechada de cal preparada 50ppm-100ppm-150ppm-200ppm con un amplio rango, los cálculos se hicieron de la siguiente manera:

$$\frac{50mg}{1Lsln} \times \frac{1g}{1000mg} \times \frac{1Lsln}{1.56gCaO} \times 500mL = 16mL.(lechada.de.cal)$$

Para agilizar los análisis se desarrolló una tabla de dosificaciones de lechada de cal en función de su densidad relativa (°Baumé), ver ANEXO A.

Luego se observa los cambios de pH en cada beacker, por un tiempo de 3 minutos mientras está en constante agitación.

Se elige el beacker cuya muestra haya obtenido un pH entre 6.9-7.5, a partir de allí, se disminuye el rango y se dosifica otras 4 muestras con concentraciones de lechada de cal cercanas al valor dosificado originalmente.

De esta forma se obtienen diferentes ya tablas de neutralización para cada lechada de cal, ver ANEXO G.

Finalmente a la muestra cuyo pH haya llegado al intervalo deseado, se le realiza una segunda caracterización para analizar los cambios generados.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSION

### 6.1 ANALISIS DEL OBJETIVO 1

Hacer el análisis físico-químico en los caudales de agua de los ciclos Elaboración y Lavado de Caña.

A continuación de forma condensada se muestran los datos obtenidos en los análisis propuestos y los datos promedio, junto con los máximos y mínimos, la desviación estándar absoluta y el coeficiente de variación para cada parámetro en el ciclo lavado de caña:

*Tabla 17. Valores condensados de la caracterización del afluente del lavado de caña.*

<b>Afluente Lavado de caña</b>	Promedio (X)	Valor mínimo encontrado	Valor máximo encontrado	Desviación estándar absoluta (s)	Coeficiente De variación (CV)
Temperatura (°C)	31,13	28,00	36,00	2,75	8,8
pH	4,68	3,90	5,00	0,38	8,0
O.D. (mgO <sub>2</sub> /L)	0,39	0,10	1,30	0,45	115,3
Turbiedad (NTU)	560,06	119,00	1136,00	470,59	84,0
Conductividad (μS/cm)	391,74	242,50	549,90	109,76	28,0
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	238,98	92,60	350,10	100,50	42,1
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	88,00	10,60	123,60	38,47	43,7
Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	157,46	72,20	320,30	84,71	53,8
S.D.T (ppm)	471,70	185,32	723,54	220,06	46,7
S.S.T(ppm)	363,03	78,04	886,46	221,39	61,0

Tabla 18. Valores condensados de la caracterización del efluente del lavado de caña.

<b>Efluente Lavado de caña</b>	Promedio (X)	Valor mínimo encontrado	Valor máximo encontrado	Desviación estándar Absoluta (s)	Coefficiente de Variación (CV)
Temperatura (°C)	30,25	28,00	34,00	2,43	8,0
pH	4,75	4,00	5,10	0,38	7,9
O.D. (mgO <sub>2</sub> /L)	0,67	0,10	1,30	0,40	59,7
Turbiedad (NTU)	797,75	148,50	1476,50	507,24	63,6
Conductividad (μS/cm)	405,63	304,00	556,90	94,77	23,4
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	192,88	80,30	315,80	90,22	46,8
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	75,35	8,20	108,40	30,42	40,4
Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	168,69	106,10	223,40	43,77	25,9
S.D.T (ppm)	997,86	307,20	1613,89	514,81	51,6
S.S.T(ppm)	1374,68	672,78	2590,83	669,81	48,7

A partir de dichos datos condensados se realiza un grafico que permita comparar el efecto del clarificador sobre el tratamiento de remoción de sólidos en el ciclo lavado de caña, como se observa a continuación los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos son mayores en el efluente debido a que el caudal acarrea la tierra al lavar la caña, y en este se une el efluente del ciclo de piletas de ceniza, así aumentan los sólidos al adicionar bagazo y ceniza de este caudal; con los datos obtenidos podemos calcular la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales del clarificador, de la siguiente manera:

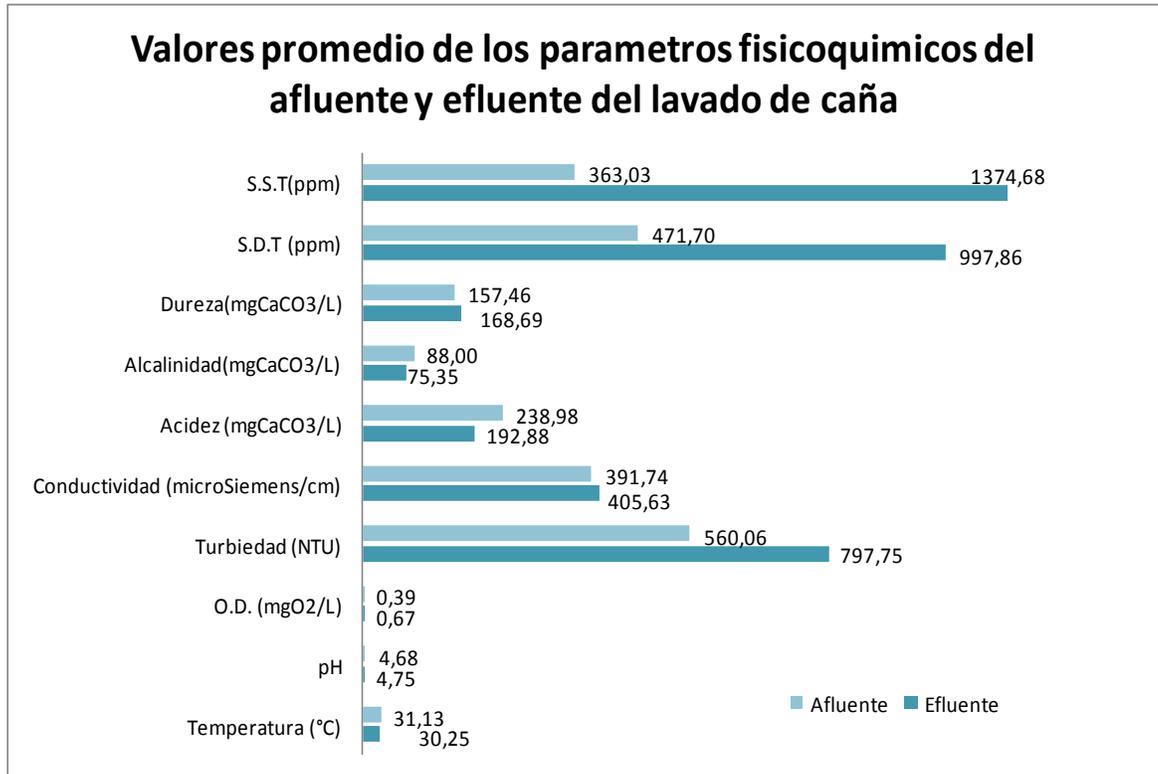
$$\% \text{Remoción} = (S_i - S_f) / S_i * 100 \quad (31)$$

Donde:

S<sub>i</sub>= Sólidos suspendidos iniciales (Efluente lavado de caña)  
 S<sub>f</sub>=Sólidos suspendidos finales (afluente lavado de caña)

Para los sólidos disueltos totales se realiza una remoción del 52,7% y para sólidos suspendidos totales una remoción del 73,6%, indicando una deficiencia en el clarificador de aguas residuales.

Gráfica 5. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente del lavado de caña.



Se puede observar en el gráfico, la turbiedad tiene una reducción del 30% y la conductividad no tiene mayor diferencia entre afluente y efluente indicando que la presencia de iones mantiene constante; el clarificador lo que realiza es una sedimentación de sólidos precipitables, y de sobrenadantes, así que los coloides se mantendrán en el agua, por esta razón la turbiedad no tiene una reducción tan drástica como los sólidos suspendidos.

Por otro lado en este ciclo la temperatura, el oxígeno disuelto y el pH no tiene mayores cambios entre afluente y efluente indicando que constantemente el estado del agua es caliente, anóxica y acida, es de recordar que el ataque del oxígeno disuelto sobre un material de hierro se agudiza cuando se tiene un bajo

pH y aumento de temperatura, esto indica que hay ciertas condiciones para que ocurra un ataque corrosivo a las tuberías por las que se desplaza el agua.

La alcalinidad y la acidez son imperceptiblemente mayores en el afluente que en efluente indicando que el proceso de sedimentación en el clarificador tiene efecto sobre estos parámetros porque el tiempo de retención del agua es de 2,6 Horas, sugiriendo algún tipo de oxidación de materia orgánica en el agua ya que el oxígeno disuelto que entra al clarificador es mayor que el de salida y la acidez de salida del clarificador es mayor que la de entrada.

La alcalinidad tiene un leve aumento en el afluente lavado de caña esto se debe a que el agua contiene hidróxidos producto de la dosificación de la lechada de cal en la entrada del clarificador.

Ahora bien, de manera análoga se procedió a tratar los datos para el ciclo de enfriamiento, a continuación se muestra de forma condensada los resultados y su respectivo análisis:

*Tabla 19. Valores condensados de la caracterización del afluente del ciclo de enfriamiento.*

<b>Afluente Ciclo Enfriamiento</b>	Promedio (X)	Valor mínimo encontrado	Valor máximo encontrado	Desviación estándar Absoluta (s)	Coefficiente de Variación (CV)
Temperatura (°C)	27,43	26,00	28,00	0,79	2,88
pH	4,64	4,21	4,94	0,29	6,24
O.D. (mgO <sub>2</sub> /L)	3,78	2,59	4,24	0,57	15,10
Turbiedad (NTU)	209,21	120,50	393,00	93,95	44,91
Conductividad (μSm/cm)	244,42	171,95	305,50	48,23	19,73
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	146,81	106,73	185,86	30,43	20,73
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	51,23	18,08	86,90	25,06	48,92
Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	101,58	48,56	185,76	44,64	43,95
S.D.T (ppm)	322,68	35,00	498,20	149,68	46,39
S.S.T(ppm)	162,23	45,00	298,34	109,10	67,25

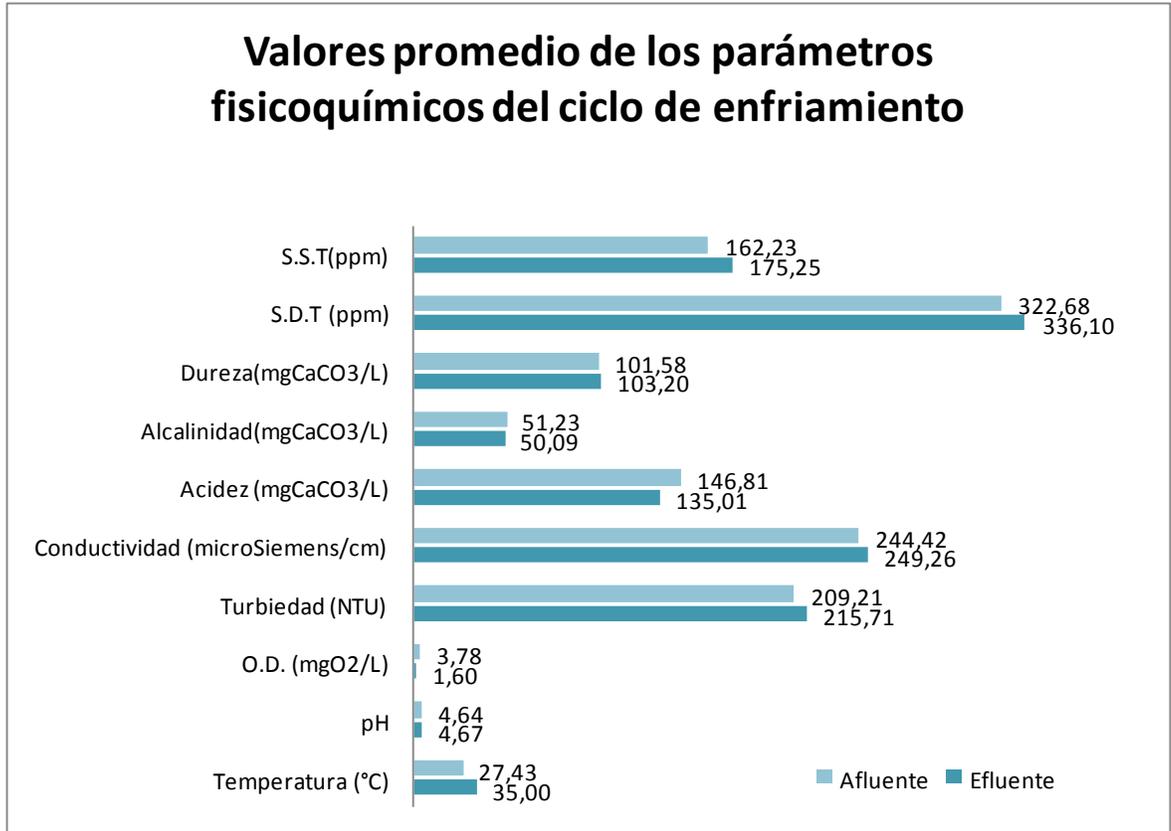
Tabla 20: Valores condensados de la caracterización del efluente del ciclo de enfriamiento.

<b>Efluente Ciclo Enfriamiento</b>	Promedio (X)	Valor mínimo encontrado	Valor máximo encontrado	Desviación estándar Absoluta (s)	Coefficiente de Variación (CV)
Temperatura (°C)	35,00	31,00	39,00	2,38	6,80
pH	4,67	4,22	4,91	0,26	5,57
O.D. (mgO <sub>2</sub> /L)	1,60	0,88	2,82	0,74	46,29
Turbiedad (NTU)	215,71	122,50	446,00	112,51	52,16
Conductividad (µSm/cm)	249,26	171,80	323,00	58,97	23,66
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	135,01	91,25	175,88	26,66	19,75
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	50,09	16,50	85,92	23,95	47,81
Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	103,20	47,80	179,92	46,03	44,60
S.D.T (ppm)	336,10	107,61	530,00	173,47	51,61
S.S.T(ppm)	175,25	91,61	359,73	88,44	50,47

En el ciclo de enfriamiento se observa que entre el afluente y el efluente no hay diferencias marcadas, los puntos más relevantes para este ciclo son el oxígeno disuelto, el pH y la temperatura ya que su función es ser un intercambiador de calor con los tachos y evaporadores en el área de elaboración y refinería.

El oxígeno disuelto se disminuye a casi la mitad al salir del sistema con 1,6mg O<sub>2</sub>/L con respecto al de entrada, esto en parte se debe al aumento de la temperatura al salir del sistema con 35°C porque entre mayor temperatura, los gases disueltos incluidos el oxígeno disminuyen su solubilidad; es importante tener en cuenta que el agua que se toma como afluente del ciclo de enfriamiento está ubicada en el foso de planta de agua y allí existe una continua mezcla del agua de lagos con el desborde de agua cruda, la cual brinda un alivio a la ausencia de oxígeno disuelto del caudal que proviene de lagos, por lo tanto es importante evaluar el efecto del desborde en este ciclo y analizar qué parámetros mejoran o empeoran dado el caso de cerrar el circuito; los resultados para este ítem se critican en el capítulo de actividad complementaria en la sección 7.2.1.

Gráfico 6. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente del ciclo de enfriamiento.



El cambio de temperatura para este proceso, es muy importante para la fábrica ya que indica la eficiencia de la piscina de enfriamiento, el delta para este proceso es:

$$\Delta T^{\circ} = 35 - 27.4 = 7.6^{\circ}\text{C}$$

Por otro lado el pH se mantiene constante con valores de 4,64 y 4,67 la razón de que no cambie entre ambas barras es porque el agua que sale de los lagos como se observa en la tabla 28 tiene un pH realmente bajo y cuando se mezcla con el desborde de agua cruda hay un aumento en el pH hasta alrededor de 4,86, indicando que hay una gran recuperación de este parámetro.

Los otros parámetros medidos tienen como propósito el cálculo del índice de Langelier, y arrojar un índice de corrosión para el agua analizada, lo cual se hará posteriormente.

## 6.2 ANALISIS DEL OBJETIVO 2

**Buscar la dosificación de lechada de cal apropiada por medio de un equipo de jarras.**

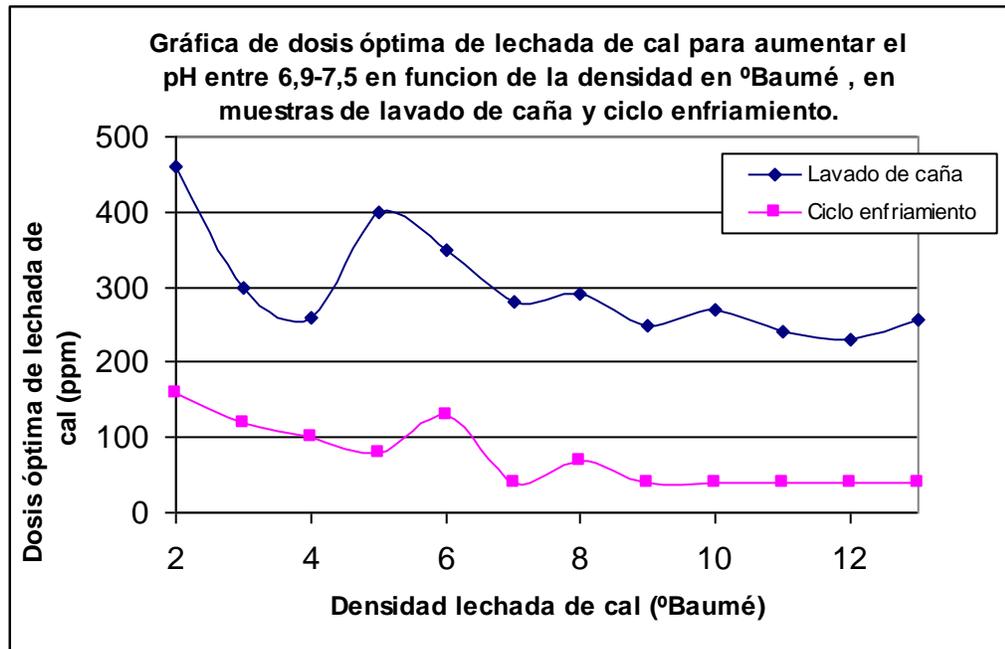
Después de realizar diferentes curvas de titulación para cada ciclo, (como se indicó en la metodología preliminar) y en función de cada concentración de lechada de cal como se observa en el ANEXO G, se procedió a tomar aquellas curvas en las cuales la dosificación era mínima y cuyo pH se corrigió hasta un rango de 6,9-7,5, obteniéndose así los siguientes resultados:

*Tabla 21. Dosificación óptima para cada ciclo según la densidad de la lechada de cal en grados baumé (°Bé)*

Densidad lechada de cal °BE	Dosificación óptima ppm( mg/L)	
	Lavado Caña	Ciclo Enfriamiento
2	460	160
3	300	120
4	260	100
5	400	80
6	350	130
7	280	40
8	290	70
9	250	39
10	270	38,4
11	240	38,5
12	230	38,6
13	256	38,5

A partir de estos datos también se construyó una gráfica la cual ilustrara el comportamiento de cada sistema de agua residual versus su dosificación óptima dependiendo de la lechada de cal utilizada:

Gráfico 7. Comportamiento de cada sistema de agua residual según la dosificación óptima en función de la densidad de lechada de cal.



La gráfica nos permite visualizar como el ciclo lavado de caña requiere de mayores cantidades de lechada de cal para su corrección de pH, en contraposición con el agua del ciclo de enfriamiento, la cual necesita de cantidades menores a dosificar, aún así se propone a partir de la gráfica y los datos obtenidos que la lechada de cal óptima para el ciclo de lavado de caña está entre 11°Bé y 12°Bé, porque a este nivel se encuentra la dosificación mínima y gráficamente hay una estabilidad en la corrección del pH.

Para el ciclo de enfriamiento, la mejor dosificación corresponde con la lechada de cal de 10°Bé, porque a esa densidad se encuentra la mínima cantidad de dosificación para el sistema, convirtiéndose casi constante a partir de allí.

Aunque las curvas de titulación ANEXO F fueron un gran soporte para proponer una mejor dosificación, se procedió a realizar como actividad complementaria el manejo de un segundo sistema alternativo el cual es, el establecimiento de un índice de corrosividad del agua (índice de langelier) con el fin de evaluar el impacto de la lechada de cal y elegir la mejor dosificación en función de la mayor reducción de dicho índice en las aguas residuales del Ingenio Risaralda S. A., este se considera un segundo criterio para sustentar finalmente en conjunto cual es la mejor dosificación de lechada de cal para el caso de estudio.

Esta actividad se muestra más adelante en la sección 7.1.

6.2.1 Cálculo del volumen aproximado a dosificar. A continuación se procede a calcular la velocidad de dosificación para cada sistema, de la siguiente manera:

$$V_{\text{aprox}} = \frac{Q \times C}{\delta} \times 60 \quad (32)$$

Donde:

- ★  $V_{\text{aprox}}$  = Volumen aproximado a dosificar de lechada de cal 11 °Baumé (L/min)
- ★  $Q$  = Caudal de agua a dosificar.(L/s)
- ★  $C$  = Dosis de lechada de cal requerida para aumentar el pH hasta un intervalo de 6.9- 7,5, 240 mg/L para lavado de caña y 38.5 mg /L para ciclo enfriamiento.
- ★  $\delta$  =Densidad de la lechada de cal 11° Baumé (1073900 mg / L)

Para el ciclo de lavado de caña, se desarrolló una tabla en la cual se mira la altura del caudal que llega a residuales, y luego con una fórmula planteada por la Universidad Tecnológica de Pereira en el estudio de los caudales del ingenio  $Q = 0.6954 \cdot H^{1.2157}$  se obtiene un caudal en LPS y se reemplaza en la ecuación (32).

*Tabla 22. Dosificación de lechada de cal 11° Baumé para el ciclo lavado de caña en función de la altura del caudal*

Altura Caudal (cm)	Caudal Agua a dosificar (LPS)	Volumen aprox. De Lechada ( L/minuto)
65	111,223	1,491
70	121,708	1,632
75	132,357	1,775
80	143,160	1,920
85	154,109	2,066
90	165,199	2,215
95	176,422	2,366
100	187,774	2,518

Nota: La velocidad del caudal se calculó con la fórmula  $Q = 0.6954 \cdot H^{1.2157}$

Para el ciclo de enfriamiento, los cálculos se realizaron dependiendo del número de bombas funcionando en aguas residuales, las cuales generan un caudal de agua en función de sus capacidades, esta capacidad se llevó a LPS y de nuevo

se reemplaza en la ecuación (32) junto con los datos de dosificación óptima 38.5 mg /L y densidad de lechada de cal 11° Baumé (1073900 mg / L).

*Tabla 23. Dosificación de lechada de cal 11° Baumé para el ciclo enfriamiento en función de las bombas trabajando*

Equipos trabajando	Capacidad(GPM)	Capacidad (LPS)	Volumen aprox.lechada (L/minuto)
1 bomba-vertical	7000	441	0,95
2 bomba-verticales	14000	882	1,90
1 bomba-centrifuga	15000	945	2,03
1 bomba-centrifuga+ 1 bomba-vertical	22000	1386	2,98
1 bomba-centrifuga+ 2 bombas-verticales	29000	1827	3,93

6.2.2 Preparación de la lechada de cal en la planta. Para la preparación de la lechada de cal se debe tener en cuenta que el proceso de apagado de la cal viva genera una reacción exotérmica, desprendiendo calor, también es importante usar elementos de protección para manipular dicho químico porque es irritante para ojos, piel y vías respiratorias.

También cabe notar que el proceso de apagado debe ser pausado, es decir, la adición de la cal viva debe ser lenta porque si se realiza en un solo movimiento se levanta una nube de cal poniendo en peligro las vías respiratorias, los ojos y la piel del trabajador.

A continuación se presenta la cantidad de cal viva, con un contenido aprovechable de 90% en óxido de calcio, que se requiere para preparar 1000L en la mezcladora de planta de aguas residuales, de la tabla 16 se tiene que 11°Be= 107,16 gCao pura/ Lsln.

$$\frac{107,16 \text{gCaO} \cdot \text{pura}}{1 \text{Lsln}} \times \frac{100 \text{gdecal}}{90 \text{gCao} \cdot \text{pura}} \times \frac{1000 \text{Lsln}}{1} \times \frac{1 \text{Kgdecal}}{1000 \text{gdecal}} = 119,1 \text{Kgdecal}$$

Aprox. 2,5bultos

También se debe tener en cuenta que una cal de alta reactividad se hidrata completamente en 2-3 minutos. Una cal de reactividad media se hidrata

completamente en 5-10 minutos y una cal de baja reactividad, con magnesio se hidrata en 15-30 minutos.

Las pruebas en el laboratorio indicaron que el apagado de la cal viva se realizaba alrededor de 12-15 minutos, lo cual nos muestra que la cal es de una reactividad media.

La dosificación promedio entre los dos sistemas es:

Para el lavado de caña generalmente la altura del canal es de 85cm, la tabla 22 indica que la dosificación es aproximadamente 2,07L/min y para el ciclo de enfriamiento casi siempre se encuentran trabajando todas las bombas, por lo que la tabla 23 indica que la máxima dosificación es de 3,93L/min, lo que equivale a una dosificación total entre los dos sistemas de 6 L/min, teniendo en cuenta que la mezcladora se llena hasta su máxima capacidad (1000L), el tiempo aproximado para desocuparse la mezcladora a ese ritmo de dosificación equivale a 166,7 minutos alrededor de 3 horas, es así como la preparación de la lechada de cal se haría 8 veces/ día y el gasto final de bultos por día sería 20bultos/día.

Con esto se obtiene una reducción en el consumo de bultos de cal para la planta, ya que anteriormente se hacía un gasto de 30 bultos/día para dosificar sólo el ciclo lavado de caña, y a partir de este trabajo, se replantea el gasto de cal reduciéndose a 20bultos/día entre ambos ciclos de agua (lavado de caña y enfriamiento)

### **6.3 ANALISIS DEL OBJETIVO 3**

#### **Redactar el manual de operación de la planta de aguas residuales del Ingenio Risaralda S.A.**

Para cumplir con este objetivo fueron necesarias entre 2-3 semanas, especialmente en días de paro y mantenimiento, porque en estos espacios no era posible continuar con los ensayos en el laboratorio y hubo mayor accesibilidad en cuanto a el estudio de los circuitos y sus componentes. Con este manual se deja sintetizado las tablas de dosificación de lechada de cal para cada sistema y su respectivo cálculo de ellas, también se explica todo el manejo de planta de aguas residuales, especificando características de cada elemento que la constituyen y finalmente se adjuntó los diagramas de los ciclos de lavado de caña, ciclo de enfriamiento y piletas de cenizas. Ver ANEXO L.

Con esto se completa el trabajo de generar una solución a un problema existente como la corrección de pH a las aguas residuales del Ingenio Risaralda, y a la vez con el manual se implementa y se establece el manejo de dicha solución como una actividad adicional y necesaria en dicha área.

## 7. ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA

### 7.1 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SATURACIÓN DEL CARBONATO DE CALCIO COMO INDICADOR DE CORROSIVIDAD PARA LAS AGUAS RESIDUALES

Ahora bien, las curvas de titulación generaron un criterio visual (gráfico 7) para elegir la mejor dosificación para los ciclos de enfriamiento y ciclo lavado de caña, pero se decidió realizar una actividad complementaria para evaluar el impacto de la lechada de cal antes y después de dosificar, por medio del índice de saturación del carbonato de calcio (SI) también llamado Índice de Langelier (LSI) , ya que nos permite ver el grado de corrosividad o incrustación del agua y su impacto en las tuberías de la fábrica desde otro ángulo, es así como para las dosificaciones a partir de 10°Bé se decidió realizar una segunda caracterización en el laboratorio de ambos ciclos, para posteriormente obtener su respectivo índice de langelier, así:

*Tabla 24. Caracterización fisicoquímica después de realizar una dosificación óptima de lechada de cal al ciclo lavado de caña.*

CICLO LAVADO DE CAÑA	Densidad lechada (°Bé)		
	13	12	11
Parámetros			
pH	6,9	6,9	6,8
Turbiedad (NTU)	1995	1894	1850
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1356	1344	1337
Dureza( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ )	901	881,6	810,4
Alcalinidad( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ )	637	629	610
Acidez ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ )	7	9	14
S.S.T(ppm)	2100	1800	2000
S.D.T (ppm)	2490	2300	2900

Tabla 25. Caracterización fisicoquímica después de realizar una dosificación óptima de lechada de cal al ciclo de enfriamiento.

CICLO ENFRIAMIENTO	Densidad lechada cal (°Be)			
	13	12	11	10
Parámetros				
pH	6,8	6,8	7	6,9
Turbiedad (NTU)	285	246	230	298
Conductividad (μSm/cm)	489	451	443	465
Dureza(mgCaCO3/L)	200,8	235	240	220,8
Alcalinidad(mgCaCO3/L)	208,8	210	220	212
Acidez (mgCaCO3/L)	14,4	12	14	16
S.S.T(ppm)	320	430	290	420
S.D.T (ppm)	535	540	500	680

Ahora se tienen dos caracterizaciones, las obtenidas en el análisis del objetivo 1 y las anteriores después de haber realizado la corrección de pH con la lechada de cal respectiva.

A continuación se realiza el cálculo del índice de Langelier para la primera caracterización del afluente ciclo de lavado de caña, los datos de la tabla 17 son:

pH= 4,68

Temperatura (°C): 31,13 = 301,33K

Conductividad (μSm/cm): 391,74

Dureza (mgCaCO3/L): 157,46

Alcalinidad (mgCaCO3/L): 88

Sólidos Disueltos Totales (ppm):471,70

Recordando la ecuación (19), se tiene que:

$$pH_s = Pk_2 - Pk_s + p[Ca_t] + p[Alk_t] + 5p f_m$$

Determinación del  $Pk_2$ :

Se tiene de la tabla 14 unos valores precalculados para  $Pk$  según la temperatura, el dato de  $Pk_2$  para 30°C es:

$$Pk_2 @ 30^\circ C = 10,29$$

Para datos cuya temperatura no esta dentro de la tabla 14, el  $Pk_2$  correspondiente se calcula a partir de la ecuación (20) la cual depende de la temperatura manejada en el sistema.

#### Determinación del $Pk_s$ :

Recuerde que el  $pK_s$  se calcula en función del isomorfo de  $CaCO_3$  más propenso a formarse en el sistema acuoso, para nuestro caso, el isomorfo que tiende a formarse es la calcita, ya que el oxido de calcio utilizado en la corrección del pH, proviene de la caliza la cual es rica en calcita.

De nuevo volviendo a la tabla 14 se tiene que el  $Pk_s$  para la calcita a  $30^\circ C$  es:

$$P_{K_{sc}} @ 30^\circ C = 8,51$$

Si la temperatura que se tiene no se encuentra en la tabla 14 se puede calcular su  $pK_{sc}$  correspondiente con la ecuación (21) cual se encuentra en la tabla 13.

#### Determinación de $p[Ca_t]$ :

La dureza obtenida, se divide entre 40.000 mg/ gmol para llevar el dato hasta gmol/L asi:

$$[Cat] = \frac{157,46mg / L}{40.000mg / gmol} = 3,937 * 10^{-3} gmol / L$$

Por lo tanto se tiene que:

$$p [Ca_t]: 2,41$$

#### Determinación del $p[Alk_t]$ :

De manera análoga, la alcalinidad obtenida, se lleva a gramo-equivalentes dividiendo el valor obtenido entre 50.000 mg/gequivalente, así:

$$[Alk_t] = \frac{88mg / L}{50.000mg / g - equivalente} = 1,76 * 10^{-3} g - equivalente / L$$

Por lo tanto se tiene que:

p [Alkt]: 2,76

### Determinación del 5p<sub>f<sub>m</sub></sub>

Para el cálculo de dicha variable, se tiene en cuenta las ecuaciones (27) y (28) de la tabla 13:

$$E = \frac{60954}{T + 116} - 68,937$$

$$E = \frac{60954}{301,33 + 116} - 68,937$$

$$E = 77,12$$

$$A = 1,85 \times 10^6 (ET)^{-1,5}$$

$$A = 1,85 \times 10^6 (77,12 \times 301,33)^{-1,5}$$

$$A = 0,52$$

Para el cálculo de “I” (fuerza iónica), se dispone de valores de conductividad y de sólidos disueltos totales, para efectos de comparación se procede a trabajar con ambos valores así:

Cuando se dispone de conductividad

$$I = 1,6 \times 10^{-5} C$$

$$I = 1,6 \times 10^{-5} (391,74)$$

$$I = 6,27 \times 10^{-3}$$

Cuando se dispone de TDS

$$I = \text{TDS} / 40\,000$$

$$I = 471,70 / 40\,000$$

$$I = 0,01$$

Finalmente se procede a calcular p<sub>f<sub>m</sub></sub> de la siguiente manera:

$$p_{f_m} = A \left[ \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0,3I \right] \text{ válido para } I < 0,5$$

$$pf_m(\text{En función de la conductividad}) = 0,52 \left[ \frac{\sqrt{6,27 \times 10^{-3}}}{1 + \sqrt{6,27 \times 10^{-3}}} - 0,3(6,27 \times 10^{-3}) \right] = 0,037$$

$$pf_m(\text{En función de los T.D.S.}) = 0,52 \left[ \frac{\sqrt{0,01}}{1 + \sqrt{0,01}} - 0,3(0,01) \right] = 0,046$$

Volviendo a la ecuación (19) se tiene que:

$$pH_s = Pk_2 - Pk_s + p[Ca_t] + p[Alk_t] + 5pf_m$$

$$pH_s (\text{En función de la conductividad}) = 10,29 - 8,51 + 2,41 + 2,76 + 5 \cdot 0,037$$

$$pH_s = 7,14$$

$$pH_s (\text{En función de T.D.S.}) = 10,29 - 8,51 + 2,41 + 2,76 + 5 \cdot 0,046$$

$$pH_s = 7,18$$

El índice de Langelier para el afluente lavado de caña es:

$$LSI = 4,68 - 7,14$$

$$LSI (\text{En función conductividad}) = - 2,46$$

$$LSI = 4,68 - 7,18$$

$$LSI (\text{En función de T.D.S.}) = - 2,5$$

Es de observar que el índice de saturación de carbonato de calcio solo cambia en 0,04 unidades si se trabaja con la conductividad o los T.D.S.

Los índices obtenidos para la primera caracterización de ambos ciclos se presentan a continuación:

Tabla 26. Comparación del índice de corrosividad del langelier para cada sistema al trabajar con sólidos disueltos totales o la conductividad.

Ciclos	Índice de saturación del carbonato de calcio (SI)			
	Afluente		Efluente	
	Función conductividad	Función T.D.S	Función conductividad	Función T.D.S
Lavado de caña	-2,46	-2,50	-2,42	-2,59
Promedio	-2,48		-2,50	
Ciclo enfriamiento	-2,94	-3,00	-2,78	-2,84
Promedio	-2,97		-2,81	

La tabla anterior muestra diferentes índices de saturación del carbonato de calcio, y todos son valores mayores a -2,0, los cuales según la tabla 10, el agua presenta una “corrosividad severa”, por otro lado se puede observar que para el ciclo lavado de caña su índice tiende a parecerse entre afluente y efluente ya que el proceso que se lleva a cabo no genera mayores cambios en las variables del índice de Langelier, para el ciclo de enfriamiento existe una diferencia mucho más marcada entre el índice del afluente y el efluente, indicando que los parámetros medidos son afectados por el proceso que se lleva a cabo en este sistema acuoso, (la generación de vacío por intercambio de calor, en tachos y evaporadores).

También cabe anotar que los índices obtenidos en función de la conductividad son siempre menores que los índices obtenidos en función de los sólidos disueltos totales, esto quiere decir que hay una gran cantidad de materia orgánica adicional en los sólidos disueltos que no se cuenta en la conductividad; a diferencia del postulado de Vitaly A. Prisyazhniuk en la sección teórica 4.6.3 la cual plantea que existe una igualdad entre la medida de conductividad y los sólidos disueltos totales en fuentes de aguas naturales, aquí podemos observar que para las aguas residuales industriales tal correlación no existe y es necesario realizar los cálculos para observar en cuanto difieren el uno del otro.

Después de observar cómo cambia el índice de corrosividad después de pasar por un sistema contaminante, es decir, en el afluente y efluente de cada ciclo, se procedió a calcular los índices de corrosividad para la segunda caracterización de las tablas 24 y 25, y compararlos con los índices de los efluentes antes de la dosificación, ya que para efectos de comparación estos son los puntos de dosificación de la lechada de cal; los datos obtenidos se observan a continuación:

*Tabla 27. Comparación del índice de corrosividad antes y después de una dosificación óptima de lechada de cal.*

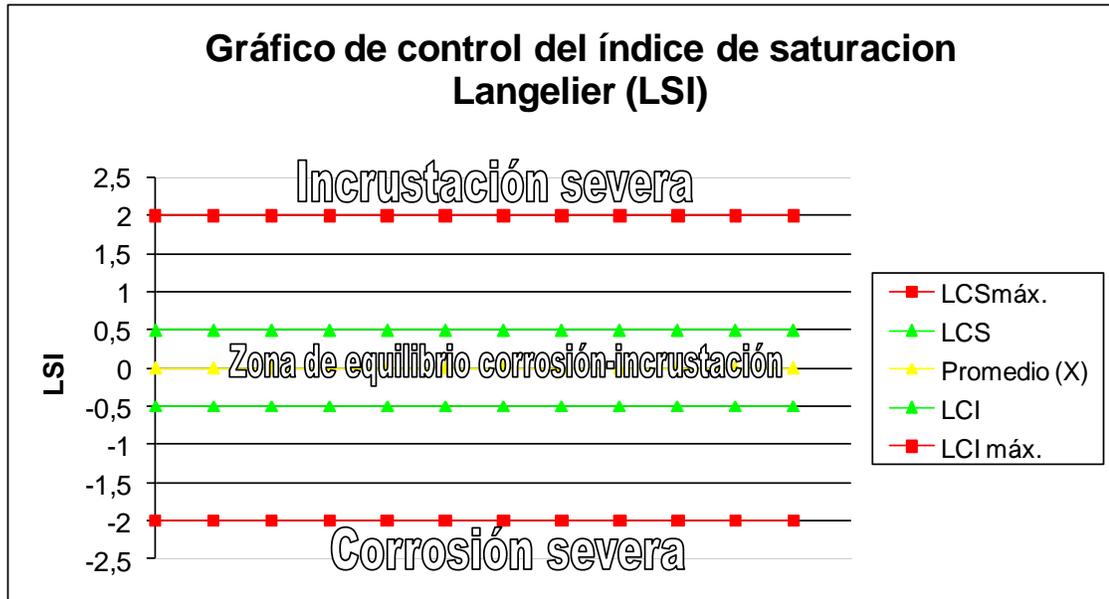
<b>Lechada de cal (°Bé)</b>	<b>Índice de corrosividad antes dosificación</b>	<b>Índice de corrosividad después dosificación</b>
Lavado de caña		
11	-2,50	0,99
12		1,18
13		1,19
Ciclo enfriamiento		
10	-2,81	0,21
11		0,29
12		0,45
13		0,28

Estos resultados generan un segundo criterio para elegir la dosificación correcta de lechada de cal para ambos ciclos, se tenía en la tabla 21 que la dosificación para el ciclo lavado de caña estaba entre 11-12°Bé, ahora bien, con el índice de saturación del carbonato de calcio se observa que la mayor reducción del índice de corrosividad se genera con la lechada de cal de 11°Bé.

Para el ciclo de enfriamiento también se puede inferir que hay un aumento del índice a medida que sube la concentración de la lechada de cal pero luego tiene un cambio repentino; en concordancia con la tabla 21, se decide que la mejor dosificación esta en 10°Bé, pero para efectos prácticos con la mezcladora la cual prepara la misma lechada de cal para ambos ciclos, se establece que la dosificación para el ciclo de enfriamiento puede ser también de 11°Bé ya que el índice de Langelier sube poco y la dosificación es igual (34,5ppm)

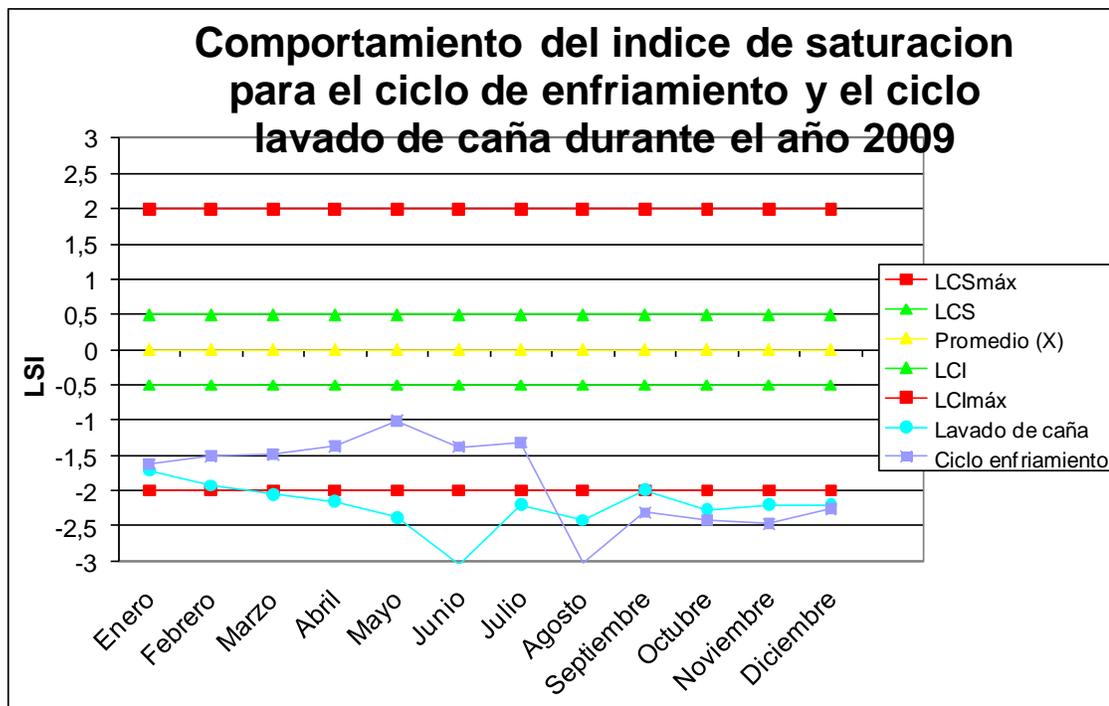
A este nivel, se vio oportuno desarrollar hojas de control para el índice de Langelier, y visualizar el comportamiento del circuito respecto a la dosificación de lechada de cal, este se encuentra conformado por un límite máximo de incrustación severa hacia valores superiores de 0,5 y una corrosividad severa para valores por debajo de -0,5, la zona de equilibrio se encuentra entre -0,5; 0; 0,5, no se debe olvidar que este índice es cualitativo y no depende de valores mayores o menores para indicar mayor o menor corrosividad.

Gráfico 8. Modelo del gráfico de control para el índice de saturación de Langelier.



Es así, como se procedió a tomar datos de pH durante todo el año 2009 y generar índices de corrosividad para los efluentes de ambos ciclos, tomando un pHs constante teórico tomados de la primera caracterización, los datos manejados se encuentran en el ANEXO H, a continuación se muestra el gráfico de control obtenido:

Gráfico 9. Comportamiento del índice de corrosividad en el año 2009 para ambos ciclos de aguas residuales.



El comportamiento del LSI para cada ciclo se encuentra por debajo de -1 durante el rango de Enero a Junio, pero hay una caída por debajo de -2 después de Julio manteniéndose constante, una razón para dicho cambio es la instalación de la piscina de enfriamiento la cual ocurrió entre los meses mayo y junio indicando una influencia físico-química a las aguas residuales de ambos circuitos.

## 7.2 ANALISIS DEL IMPACTO DE UN CICLO ADICIONAL A CADA SISTEMA DE AGUA RESIDUAL (LAVADO DE CAÑA Y CICLO DE ENFRIAMIENTO)

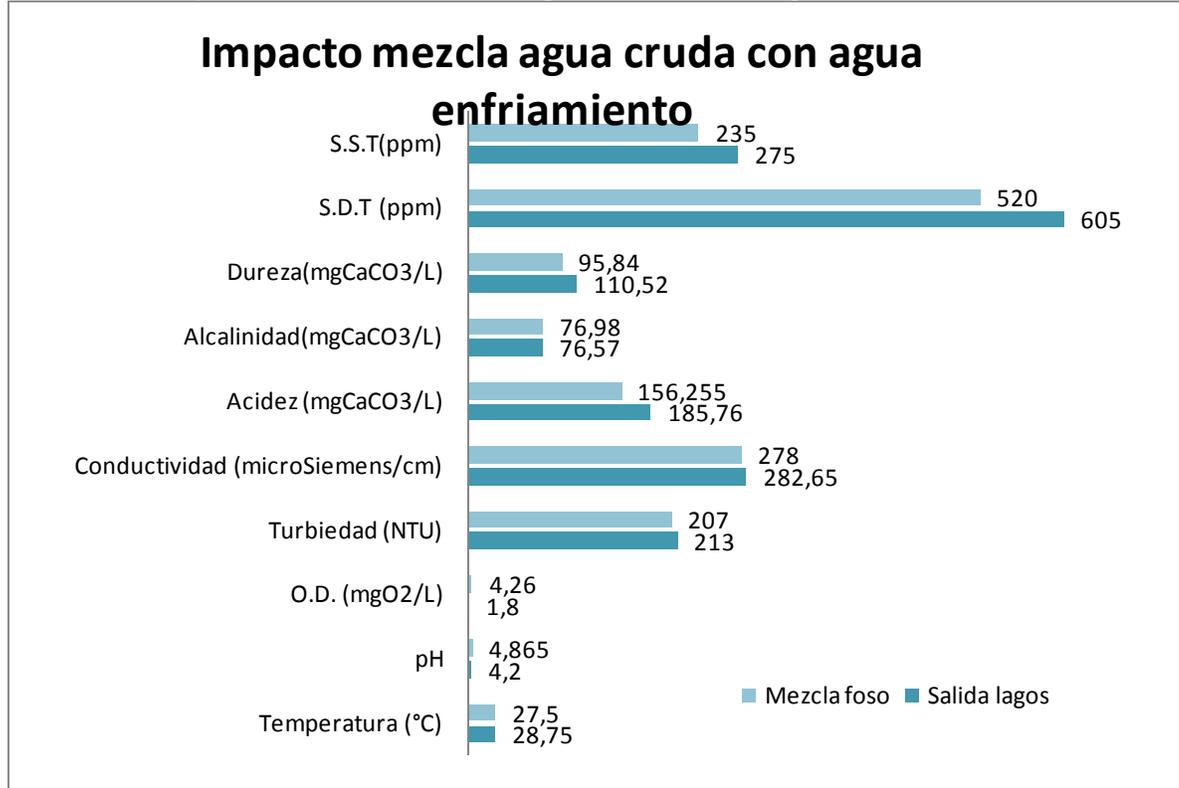
A medida que se conocían los sistemas en la fábrica, se observó que era importante evaluar qué tipo de impacto tenía la mezcla del desborde de agua cruda al ciclo de enfriamiento y el agua clarificada de piletas de cenizas al sistema de lavado de caña, el método general fue tomar muestras antes y después de la mezcla y por medio de una caracterización determinar cómo se ven afectados los sistemas estudiados y sus respectivos índices de Langlier.

7.2.1 Valoración del impacto de la mezcla de agua cruda con el agua de enfriamiento. El objetivo de esta actividad es analizar en qué condiciones viene el agua desde los lagos, comparar sus parámetros físicoquímicos cuando se mezcla con el agua cruda del desborde y ver qué tipo de impacto genera, las muestras para “salida lagos” se tomaron de la compuerta de lagos y aquellas para “mezcla en foso” se tomaron de foso de planta de agua, los datos obtenidos son los siguientes:

*Tabla 28. Valores promedio de los parámetros físicoquímicos del agua de enfriamiento*

	SALIDA LAGOS	MEZCLA EN FOSO (AGUA CRUDA + ENFRIAMIENTO)
PARAMETROS		
Temperatura (°C)	28,75	27,5
pH	4,20	4,865
O.D. (mgO <sub>2</sub> /L)	1,80	4,26
Turbiedad (NTU)	213	207
Conductividad (μS/cm)	282,65	278
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	185,76	156,255
Alcalinidad(mgCaCO <sub>3</sub> /L)	76,57	76,98
Dureza(mgCaCO <sub>3</sub> /L)	110,52	95,84
S.D.T (ppm)	605	520
S.S.T(ppm)	275	235

Grafico10. Impacto de la mezcla del agua cruda en el agua de enfriamiento



Los cambios más notables se dan en el pH y el oxígeno disuelto, es importante mencionar que el agua del ciclo de enfriamiento pasa por un largo tiempo de retención en los lagos del Ingenio Risaralda, y junto con algunas descargas del ciclo de lavado de caña a los mismos, se tiene un ambiente rico en materia orgánica, con alta temperatura, favoreciendo el crecimiento de bacterias, disminuyendo la cantidad de oxígeno disuelto hasta niveles cercanos a cero, y aumentando la acidificación en el medio, también se tiene presencia de sólidos suspendidos totales los cuales precipitan en el lago, formando una capa de lodos cuyo material destruye la fauna viviente en el fondo del lago, estos depósitos por contener material orgánico también disminuyen las reservas de oxígeno produciendo gases anóxicos como sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y posiblemente metano.

También se puede observar que la acidez a la salida de los lagos es algo mayor y el pH es bajo, confirmando la presencia de una actividad biológica productora de un medio ácido; la mezcla de esta agua con el desborde de agua cruda genera un alivio para el sistema ya que aumenta el pH hasta aprox. 4,9 y disminuye la acidez, también se genera una disminución de 1°C y baja la cantidad de sólidos disueltos y suspendidos totales.

Aunque en muestreos aleatorios hubo aumento de sólidos, turbiedad y conductividad, porque el agua cruda que provenía del río Mapa traía mucha suciedad afectando la mezcla, en un sentido general se considera que el efecto del desborde en el ciclo de enfriamiento es positivo porque alivia los parámetros afectados (pH, O.D, sólidos, temperatura, acidez) los cuales a su vez influyen en la corrosividad del agua y además ayuda a recuperar el agua que se pierde en el proceso por evaporación en la piscina de enfriamiento.

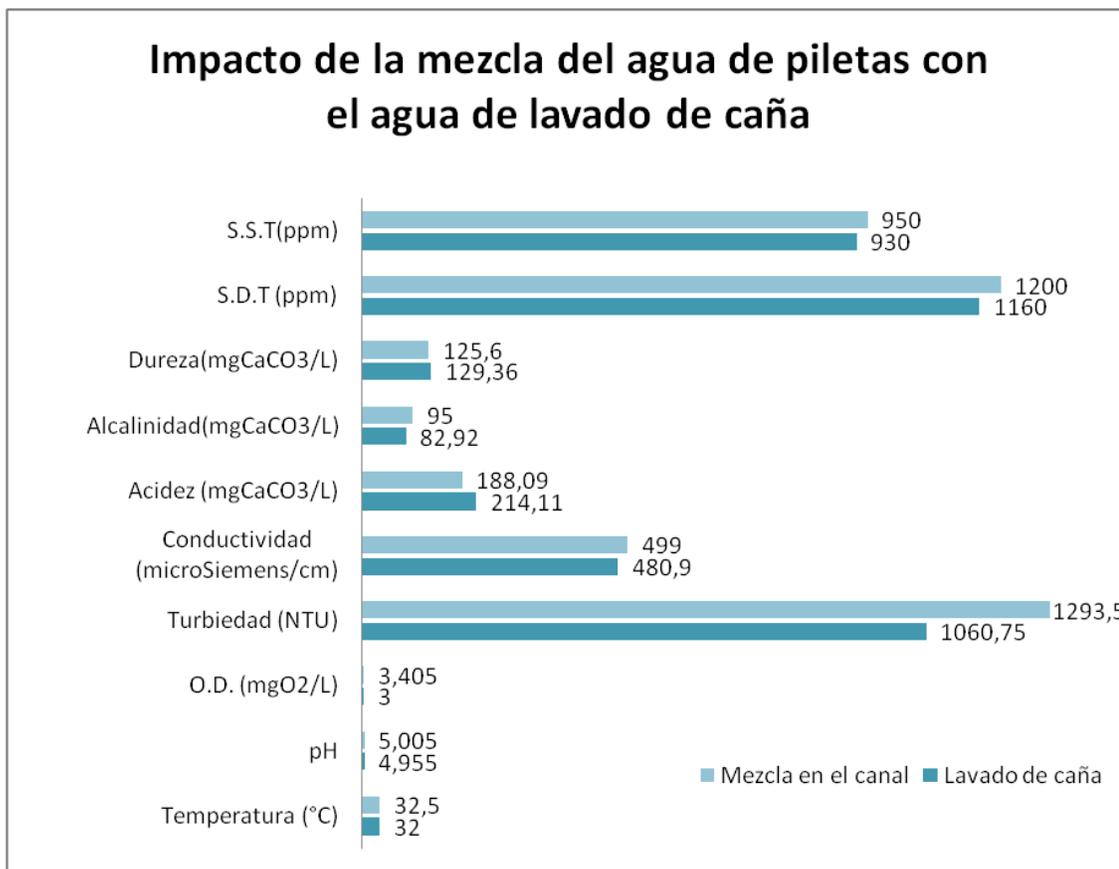
Así que si se llegara a cerrar el circuito de enfriamiento, se necesitaría un tratamiento mecánico y químico adicional para mejorar las características que el agua de desborde hace.

7.2.2 Valoración del impacto del agua de piletas de cenizas en el ciclo de lavado de caña. A continuación de manera análoga se muestran los datos promedio del análisis realizado al agua de lavado de caña antes y después de la mezcla con el agua de piletas:

*Tabla 29. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del agua lavado de caña antes y después de la mezcla con agua de piletas.*

	AGUA LAVADO DE CAÑA	MEZCLA EN CANAL (AGUA PILETAS + LAVADO)
PARAMETROS		
Temperatura (°C)	32	32,5
pH	4,955	5,005
O.D. (mgO <sub>2</sub> /L)	3	3,405
Turbiedad (NTU)	1060,75	1293,5
Conductividad (μS//cm)	480,9	499
Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	214,11	188,09
Alcalinidad(mgCaCO <sub>3</sub> /L)	82,92	95
Dureza(mgCaCO <sub>3</sub> /L)	129,36	125,6
S.D.T (ppm)	1160	1200
S.S.T(ppm)	930	950

Grafico 11. Impacto de la mezcla de agua de pileta con agua de lavado de caña.



Los resultados obtenidos arrojan un impacto casi nulo sobre el agua de lavado de caña, el aporte del agua de piletas es un aumento de sólidos suspendidos y sólidos disueltos, aumento en la conductividad, alcalinidad y temperatura, el único efecto positivo es un aumento en el pH y disminución de la acidez.

Las cenizas que vienen del agua de piletas es uno de los sólidos suspendidos más difíciles de eliminar, porque no sedimenta fácilmente e interfiere posiblemente con el proceso de corrección de pH del ciclo de interés, también se observa en este proceso que las piscinas encargadas de filtrar la ceniza no hacen su trabajo eficientemente ya que los operarios algunas veces la dejan llenar hasta su máximo límite generando un rebose de la ceniza; además las piedras que sirven de filtro necesitan de un constante mantenimiento de limpieza el cual no es realizado con regularidad, todo estos factores generan un agua sucia, cuyas características no son aceptables para la mezcla con el ciclo de lavado de caña ni tampoco para recirculación en caso de cerrar el circuito.

## 8. CONCLUSIONES

- En la primera caracterización para el ciclo de lavado de caña se encontró que el agua no cumple con su tratamiento de remoción de sólidos suspendidos, encontrándose un valor deficiente de 73.6 %.
- Valores tan altos de turbiedad encontrados en el ciclo lavado de caña no son deseados, lo que constituye un medio de defensa para los microorganismos presentes en el agua, ya que su potencial de desarrollo aumenta gracias al medio anóxico, en el que se encuentran, especialmente en el clarificador, la alta turbiedad es generalmente proporcionada por el agua filtrada de piletas de ceniza, dando otra razón para el posible cierre del circuito.
- Para la piscina de enfriamiento, se encontró que hay un delta de temperatura de 7.6°C, lo cual es un valor aceptable, considerando que el diseño de la piscina es disminuir hasta 10°C la temperatura del agua que llega de tachos y evaporadores.
- En la primera caracterización del ciclo de enfriamiento, se encontró una alta cantidad de sólidos disueltos y sales representadas en la conductividad, una alta temperatura característica de esta agua y un medio poco aireado y ácido, estos parámetros permiten un proceso de oxidación en los lagos del ingenio, evidenciado por la presencia de espumas, olores y alta acidez registrada en la actividad complementaria.
- Se concluye que la mejor dosificación de lechada de cal 11°Baumé para el ciclo de lavado de caña es de 240ppm y para el ciclo de enfriamiento es de 38.5ppm, realizado mediante titulaciones hasta un pH de 6.9-7.5 y apoyado con el índice de saturación de carbonato de calcio.
- Se concluye que el índice de Langlier cumple un efecto importante en el estudio de la corrosividad de las aguas residuales y que genera un criterio adicional a la hora de cualificar la naturaleza del sistema que se maneja.
- Los análisis para obtener el índice de Langlier no son de mayor dificultad y pueden ser adoptados por el laboratorio de aguas y el área de calderas para el control de los sistemas.
- El gráfico de control para el índice de corrosividad permite visualizar el comportamiento de un sistema acuoso a lo largo de un tiempo definido,

como también el efecto de ciertos cambios en la organización de la fábrica, dosificación de otros químicos, nuevos implementos , los cuales puedan afectar el sistema de interés, tal es el caso, del gráfico obtenido a lo largo del año 2009 en el cual se pudo apreciar una caída de casi una unidad en el índice de langellier después del mes julio, época en la que se puso a funcionar la piscina de enfriamiento.

- Se obtuvo una reducción en el gasto de bultos de cal y una mejor eficiencia en su manejo, ya que antes se consumía alrededor de 30 bultos /dia para un solo sistema, ahora se pueden consumir 20bultos /dia para los dos sistemas.
- Se concluye que el efecto del agua cruda sobre el agua de enfriamiento es positivo y que alivia el pH y otros factores importantes como la acidez y la temperatura, generando un ambiente mucho más satisfactorio.
- Se concluye que el efecto del agua de piletas tiene un efecto casi nulo, los parámetros de importancia como pH,y temperatura se ven levemente afectados, no hay mayores efectos en las demás variables y se considera mejor cerrar ambos circuitos para conservar la naturaleza de cada sistema acuoso.
- Con el manual de la planta de aguas residuales se logra integrar el manejo de la planta con la dosificación y la preparación de la lechada de cal en cada sistema, permitiendo así una línea de comunicación y soporte técnico del uso de cada componente entre operario, supervisor y jefe.

## 9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, una ampliación en la frecuencia de los análisis cuyos parámetros están relacionados con el índice de langelier, de por lo menos 2 veces a la semana, con el fin de obtener datos suficientes para realizar gráficos de control y observar el comportamiento de ambos ciclos.
- La corrección de pH para ambos ciclos se realiza en un punto crítico, justo antes del comienzo de alguna sección larga de tubería, propensa a la corrosión, para el caso del ciclo de enfriamiento se pone en consideración el mover el punto de dosificación de la lechada de cal y ponerla en la línea que sale de planta de agua hacia elaboración, porque allí comienza el sistema de tuberías de interés; la dosificación en planta de aguas residuales genera un efecto importante sólo en las tuberías de la piscina de enfriamiento y el resto se pierde como floculante y sedimento en los lagos.
- Se recomienda, en lo posible no mezclar el agua de lavado de caña con el agua de enfriamiento porque esto genera un ambiente más propenso a la oxidación orgánica, al aumento en la acidez y el pH del agua de enfriamiento
- Como propuesta complementaria, se plantea realizar futuros estudios en el efecto del material inorgánico del agua de piletas de cenizas, solo y con la mezcla de lavado de caña sobre la lechada de cal, como posible elemento coadyudante de las altas dosis de dosificación del ciclo de lavado de caña.
- Se sugiere, la implementación de una malla en el foso de aguas residuales, justo en la entrada que proviene del voskolver, para evitar taponamiento de las boquillas de la piscina de enfriamiento.
- Se debe poner en consideración el uso de algún inhibidor para el ciclo de enfriamiento, como el cromato, el cual funciona bien en aguas alcalinas teniendo en cuenta que la lechada de cal se esté dosificando debidamente, y sea un ayudante en el combate contra la corrosión.

## 10. BIBLIOGRAFIA

[1] Página Web HTML, [en línea], El agua, publicado 12 / 16 / 2009 [citado 28 de marzo 2010], < <http://www.scribd.com/doc/24189718/El-agua>, página 1-2>.

[2] Página Web HTML, [en línea], Película: El agua, publicado 18/02/2010 [citado 28 de marzo 2010], <<http://www.buenastareas.com/ensayos/Pelicula-El-Agua/125846.html>>.

[3] Página Web HTML, [en línea ], Determinación de turbidez MC Q. BOLAÑOS Guillén Arturo . Revisado Noviembre 2007 [citado 30 de marzo 2010], <<http://arturobola.tripod.com/turbi.htm>>. Universidad Autónoma de Tamaulipas

[4] Determinación de turbiedad en agua. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. Andrew D; Lenore S ; Eugene W. ; Arnold E. Método 2130 A-B. Sección 2-9 . APHA-AWWA-WPCF. 21<sup>st</sup> Edition, Centennial Edition. ISBN 0-87553-047-8 . ISSN: 55-1979. 2005 Washington D.C. U.S.A.

[5] Página Web HTML, [en línea], Catálogo instrumentos de medida <[http://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/doc\\_conductividad\\_electrica.asp?k=53](http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_conductividad_electrica.asp?k=53)>. Madrid, España. © Copyright Infoagro Systems, S.L.

[6] Determinación de conductividad en agua. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. Andrew D; Lenore S ; Eugene W. ; Arnold E. Método 2510 A-B. Sección 2-47 . APHA-AWWA-WPCF. 21<sup>st</sup> Edition, Centennial Edition. ISBN 0-87553-047-8 . ISSN: 55-1979. 2005 Washington D.C. U.S.A.

[7] OROZCO, Armando. Ingeniero Químico. Manual de operación y tratamiento de aguas en el Ingenio Risaralda, p 142-147. Universidad Nacional de Colombia, 1987

[8] Archivo PDF [en línea], Catálogo de laboratorio 2004 .1Edición. Crison. <[http://www.crison.es/pdfs/09/crison\\_9\\_1.pdf](http://www.crison.es/pdfs/09/crison_9_1.pdf)> España

[9] Determinación de pH en agua. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. Andrew D; Lenore S ; Eugene W. ; Arnold E. Método 4500B. Sección 4-90 . APHA-AWWA-WPCF. 21<sup>st</sup> Edition, Centennial Edition. ISBN 0-87553-047-8 . ISSN: 55-1979. 2005 Washington D.C. U.S.A.

[10] Archivo PDF [en línea], MASSOL, Arturo .Parámetros fisicoquímicos: alcalinidad, [citado 30 de marzo 2010], <<http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcaldinidad.pdf> páginas 1-5 >

[11] Archivo PDF [en línea]. Capítulo 9: Acidez. 2010. Fluoreciencia, Ciencia Para Todos [citado 30 de marzo 2010], <[http://atenea.udistrital.edu.co/grupos/fluoreciencia/capitulos\\_fluoreciencia/calaguas\\_cap9.pdf](http://atenea.udistrital.edu.co/grupos/fluoreciencia/capitulos_fluoreciencia/calaguas_cap9.pdf). Página1-2 >

[12] Determinación de acidez en agua. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. Andrew D; Lenore S ; Eugene W. ; Arnold E. Método 2310B. Sección 2-24. APHA-AWWA-WPCF. 21<sup>st</sup> Edition, Centennial Edition. ISBN 0-87553-047-8 . ISSN: 55-1979. 2005 Washington D.C. U.S.A.

[13] Página Web HTLM. Dureza y Ablandamiento del agua. Publicado 20/11/2006 [citado 02 de abril 2010], <<http://www.textoscientificos.com/quimica/dureza-ablandamiento-agua>>

[14] Determinación de dureza en agua. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. Andrew D; Lenore S ; Eugene W. ; Arnold E. Método 2340 C. Sección 2-37. APHA-AWWA-WPCF. 21<sup>st</sup> Edition, Centennial Edition. ISBN 0-87553-047-8 . ISSN: 55-1979. 2005 Washington D.C. U.S.A.

[15] ROMERO, Rojas Jairo Alberto. Acuiquímica. Capítulo 2: análisis físico del agua. Escuela Colombiana de Ingeniería. P 56-58. 1996. Bogotá.

[16] CHUNG Ching Chou Handbook of sugar refining. Chapter 30 Environmental Quality Assurance. P 540. Año 2000. USA. ISBN 0-471-18357-1  
Disponible online: <http://books.google.com.co/books>

[17] Aguas industriales, tratamiento de clarificación, intercambio iónico, Francisco Jara Acuña, Departamento técnico, EXRO LTDA, 4 Edición, 1983, Bogota p 13-14

[18] Archivo PDF [en línea], Uso del agua de la industria azucarera. Dirección de control de la contaminación del agua. [Citado 5 de abril 2010], <[http://repositorio.ine.gob.mx/ae/ae\\_00363.7394\\_m\\_495\\_-8.pdf](http://repositorio.ine.gob.mx/ae/ae_00363.7394_m_495_-8.pdf)> p73-75. México.

[19] Archivo PDF [en línea], VAZ. Cláudio. STAMILE Sérgio. DA SILVA José Oswaldo. Sistema para tratamiento de agua de ceniza de lavado de gases de calderas. P1-3 Engenho Novo Ltda. Brasil. [Citado 8 de abril 2010]. <[www.engenhonovo.com/es/artigostecnicos/df.pdf](http://www.engenhonovo.com/es/artigostecnicos/df.pdf)>

- [20] Industrial Water Treatment Seminar, Páginas 22-25 BETZ, International, Inc Treose Pennsylvania, Nov 1986
- [21] VENKATESWARLU. K.S. Chemistry, Industrial and power station water treatment. Chapter 4: water chemistry, material compatibility and corrosion. P27. NEW AGE INTERNATIONAL. NEW DELHI. 1996. ISBN (13): 978-81-224-2499-7
- [22] Página Web HTML. Tipos de corrosión. Publicado 05/12/2005 [citado 02 de abril 2010], <<http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion/tipos>>
- [23] JARA, Acuña Francisco. Aguas industriales, tratamiento de clarificación, intercambio iónico, Pág. 58-60 Departamento técnico, EXRO LTDA, 4 Edición, 1983, Bogotá.
- [24] Jairo Alberto Romero Rojas. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño (Tercera Edición) Segunda reimpresión. ISBN: 958-8060-13-3.
- [25] Página Web HTML. ¿Por qué la calcita causa incrustaciones en las maquinarias y tuberías hidráulicas, y la aragonita las evita? [Citado 05 de abril 2010], <<http://www.fluidforce.com/calcita/bienve.html>>. Fluid Force. España.
- [26] Determinación del índice de saturación del carbonato de calcio en agua. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. Andrew D; Lenore S ; Eugene W. ; Arnold E. Método 2330B. Sección 2-31. APHA-AWWA-WPCF. 21<sup>st</sup> Edition, Centennial Edition. ISBN 0-87553-047-8 . ISSN: 55-1979. 2005 Washington D.C. U.S.A.
- [27] PRISYAZHNIUK, Vitaly. Prognosticating scale-forming properties of water. En: Science direct. 8 December 2006, p2.
- [28] Página Web HTML. Corrosivity of Water and Saturation Indices. Publicado Julio 24-27 2000 [Citado 15 de abril 2010], <<http://www.corrosionsource.com/technicallibrary/corrdoctors/Modules/NaturalWaters/corrosivity.html>>

**ANEXO A. TABLA DE DOSIFICACION VS DENSIDAD RELATIVA DE LA LECHADA DE CAL (°BAUME) PARA UN VOLUMEN DE 500mL**

	Volumen a dosificación versus densidad de la lechada de cal en °Be para un volumen de 500 mL												
Dosificación ppm	1°Be	2°Be	3°Be	4°Be	5°Be	6°Be	7°Be	8°Be	9°Be	10°Be	11°Be	12°Be	13°Be
60	19,18	2,47	1,32	0,90	0,68	0,55	0,46	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23
70	22,38	2,89	1,54	1,05	0,80	0,64	0,54	0,46	0,41	0,36	0,33	0,30	0,27
80	25,58	3,30	1,76	1,20	0,91	0,74	0,62	0,53	0,46	0,41	0,37	0,34	0,31
90	28,77	3,71	1,98	1,35	1,03	0,83	0,69	0,60	0,52	0,47	0,42	0,38	0,35
100	31,97	4,12	2,20	1,50	1,14	0,92	0,77	0,66	0,58	0,52	0,47	0,42	0,39
110	35,17	4,54	2,42	1,65	1,26	1,01	0,85	0,73	0,64	0,57	0,51	0,47	0,43
120	38,37	4,95	2,65	1,80	1,37	1,10	0,92	0,79	0,70	0,62	0,56	0,51	0,47
130	41,56	5,36	2,87	1,96	1,48	1,20	1,00	0,86	0,76	0,67	0,61	0,55	0,51
140	44,76	5,77	3,09	2,11	1,60	1,29	1,08	0,93	0,81	0,72	0,65	0,59	0,55
150	47,96	6,19	3,31	2,26	1,71	1,38	1,16	0,99	0,87	0,78	0,70	0,64	0,58
160	51,15	6,60	3,53	2,41	1,83	1,47	1,23	1,06	0,93	0,83	0,75	0,68	0,62
170	54,35	7,01	3,75	2,56	1,94	1,56	1,31	1,13	0,99	0,88	0,79	0,72	0,66
180	57,55	7,42	3,97	2,71	2,05	1,66	1,39	1,19	1,05	0,93	0,84	0,76	0,70
190	60,75	7,84	4,19	2,86	2,17	1,75	1,46	1,26	1,10	0,98	0,89	0,81	0,74
200	63,94	8,25	4,41	3,01	2,28	1,84	1,54	1,32	1,16	1,04	0,93	0,85	0,78

**ANEXO B.DATOS CARACTERIZACION LAVADO DE CAÑA  
(AFLUENTE- SALIDA DEL CLARIFICADOR)**

Fecha	Temperatura	pH	Oxigeno Disuelto (mgO <sub>2</sub> /L)	Turbiedad (NTU)	Conductividad (μSm/cm)	Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Sólidos Disueltos (ppm)	Sólidos suspendidos (ppm)
11/09/2009	29,00	3,91	0,92	138,50	299,85	228,68	10,64	120,64	568,10	209,77
15/09/2009	30,00	4,70	0,12	470,00	321,00	230,55	64,52	95,28	420,37	279,63
16/09/2009	28,00	4,46	0,13	1087,00	430,95	344,71	76,84	140,96	650,85	669,15
17/09/2009	32,00	4,62	0,11	1136,00	549,90	349,05	110,36	202,40	710,00	450,00
18/09/2009	29,00	4,75	0,12	1110,00	515,50	350,05	123,56	220,64	723,54	386,46
22/09/2009	31,00	5,04	1,27	119,00	242,50	92,60	81,06	72,24	185,32	664,68
23/09/2009	34,00	5,02	0,15	290,50	445,00	171,98	114,86	320,32	233,50	166,50
24/09/2009	36,00	4,98	0,30	129,50	329,25	144,23	122,14	87,20	281,96	78,04
Promedio	31,13	4,68	0,39	560,06	391,74	238,98	88,00	157,46	471,70	363,03
Mínimo	28,00	3,90	0,10	119,00	242,50	92,60	10,60	72,20	185,32	78,04
Máximo	36,00	5,00	1,30	1136,00	549,90	350,10	123,60	320,30	723,54	886,46
Desviación Estándar	2,75	0,38	0,45	470,59	109,76	100,50	38,47	84,71	220,06	221,39

**ANEXO C.DATOS CARACTERIZACION LAVADO DE CAÑA  
(EFLUENTE- FOSO RESIDUALES A CLARIFICADOR)**

Fecha	Temperatura	pH	Oxigeno Disuelto (mg O2/L)	Turbiedad (NTU)	Conductividad (µSm/cm)	Acidez (mgCaCO3/L)	Alcalinidad (mgCaCO3/L)	Dureza (mgCaCO3/L)	Sólidos Disueltos (ppm)	Sólidos suspendidos (ppm)
11/09/2009	29,00	4,00	0,26	148,50	307,30	205,48	8,20	190,56	880,02	1880,32
15/09/2009	29,00	4,76	0,67	693,50	367,25	177,50	75,76	125,76	446,97	803,03
16/09/2009	28,00	4,46	1,35	1269,50	435,25	315,81	69,22	142,88	690,63	859,38
17/09/2009	30,00	4,69	0,12	1476,50	556,90	281,15	98,86	223,28	1613,89	986,11
18/09/2009	28,00	4,83	0,72	1175,50	527,50	269,51	108,36	223,36	975,83	1784,17
22/09/2009	30,00	5,14	0,69	223,50	304,00	80,29	79,32	106,08	1609,17	2590,83
23/09/2009	34,00	5,04	1,07	387,00	354,50	95,44	71,66	185,12	307,22	672,78
24/09/2009	34,00	5,06	0,50	1008,00	392,35	117,86	91,44	152,48	1459,18	1420,82
Promedio	30,25	4,75	0,67	797,75	405,63	192,88	75,35	168,69	997,86	1374,68
Mínimo	28,00	4,00	0,10	148,50	304,00	80,30	8,20	106,10	307,20	672,78
Máximo	34,00	5,10	1,30	1476,50	556,90	315,80	108,40	223,40	1613,89	2590,83
Desviación Estándar	2,43	0,38	0,40	507,24	94,77	90,22	30,42	43,77	514,81	669,81

**ANEXO D. DATOS CARACTERIZACION CICLO ENFRIAMIENTO  
(AFLUENTE-FOSO PLANTA DE AGUA)**

	Temperatura	pH	Oxígeno Disuelto (mg O <sub>2</sub> /L)	Turbiedad (NTU)	Conductividad (μSm/cm)	Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Sólidos Disueltos (ppm)	Sólidos suspendidos (ppm)
01/10/2009	26,00	4,21	3,80	393,00	249,50	173,41	18,08	48,56	498,20	298,34
02/10/2009	28,00	4,29	4,19	268,50	204,50	173,84	31,08	76,16	345,00	230,00
07/10/2009	28,00	4,60	2,59	201,00	171,95	106,73	37,30	73,60	232,00	48,00
08/10/2009	28,00	4,80	4,24	146,00	283,50	135,36	71,34	185,76	359,30	80,70
09/10/2009	27,00	4,94	3,64	155,50	278,00	128,46	69,72	126,56	35,00	45,00
13/10/2009	27,00	4,78	4,09	120,50	305,50	185,86	86,90	99,20	380,00	150,00
14/10/2009	28,00	4,90	3,90	180,00	218,00	124,00	44,20	101,20	409,29	283,54
Promedio	27,43	4,64	3,78	209,21	244,42	146,81	51,23	101,58	322,68	162,23
Mínimo	26,00	4,21	2,59	120,50	171,95	106,73	18,08	48,56	35,00	45,00
Máximo	28,00	4,94	4,24	393,00	305,50	185,86	86,90	185,76	498,20	298,34
Desviación Estándar	0,79	0,29	0,57	93,95	48,23	30,43	25,06	44,64	149,68	109,10

**ANEXO E.DATOS CARACTERIZACION CICLO ENFRIAMIENTO  
(EFLUENTE- FOSO ENFRIAMIENTO RESIDUALES)**

	Temperatura	pH	Oxigeno Disuelto (mg O <sub>2</sub> /L)	Turbiedad (NTU)	Conductividad (μS/cm)	Acidez (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Dureza (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Sólidos Disueltos (ppm)	Sólidos suspendidos (ppm)
01/10/2009	35,00	4,22	1,30	446,00	266,00	135,20	16,50	47,84	433,90	358,73
02/10/2009	35,00	4,42	2,46	271,00	203,00	175,88	40,52	86,32	510,00	170,00
07/10/2009	31,00	4,70	1,50	199,00	171,80	91,25	32,34	67,52	218,39	91,61
08/10/2009	34,00	4,83	1,25	144,50	289,00	125,70	66,08	148,96	154,02	135,98
09/10/2009	39,00	4,91	0,88	150,00	298,00	129,99	67,38	179,92	107,61	112,39
13/10/2009	35,00	4,72	2,82	122,50	323,00	158,08	85,92	95,04	530,00	160,00
14/10/2009	36,00	4,90	1,00	177,00	194,00	129,00	41,90	96,80	398,78	198,02
Promedio	35,00	4,67	1,60	215,71	249,26	135,01	50,09	103,20	336,10	175,25
Mínimo	31,00	4,22	0,88	122,50	171,80	91,25	16,50	47,80	107,61	91,61
Máximo	39,00	4,91	2,82	446,00	323,00	175,88	85,92	179,92	530,00	359,73
Desviación Estándar	2,38	0,26	0,74	112,51	58,97	26,66	23,95	46,03	173,47	88,44

**ANEXO F. TABLAS DE TITULACIÓN DE LECHADA DE CAL HASTA PH (6.9-7.5) AL AGUA DEL CICLO LAVADO DE CAÑA**

	Dosis Lechada cal 3 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	270	280	290	300
pH	4,9	6,3	6,5	6,9	7,22
Turbiedad (NTU)	5200	2400	2200	1700	1600
Conductividad(μSm/cm)	675	976	988	1011	1035

	Dosis Lechada cal 4 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	230	240	250	260
pH	4,94	6,1	6,65	7,25	7,5
Turbiedad (NTU)	8540	3100	2600	2300	1900
Conductividad(μSm/cm)	650	940	950	972	986

	Dosis Lechada cal 5 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	370	380	390	400
pH	4,8	6,69	6,85	7,04	7,55
Turbiedad (NTU)	5600	2100	1950	1813	1770
Conductividad(μSm/cm)	700	732	747	764	776

	Dosis Lechada cal 6 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	320	330	340	350
pH	4,75	6,32	6,8	7,1	7,5
Turbiedad (NTU)	2000	1425	1240	1222	1050
Conductividad(μSm/cm)	440	705	742	773	796

	Dosis Lechada cal 7°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	250	260	270	280
pH	4,88	6,3	6,45	6,9	7,5
Turbiedad (NTU)	2040	1260	1130	1064	1008
Conductividad( $\mu$ Sm/cm)	455	689	715	721	737

	Dosis Lechada cal 8°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	260	270	280	290
pH	4,65	5,9	6,4	6,95	7,30
Turbiedad (NTU)	2210	2170	1980	1870	1740
Conductividad( $\mu$ Sm/cm)	500	580	610	740	890

	Dosis Lechada cal 9°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	220	230	240	250
pH	5,2	5,7	6,3	6,77	7,3
Turbiedad (NTU)	1980	1870	1665	1510	1400
Conductividad( $\mu$ Sm/cm)	800	840	860	890	900

	Dosis Lechada cal 10°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	240	250	260	270
pH	4,72	5,83	6,32	6,9	7,46
Turbiedad (NTU)	2040	1440	1380	1240	1140
Conductividad( $\mu$ Sm/cm)	450	730	811	824	856

	Dosis Lechada cal 11°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	210	220	230	240
pH	4,80	5,2	5,6	6,5	7,52
Turbiedad (NTU)	2050	1980	1834	1745	1654
Conductividad(μSm/cm)	600	650	780	840	900

	Dosis Lechada cal 12°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	200	210	220	230
pH	5.2	5.9	6.1	6.7	7.24
Turbiedad (NTU)	2500	2460	2300	2240	2110
Conductividad(μSm/cm)	700	780	842	900	940

	Dosis Lechada cal 13°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	205	231	256	282
pH	4,82	6,3	6,7	7,4	8,3
Turbiedad (NTU)	2035	1140	1265	1320	1140
Conductividad(μSm/cm)	455	738	767	779	798

**ANEXO G. TABLAS DE TITULACIÓN DE LECHADA DE CAL HASTA PH (6.9-7.5) AL AGUA DEL CICLO DE ENFRIAMIENTO**

	Dosis Lechada cal 2ºBe ppm (mg/L)				
Parámetros	0	130	140	150	160
pH	4,9	5,7	5,94	7,3	7,5
Turbiedad (NTU)	253	239	234	231	225
Conductividad(µSm/cm)	297	434	451	513	522

	Dosis Lechada cal 3ºBe ppm (mg/L)				
Parámetros	0	90	100	110	120
pH	5,2	5,85	6,56	6,85	7,2
Turbiedad (NTU)	380	278	269	265	250
Conductividad(µSm/cm)	650	364	413	417	425

	Dosis Lechada cal 4ºBe ppm (mg/L)				
Parámetros	0	80	90	100	110
pH	5,04	6,3	6,5	6,75	8
Turbiedad (NTU)	290	249	244	242	240
Conductividad(µSm/cm)	270	408	410	430	443

	Dosis Lechada cal 5ºBe ppm (mg/L)				
Parámetros	0	70	80	90	100
pH	5,5	6,77	7,5	9,4	9,7
Turbiedad (NTU)	210	200	195	185	180

Conductividad( $\mu\text{Sm}/\text{cm}$ )	227	315	329	333	342
---	-----	-----	-----	-----	-----

	Dosis Lechada cal 6 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	110	120	130	140
pH	5,55	6,04	6,24	6,99	8,8
Turbiedad (NTU)	210	202	190	180	175
Conductividad( $\mu\text{Sm}/\text{cm}$ )	227	262	277	302	316

	Dosis Lechada cal 7 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	30	40	50	60
pH	4,82	5,4	6,7	7,85	9,2
Turbiedad (NTU)	395	358	365	377	389
Conductividad( $\mu\text{Sm}/\text{cm}$ )	316	503	620	625	654

	Dosis Lechada cal 8 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	50	60	70	80
pH	4,3	5,0	6,4	7,2	8,3
Turbiedad (NTU)	510	490	488	476	450
Conductividad( $\mu\text{Sm}/\text{cm}$ )	340	350	420	480	550

	Dosis Lechada cal 9 <sup>o</sup> Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	10	20	30	39
pH	5,2	5,8	6,3	6,7	7,4
Turbiedad (NTU)	450	430	412	398	387
Conductividad( $\mu\text{Sm}/\text{cm}$ )	210	259	341	368	410

	Dosis Lechada cal 10°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	10	20	30	38,6
pH	5,3	5,7	6,2	6,6	7,4
Turbiedad (NTU)	313	304	298	281	270
Conductividad(μSm/cm)	438	450	478	490	510

	Dosis Lechada cal 11°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	10	20	30	38,4
pH	5,1	5,7	5,9	6,4	6,9
Turbiedad (NTU)	340	320	301	287	262
Conductividad(μSm/cm)	300	324	338	359	371

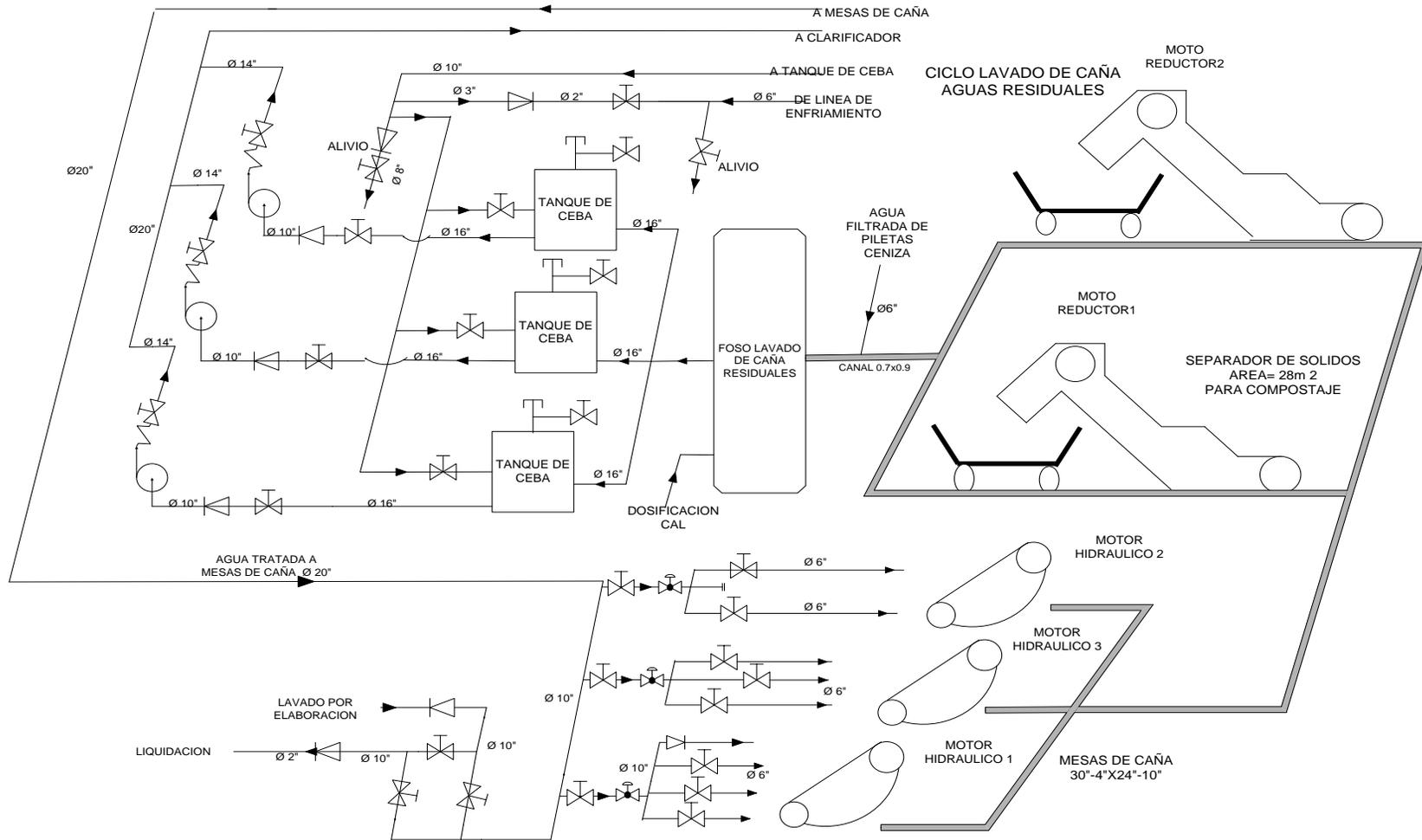
	Dosis Lechada cal 12°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	10	20	30	38,5
pH	4,9	5,1	5,6	5,9	6,5
Turbiedad (NTU)	348	367	389	410	433
Conductividad(μSm/cm)	265	287	312	329	350

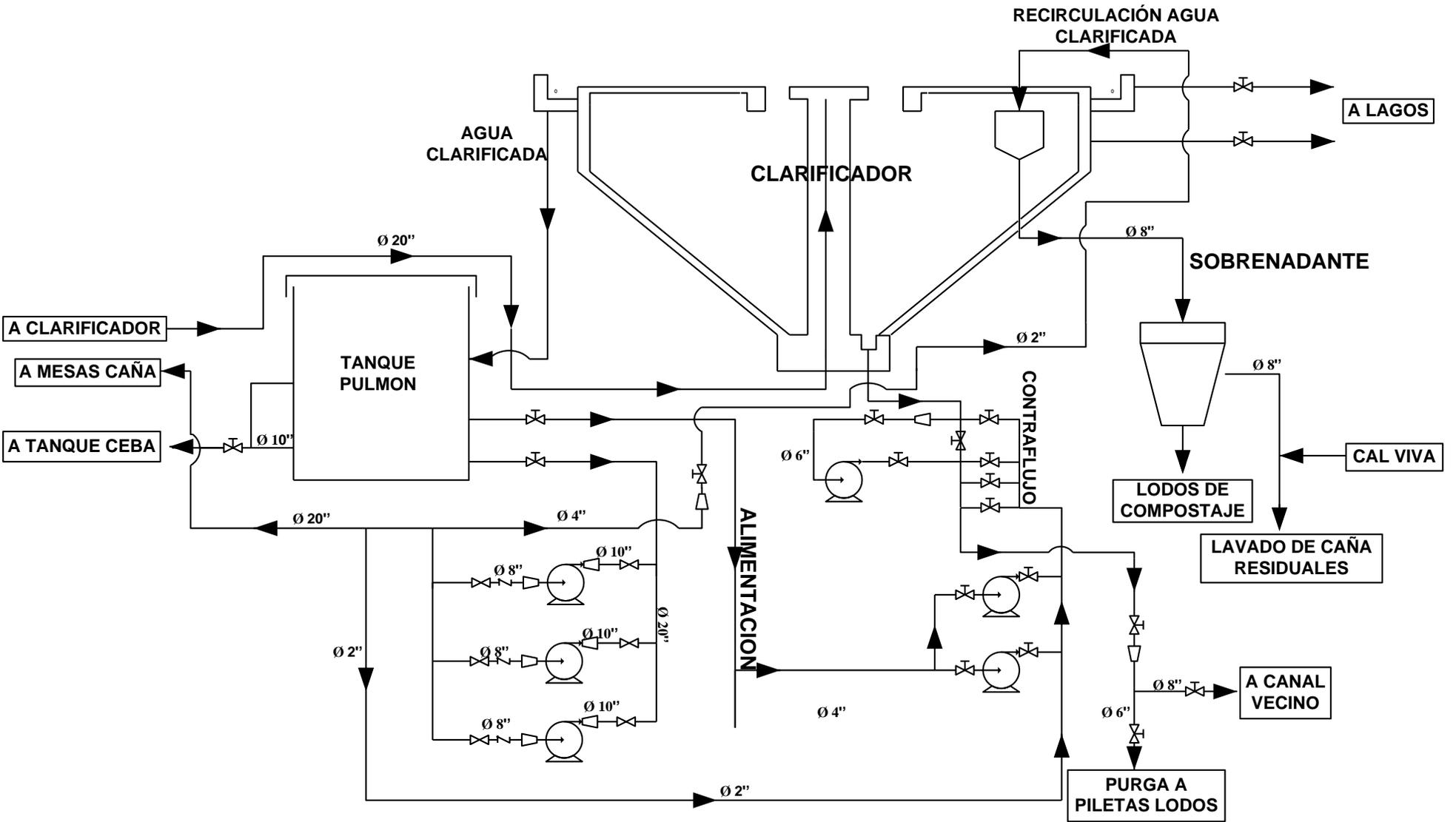
	Dosis Lechada cal 13°Be ppm (mg/L)				
Parámetros	0	10	20	30	38,5
pH	5,1	5,4	5,9	6,3	6,9
Turbiedad (NTU)	550	532	519	497	488
Conductividad(μSm/cm)	369	389	419	422	446

**ANEXO H.INDICE DE CORROSIVIDAD PARA AMBOS CICLOS EN EL AÑO 2009**

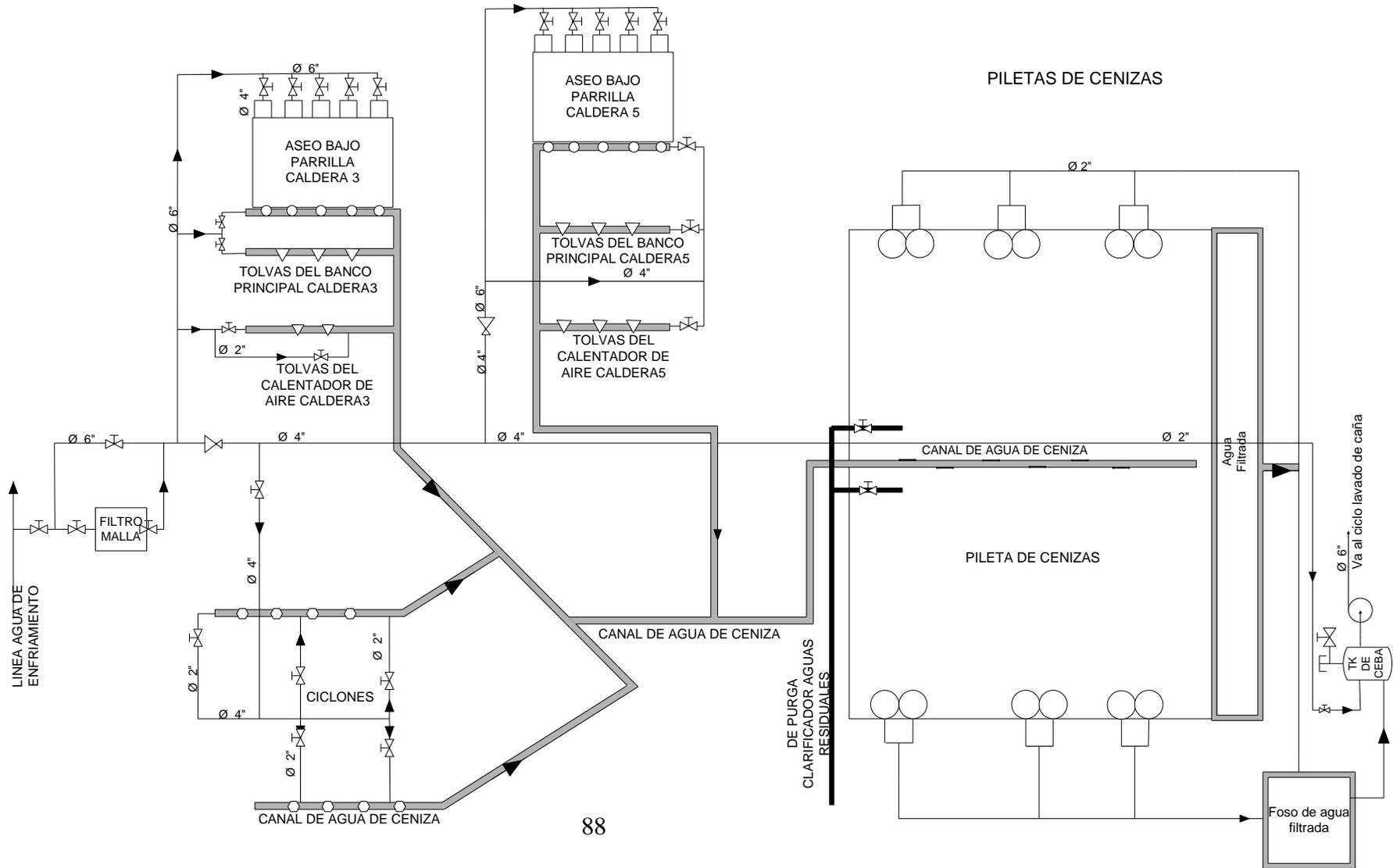
<b>Meses</b>	<b>Lavado de caña</b>		<b>LSI</b>	<b>Enfriamiento</b>		<b>LSI</b>
	<b>pH Real</b>	<b>pH equilibrio</b>		<b>pH real</b>	<b>pH equilibrio</b>	
<b>Enero</b>	5,45	7,17	-1,72	5,9	7,52	-1,62
<b>Febrero</b>	5,24	7,17	-1,93	6,01	7,52	-1,51
<b>Marzo</b>	5,12	7,17	-2,05	6,03	7,52	-1,49
<b>Abril</b>	5,02	7,17	-2,15	6,15	7,52	-1,37
<b>Mayo</b>	4,79	7,17	-2,38	6,51	7,52	-1,01
<b>Junio</b>	4,13	7,17	-3,04	6,14	7,52	-1,38
<b>Julio</b>	4,97	7,17	-2,2	6,2	7,52	-1,32
<b>Agosto</b>	4,75	7,17	-2,42	4,5	7,52	-3,02
<b>Septiembre</b>	5,18	7,17	-1,99	5,21	7,52	-2,31
<b>Octubre</b>	4,9	7,17	-2,27	5,1	7,52	-2,42
<b>Noviembre</b>	4,97	7,17	-2,2	5,05	7,52	-2,47
<b>Diciembre</b>	4,97	7,17	-2,2	5,26	7,52	-2,26

## ANEXO I. DIAGRAMA DEL CICLO LAVADO DE CAÑA

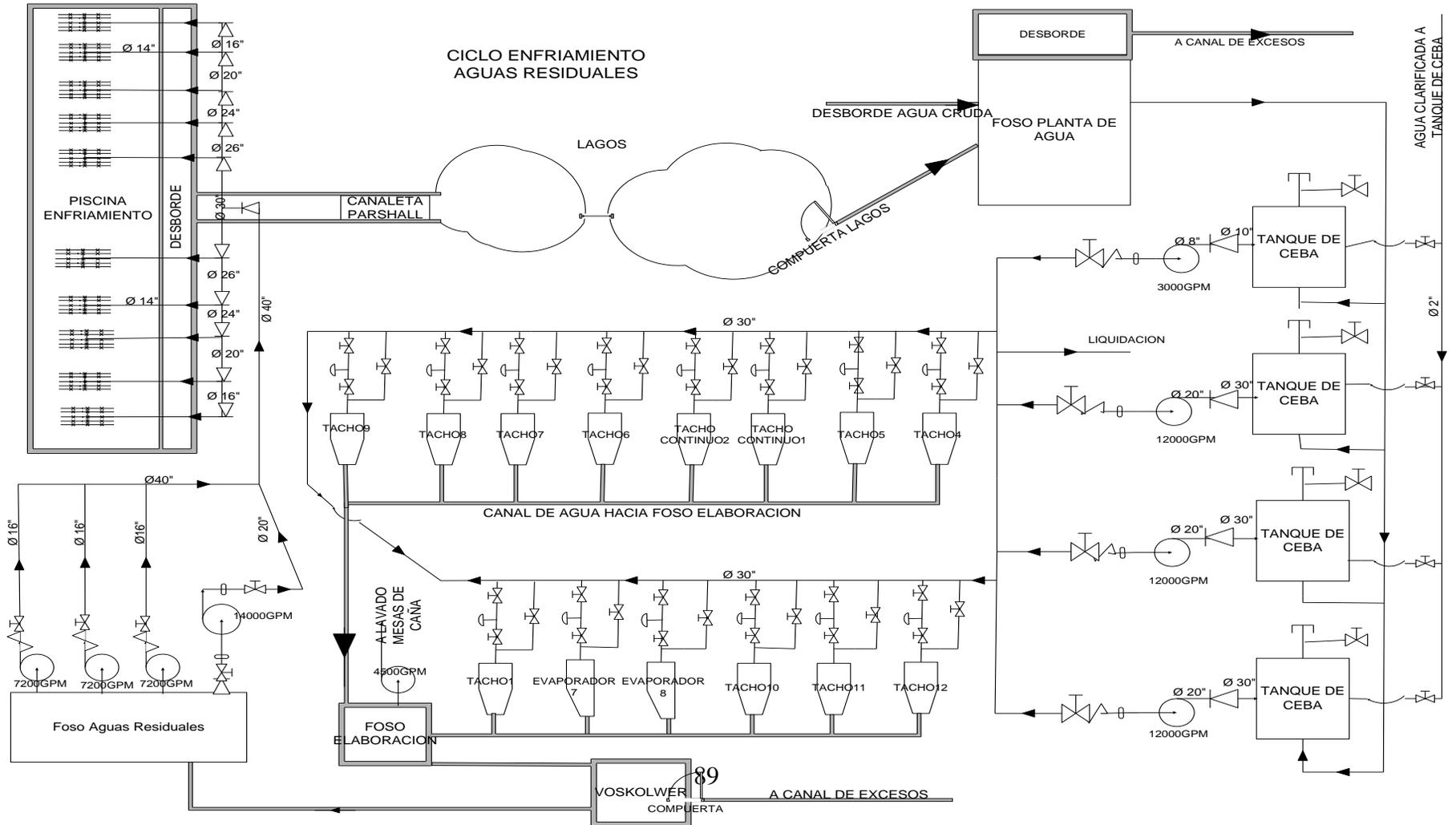




## ANEXO J. DIAGRAMA DEL CICLO DE PILETAS



## ANEXO K. DIAGRAMA DEL CICLO DE ENFRIAMIENTO



 <p data-bbox="365 289 553 352"><b>INGENIO RISARALDA</b></p>	<p data-bbox="586 201 987 342"><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p data-bbox="1019 218 1214 289"><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
---	---	--

## **ANEXO L.MANUAL DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A**

### **1. CICLO LAVADO DE CAÑA.**

- 1.1. Mesas de caña.
- 1.2. Separador de sólidos y hojarasca.
- 1.3. Foso de Succión.
  - 1.3.1. Cebar bombas.
  - 1.3.2. Válvula de estrangulación o regulación.
- 1.4 Clarificador
  - 1.4.1 Purga de sobrenadante.
  - 1.4.2 Purga de lodos.
- 1.5 Lavado de caña por elaboración.

### **2. PILETAS DE CENIZAS**

- 2.1 Aducción.
- 2.2 Lavado de ceniza en húmedo.
- 2.3 Filtración de agua.

### **3. CICLO DE ENFRIAMIENTO.**

- 3.1. Aducción.
- 3.2 Foso de Succión.
- 3.3 Generación de vacío en tachos y evaporadores.
  - 3.3.1. Elaboración y refinería.
- 3.4 Foso succión a piscina.
- 3.5 Piscina de enfriamiento.



INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**

## 1. CICLO LAVADO DE CAÑA

El proceso de recirculación del agua de lavado de caña consiste en un circuito cerrado en el cual el agua es tratada para remover sólidos provenientes de la mesas de caña y ceniza con bagacillo de las piletas de lodos gracias a un clarificador y un removedor de sólidos y hojarasca.

### 1.1 Mesas de caña

La caña es lavada en estas mesas las cuales a su vez son movidas por unidades hidráulicas, encima de ellas hay tres flautas controladas por medio de válvulas neumáticas accionadas desde una cabina de control para adicionar agua cruda y lavar el exceso de tierra y hojas de la caña.

Unidad hidráulica: 48 HP / 1730 RPM

### 1.2 Separador de sólidos y hojarasca

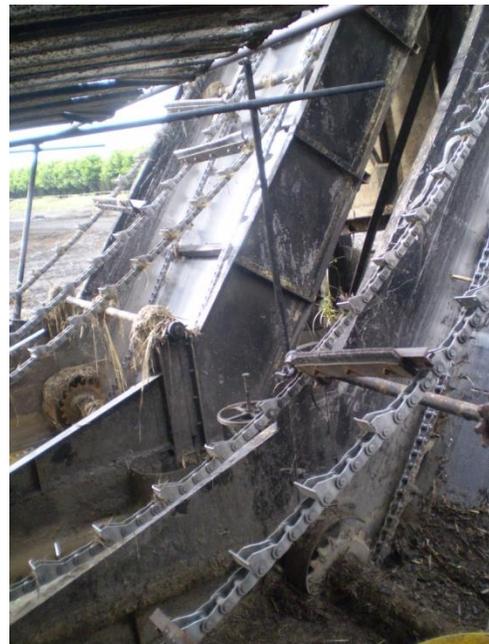
El agua después del lavado de caña pasa a través de dos sistemas filtrantes (separadores de sólidos y hojarasca), los cuales constan de una malla sujeta a unas cadenas controladas por un moto reductor; cada cadena se mueve hacia arriba arrastrando hojas y sólidos grandes del agua hasta el final del separador, para luego ser recogidos por un vagón y llevarlos a compostaje, el agua que queda en el canal sigue su recorrido hacia planta de aguas residuales

Los separadores tienen:

2 Motores: 12,5 HP / 440-460 V / 60 Hz / 20 A  
Código: F01658, F01745

2 Reductores: 15 HP / 45,6 Ratio/ 1755 RPM  
Código: F03312, F03313.

Figura 1: Separadores de sólidos y hojarasca





INGENIO  
RISARALDA

MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.

FECHA EXP:  
Mayo/2010

### 1.3 Foso de Succión



Después de recorrer 500 metros el caudal de agua llega a un foso de succión que contiene una rejilla para retener los sólidos que no pudieron ser arrastrados en el separador de hojarasca, y parte del bagacillo proveniente de las piletas de lodos. Dependiendo de los caudales de agua y la carga de sólidos, el operador debe recoger con un rastrillo el exceso de partículas que son retenidas por la rejilla.

Figura 2: Rejilla entrada foso de lavado de caña.

El agua llega a un foso y es succionada a través de una tubería empleando 3 bombas antiatascantes con tanque de ceba de las siguientes características:

Figura 3: Bombas al clarificador





INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**

Códigos: F024160, F024150, F024170  
Capacidad: 3000Gal/minuto  
Potencia: 75HP  
Amperaje: 95AMP  
Velocidad de operación: 1775 RPM  
Tipo: Antiatascante  
Marca: ITT PUMP

Las bombas son controladas por medio de una caja de control ubicada en planta de aguas residuales, estas se prenden oprimiendo el botón y se apagan con el botón negro, antes de prenderlas es necesario cebarlas como se explica a continuación.

#### 1.3.1.Cebar las bombas:

Las bombas no entregan caudal cuando no están cebadas y estarían funcionando en seco. Cuando se arranca una bomba y esta no este bien cebado, es decir, no esta completamente llena de fluido y el aire no se ha sacado por completo el sistema no puede funcionar correctamente, produciéndose un calentamiento del caracol.

##### ◆ *Pasos para cebar la bomba:*

1. Revisar si tiene aire, abriendo una válvula azul, como se observa en la fotografía.

Si el tanque no contiene aire, saldrá un chorro continuo de agua , en caso de tener aire, se obtendrá un flujo de agua inestable y discontinuo.



Figura 4: Válvula de verificación.



INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**



Si se confirma que hay aire se procede con el paso 2.

2. Apagar la bomba

3. Abrir la válvula gris de la línea de ceba y la válvula roja ubicada en la parte superior del tanque para botar el aire contenido y reemplazarlo por agua durante 10 minutos.

4. Cerrar la válvula del tanque de ceba.

5. Prender de nuevo la bomba.

Figura 5: válvulas del tanque de ceba

### 1.3.2 Válvula de estrangulación o Regulación:

Tiene como objetivo regular el flujo de agua que succiona y entrega la bomba, la bomba se maneja de 100(open) hasta 0 (shut), esta válvula de estrangulación se mantiene abierta al 100%, ya que se recomienda un flujo de succión constante de la bomba.



Figura 6 : Válvula de regulación.

 <p data-bbox="440 289 626 352"><b>INGENIO RISARALDA</b></p>	<p data-bbox="662 201 1065 344"><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p data-bbox="1094 218 1289 289"><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
---	--	--

El agua es conducida por una tubería de 20” hacia el clarificador, para realizarle una remoción de sólidos y ceniza al agua.

#### 1.4Clarificador:

Las bombas anteriores alimentan un clarificador en concreto, de 43 metros de diámetro, con un sistema de agitación constituido de dos brazos opuestos radialmente, con un raspador inferior para conducir el lodo al cono central de descarga y un raspador superior que retira los sobrenadantes (ceniza y bagacillo) a un canal de recolección.

El agua clarificada es dirigida hacia un desborde en un canal periférico y luego es recolectada en un tanque pulmón, para ser llevada hacia las mesas de caña nuevamente; el porcentaje promedio de remoción de sólidos registrado es de 75%, una posible causa para la ineficiencia de este proceso es la falta de una buena dosificación de coagulante como la lechada de cal.

La dosificación sugerida para este sistema es aprox. 240 ppm con una lechada de cal de 11° Baumé (107,16 gCal al 90% /Lsln) y densidad de 1073900 mg / L; la velocidad de dosificación se calcula de la siguiente manera:

$$Q = \frac{q * c}{\delta} * 60$$

Donde:

Q= Velocidad de dosificación (L/minuto)

q= Nivel del caudal (LPS)

c= Dosificación recomendada de lechada de cal (ppm= mg/L)

δ = Densidad lechada de cal 11°Baumé (mg/L)

 <p>INGENIO RISARALDA</p>	<p><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
--	---	--

*Tabla 5: Dosificación de lechada de cal 11° Baumé para el ciclo lavado de caña en función de la altura del caudal*

Altura Caudal (cm)	Caudal Agua a dosificar (LPS)	Volumen aprox. De Lechada ( L/minuto)
65	111,223	1,491
70	121,708	1,632
75	132,357	1,775
80	143,160	1,920
85	154,109	2,066
90	165,199	2,215
95	176,422	2,366
100	187,774	2,518

Nota: La velocidad del caudal se calculó con la fórmula  
 $Q = 0.6954 \cdot H^{1.2157}$

Preparación de la lechada de cal en la planta:

A continuación se presenta la cantidad de cal sólida viva, con un contenido aprovechable de 90% en óxido de calcio, que se requiere para preparar 1000L en la mezcladora de planta de aguas residuales:

11°Be = 107,16 gCaO pura / Lsln

$$\frac{107,16 \text{ gCaO} \cdot \text{pura}}{1 \text{ Lsln}} \times \frac{100 \text{ gdecal}}{90 \text{ gCaO} \cdot \text{pura}} \times \frac{1000 \text{ Lsln}}{1} \times \frac{1 \text{ Kgdecal}}{1000 \text{ gdecal}} = 119,1 \text{ Kgdecal}$$

Aprox. 2,5 bultos



INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**

Características Moto reductor Clarificador aguas residuales:

1 Motor: Código: F018790

Potencia: 15 HP

Velocidad de operación: 1400RPM

1Reductor: Código: F033140

Torque: 305 N.m

Velocidad de operación (IN): 1400RPM

(OUT): 29RPM



Figura 7: Vista frontal clarificador  
Aguas residuales



Figura 8: Vista lateral clarificador vacío

 <p data-bbox="440 289 626 352"><b>INGENIO RISARALDA</b></p>	<p data-bbox="662 201 1065 342"><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p data-bbox="1094 218 1289 289"><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
---	--	--

El moto reductor del clarificador es manejado por una caja de control, el torque se controla por medio de un torquímetro encima del clarificador con un rango de 0-40%, el valor máximo es 40% porque a ese nivel se dispara el moto reductor para evitar daños en el brazo que gira.

Es importante vigilar el estado del torque constantemente y buscar siempre que esté en valores cercanos a 0.

Si por alguna razón el clarificador debe ser parado se recomienda que no pase más de unas horas ya que el lodo que es arrastrado por el brazo puede acumularse en el fondo, produciendo posteriormente un sobreesfuerzo del torque y un daño en el brazo.

#### 1.4.1Purga de sobrenadantes:

El clarificador posee un brazo el cual arrastra toda la ceniza y bagacillo que llegan a la superficie hacia una abertura ubicada al costado del clarificador, allí por medio de un flujo de agua se arrastran estos elementos hacia una tolva, la cual se llena acumulando las cenizas y filtrando el agua en exceso por una tubería hacia el foso de las 3 bombas verticales. Al llenarse la tolva, se envían camiones para recolectar el material y llevarlo hacia la planta de compostaje.

#### 1.4.2Purga de lodos:

Los lodos se succionan por la parte inferior del clarificador a través de una tubería, hacia las piletas de lodos y cenizas para ser recogidas por un camión a compostaje; la purga cuenta con dos ayudas en caso de atascamiento:

- Una bomba centrífuga Wenco cuyo fin es generar presión sobre los lodos.
  - Código: F025050
  - Potencia: 24HP
  - Velocidad de Operación: 1760 RPM
  - Amperaje: 31 AMP



INGENIO  
RISARALDA

MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.

FECHA EXP:  
Mayo/2010



Figura 9 . Bomba Wenco

- Dos bombas de contra flujo, las cuales llevan agua clarificada por medio de 4 válvulas a diferentes secciones de la tubería de purga con el objetivo de que los lodos puedan fluir con mayor facilidad hacia la pileta de lodos.

Códigos: F024140 / F024060  
Marca: ITTA.C  
Capacidad: 50GPM  
Potencia: 2,0 HP  
Amperaje: 2,4 AMP  
Velocidad de operación: 3500 RPM

Ambos sistemas se utilizan solo en caso de atascamiento de lodos; en lo general, la purga se hace por gravedad a través de una válvula mariposa cada 20 minutos por 2 minutos.

En caso de ocurrir un atascamiento mayor se debe destapar las bridas de la tubería abriendo y cerrando la purga para generar presión junto con los elementos anteriores, hay tres bridas a lo largo de la tubería y se abren con el propósito de visualizar donde está el problema, si al purgar los lodos salen



 <p data-bbox="440 289 626 352"><b>INGENIO RISARALDA</b></p>	<p data-bbox="662 201 1065 342"><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p data-bbox="1094 218 1289 289"><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
---	--	--

con un flujo constante entonces se cierra ese flanche y se abre el siguiente.

### **Recomendación**

Cuando el torque se suba, puede ser porque hay acumulación de lodos y no se ha purgado a tiempo, entonces se debe purgar por intervalos de 10 minutos durante 2 minutos, para evacuar los lodos rápidamente.

#### 1.5 Bombas a mesas de caña:

Después de clarificar el agua, esta se almacena provisionalmente en un tanque pulmón azul y por medio de dos bombas centrífugas de 1 etapa se envía el agua de nuevo a las mesas de cada para así completar el ciclo de lavado de caña.  
Características de las 2 bombas centrífugas:

Códigos: F024230 / F024240  
 Marca: Goulds Pumps  
 Capacidad: 3000GPM  
 Potencia: 100 HP  
 Velocidad de operación: 1180 RPM

#### 1.6 Lavado de caña por elaboración:

Cuando se presentan problemas con las bombas o el clarificador en planta de aguas residuales, y no es posible mandar agua clarificada para lavar la caña, entonces se cuenta con una bomba centrífuga la cual toma agua de enfriamiento y la envía a las mesas de caña.

Características de la bomba centrífuga:

Código: F022360  
 Velocidad de operación: 1760RPM  
 Potencia: 100 HP  
 Capacidad: 4500 GPM



INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**

Las consecuencias de esta labor son:

- ✓ Si el clarificador tiene problemas o está parado entonces el agua es arrojada por desborde al canal de excesos.
- ✓ Si hay problemas con las bombas de lavado de caña o las bombas a mesas de caña entonces se envía el agua al clarificador y se arroja al lago para conservar la mayor cantidad de agua posible dentro del ingenio.

Esta labor no es recomendable ya que hay contaminación de los dos ciclos (enfriamiento y lavado de caña), o sino hay desperdicio de agua residual hacia el canal de excesos.

## 2. PILETAS DE CENIZA



En este ciclo, se toma agua cruda para recoger en húmedo las cenizas de las calderas en los ciclones, luego se dirige hacia una piscina o pileta la cual filtra el agua de las cenizas, recuperándose así un flujo útil de agua y se reciclan los residuos finales hacia compostaje.



INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**

### 2.1 Aducción:

El agua es tomada de la línea de agua cruda que se dirige hacia elaboración, por medio de una tubería de 8 pulgadas hacia las tolvas de ceniza en calderas.

### 2.2 Lavado de ceniza en húmedo:



El agua es conducida hacia unos canales contruidos en la desembocadura de cada tolva, hay 8 tolvas de los ciclones y 11 tolvas de calderas. La caldera #3 tiene 5 tolvas y la caldera #5 tiene 6 tolvas de ceniza. El agua converge a un solo canal para dirigirse a la pileta de ceniza, el nivel promedio del caudal de agua es de 30cm.

### 2.3 Filtración del agua:

El agua es filtrada por una capa de piedras de diferentes tamaño ubicada al costado de la pileta, y se lleva a un foso de succión; a los lados de la pileta hay TEE de PVC cuyo fin es tomar el agua ubicada debajo de la ceniza, por medio de unos desbordes y así también nivelar el agua de la pileta.

El agua es succionada por una bomba centrífuga y conducida por una tubería de 6" hacia el canal de lavado de caña dirigida al foso de succión correspondiente.  
Características bomba:

 <p data-bbox="440 289 626 352"><b>INGENIO RISARALDA</b></p>	<p data-bbox="662 201 1062 344"><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p data-bbox="1094 218 1289 289"><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
---	--	--

Código: F021950

Marca: Morris

Potencia: 60 HP

Velocidad de operación: 1764 RPM

### 3. CICLO DE ENFRIAMIENTO (ELABORACION)

El proceso de recirculación del agua de enfriamiento consiste en un circuito cerrado conformado por una piscina de enfriamiento, dos lagos y dos fosos de succión (planta de agua y en residuales) todos estos elementos tienen como propósito enfriar el agua utilizada en elaboración y refinación para generar presión de vacío en equipos como tachos y evaporadores.

#### 3.1 Aduccion:

En planta de agua se recolecta en un foso el agua que proviene de los lagos, y junto con ella el agua cruda que se une por medio de un desborde, esto se hace con el fin de recuperar volumen ya que en el sistema hay pérdida por evaporación.

Esta línea de agua mezclada pasa por una reja la cual elimina sólidos mayores como ramas, basuras o palos que vengan en el camino.



Figura 10.  
Desborde agua cruda a agua enfriamiento



INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**

3.2 Foso de succión:

En este foso se encuentran 4 bombas centrifugas con tanque de ceba las cuales succionan el agua hacia dos tuberías de 30" para el área de elaboración y refinación, las características de las bombas son:

Figura 11. Foso planta de agua potable



Códigos: F023510  
Capacidad: 3000GPM  
Potencia: 128HP  
Velocidad de operación: 1800RPM

Códigos: F023810 / F021090 / F021080  
Capacidad: 12000GPM  
Potencia: 422 HP  
Velocidad de operación: 900RPM



INGENIO  
RISARALDA

**MANUAL DE OPERACIÓN  
DE LA PLANTA DE  
AGUAS RESIDUALES DEL  
INGENIO RISARALDA S.A.**

**FECHA EXP:  
Mayo/2010**



Generalmente las 4 bombas deben estar en funcionamiento, pero todo depende de los requerimientos de la fábrica, el parámetro a revisar es la presión de descarga por medio de un manómetro el cual debe marcar un valor entre 40-50 psi.

Al lado del foso hay un desborde el cual idealmente debe estar seco, es decir, toda el agua debe ser succionada por las bombas y no desperdiciada por el desborde ya que este manda el agua hacia el canal de excesos y sería una pérdida de agua, que posteriormente se recupera tomando agua del río.



Figura 12. Desborde a canal de excesos

### 3.3 Generación de vacío en tachos y evaporadores:

#### 3.3.1 Elaboración:

El agua que llega a la planta es distribuida por tuberías de 30" a través de válvulas neumáticas, cada una tiene como respaldo un bypass, con válvulas mariposa para manejar manualmente el proceso en caso de emergencia.

	<p><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
---	---	--

Después de pasar por los equipos el agua es recolectada por un canal bajo tierra hacia un voskolver, con dos salidas, una hacia el canal de excesos y otra hacia el foso de aguas residuales, ambas salidas se pueden controlar por medio de una guillotina.

### 3.4 Foso succión a piscina:

El agua normalmente se dirige a planta de aguas residuales y llega a un foso de 97.78 metros cúbicos, allí se encuentran cuatro bombas las cuales mandan el agua hacia la piscina de enfriamiento a través de una tubería de 40”.

#### Características 3Bombas Verticales:

Códigos: F025070 / F025080 / F025090

Marca: Gould Pumps

Potencia: 200 HP

Capacidad: 7200 GPM

Velocidad de operación: 1190 RPM

#### Características Bomba Horizontal- Centrífuga:

Códigos: F025690

Marca: Gould Pumps

Potencia: 500 HP

Capacidad: 14000 GPM

Velocidad de operación: 897 RPM

Para el agua de enfriamiento se realiza una dosificación de lechada de cal de 11°Baumé, por medio de la ecuación (1) trabajada en el ciclo de lavado de caña, los valores obtenidos de dosificación son:

 <p><b>INGENIO RISARALDA</b></p>	<p><b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL INGENIO RISARALDA S.A.</b></p>	<p><b>FECHA EXP: Mayo/2010</b></p>
---	---	--

*Tabla 6: Dosificación de lechada de cal 11° Baumé para el ciclo enfriamiento en función de las bombas trabajando*

Equipos trabajando	Capacidad(GPM)	Capacidad (LPS)	Volumen aprox.lechada (L/minuto)
1 bomba-vertical	7000	441	0,95
2 bomba-verticales	14000	882	1,90
1 bomba-centrifuga	15000	945	2,03
1 bomba-centrifuga+ 1 bomba-vertical	22000	1386	2,98
1 bomba-centrifuga+ 2 bombas-verticales	29000	1827	3,93

### 3.5 Piscina enfriamiento:

El agua que llega debe tener una temperatura ideal de 45°C esta es dispersada por medio de 600 boquillas, el agua cae a una piscina con un desborde lateral, la cual es conducida por un canal hacia una canaleta Parshall y posteriormente a los lagos para continuar con el proceso de disminución de temperatura.

La temperatura de salida de la piscina tiende a ser la temperatura ambiente (30°C) , así que el delta de temperaturas ideal es de 10°C.

### 3.6 Salida lagos:

El agua a la salida del segundo lago es controlada por medio de una válvula guillotina, con el fin de regular la cantidad de agua que llega a planta de agua potable hacia elaboración, y así no perder agua en el desborde de allí.

El delta de temperatura para los lagos es de  $\pm 2$  °C.

