

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS  
AGENTES ALCALINOS: CAL HIDRATADA Y CAL DOLOMÍTICA;  
EN LA NEUTRALIZACIÓN DE AGUA ÁCIDA RESIDUAL  
PROVENIENTE DE UN PROCESO DE GALVANIZADO**

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

XIOMARA NOEMÍ CORTEZ JIMÉNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1999

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**



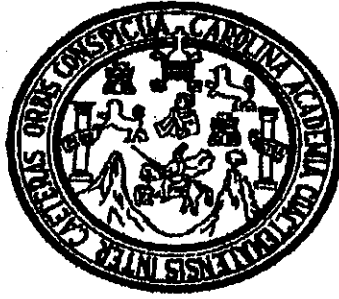
Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AGENTES ALCALINOS: CAL HIDRATADA Y CAL DOLOMÍTICA; EN LA NEUTRALIZACIÓN DE AGUA ÁCIDA RESIDUAL PROVENIENTE DE UN PROCESO DE GALVANIZADO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de agosto de 1999.

  
\_\_\_\_\_  
Xiomara Noemí Cortez Jiménez

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	<b>Ing. Herbert René Miranda Barrios</b>
<b>VOCAL I</b>	<b>Ing. José Francisco Gómez Rivera</b>
<b>VOCAL II</b>	<b>Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez</b>
<b>VOCAL III</b>	<b>Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana</b>
<b>VOCAL IV</b>	<b>Br. Oscar Stuardo Chinchilla Guzmán</b>
<b>VOCAL V</b>	<b>Br. Mauricio Alberto Grajeda Mariscal</b>
<b>SECRETARIA</b>	<b>Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas</b>

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	<b>Ing. Herbert René Miranda Barrios</b>
<b>EXAMINADOR</b>	<b>Ing. José Manuel Tay Oroxom</b>
<b>EXAMINADOR</b>	<b>Ing. Carlos Salvador Wong Davi</b>
<b>EXAMINADOR</b>	<b>Ing. Rodolfo Francisco Espinosa Smith</b>
<b>SECRETARIA</b>	<b>Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illesca</b>



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis de la estudiante, Xiomara Noemí Cortez Jiménez, titulado: ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AGENTES ALCALINOS: CAL HIDRATADA Y CAL DOLOMITICA; EN LA NEUTRALIZACION DE AGUA ACIDA RESIDUAL PROVENIENTE DE UN PROCESO DE GALVANIZADO, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Otto Raúl de León de Paz  
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA

Guatemala, octubre de 1,999.



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, septiembre 20 de 1,999

Ingeniero  
Otto Raúl de León  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Presente.

Ingeniero de León:


Por este medio me permito comunicarle que he asesorado el trabajo de tesis titulado **ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AGENTES ALCALINOS: CAL HIDRATADA Y CAL DOLOMITICA; EN LA NEUTRALIZACION DE AGUA ACIDA RESIDUAL PROVENIENTE DE UN PROCESO DE GALVANIZADO**, de la estudiante **XIOMARA NOEMI CORTEZ JIMENEZ**, con carnet No. 9415361.

Considero que dicho trabajo llena los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Química, por lo que considero conveniente que se apruebe y se proceda a la autorización del mismo.

Dejo constancia que la fase práctica se ha cumplido a cabalidad al comparar ambos agentes alcalinos.

Me suscribo de usted, atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
**ING. ZENON MUCH SANTOS**  
**JEFE DE LABORATORIO DE**  
**QUIMICA Y MICROBIOLOGIA SANITARIA**  
**ASESOR**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 6 de octubre de 1,999.

Ingeniero  
Otto Raúl de León de Paz  
Director Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

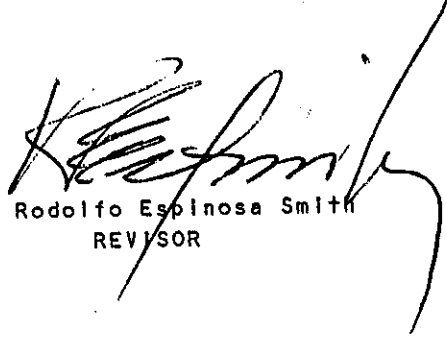
Estimado Ingeniero de León.

Por este medio informo a usted, que he revisado el Informe Final de Tesis titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AGENTES ALCALINOS: CAL HIDRATADA Y CAL DOLOMITICA; EN LA NEUTRALIZACION DE AGUA ACIDA RESIDUAL PROVENIENTE DE UN PROCESO DE GALVANIZADO**, de la estudiante **Xiomara Noemí Cortez Jiménez**. Dejo constancia de aprobación para la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, le saluda.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Rodolfo Espinosa Smith  
REVISOR


**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA**

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AGENTES ALCALINOS: CAL HIDRATADA Y CAL DOLOMITICA; EN LA NEUTRALIZACION DE AGUA ACIDA RESIDUAL PROVENIENTE DE UN PROCESO DE GALVANIZADO, de la estudiante Xiomara Noemí Cortez Jiménez, procede a la autorización para la impresión de la misma.

**IMPRIMASE:**

  
Ing. Herbert René Miranda Barrios



Guatemala, octubre de 1,999.

## **DEDICATORIA**

- A DIOS:** Fuente de vida, amor y sabiduría.
- A MIS PADRES:** Rodolfo y Noemí, con todo mi amor y agradecimiento.
- A MIS HERMANOS:** Jacqueline y Edwin, con mucho cariño.
- A MIS ABUELOS:** Mario, Aura, Rodolfo (QEPD) y Maru, con especial cariño y admiración.
- A MI NOVIO:** Javier, con todo mi amor.
- A MIS AMIGOS:** Por su apoyo y compañía, en especial a:  
Carolina, Claudia, Obed, Carlos,  
Freddy y Marco Tulio.



## **AGRADECIMIENTO**

- |  |   |
|--|---|
| <b>A DIOS</b>                                    | Por el don maravilloso de la vida.                  |
| <b>A MIS PADRES</b>                              | Por su gran amor, apoyo y comprensión.              |
| <b>AL ING. ZENÓN MUCH</b>                        | Por su asesoría en la realización de este trabajo.  |
| <b>AL ING. RODOLFO ESPINOZA</b>                  | Por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis. |
| <b>AL SR. ISRAEL LÓPEZ<br/>ING. CARLOS PINTO</b> | Por su apoyo.                                       |
| <b>A FRANCISCO GUERRA</b>                        | Por su valiosa ayuda.                               |

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VI
RESUMEN	IX
INTRODUCCIÓN	XI
JUSTIFICACIÓN	XIII
OBJETIVOS	XIV
HIPÓTESIS	XV
1. MARCO TEÓRICO	
1.1. Origen del agua ácida residual	1
1.2. Tratamiento de agua ácida residual	1
1.2.1. Neutralización	2
1.2.1.1. Cal	4
1.2.1.2. Procesos de Neutralización	8
1.2.2. Oxidación de hierro	11
1.2.3. Sedimentación	13
2. RESULTADOS	14
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	19
CONCLUSIONES	24
RECOMENDACIONES	25
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
BIBLIOGRAFÍA	27

<b>APÉNDICE</b>	<b>28</b>
A. Diagrama de planta de tratamiento	29
B. Método de investigación	31
C. Procedimiento estadístico para la interpretación de los resultados.	37
D. Análisis económico	44

## **ANEXO**

1. Propiedades de suspensiones cal -agua	45
--	----

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

No.	Título	Pág.
1	Tiempo de neutralización de ácido con cantidades teóricas de cal	8
2	Solubilidad de ion ferroso y férrico según pH	12
3	Curva de neutralización con cal hidratada	17
4	Curva de neutralización con cal dolomítica	18
5	Diagrama de planta de tratamiento de agua ácida residual	29

## TABLAS

<b>No.</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
I	Basicidad de los agentes alcalinos para neutralización	3
II	Resultados de la neutralización de agua ácida residual con cal hidratada.	15
III	Resultados de la neutralización de agua ácida residual con cal dolomítica.	16
IV	Dimensiones de equipo en la planta de tratamiento	30
V	Resultados de análisis estadístico en valores de pH durante la neutralización con cal hidratada.	40
VI	Resultados de análisis estadístico en valores de pH durante la neutralización con cal dolomítica.	41
VII	Valores críticos de la distribución ji cuadrada	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
$\alpha$	Área bajo la curva de distribución ji cuadrada
$\sigma^2$	Desviación estándar
$n$	Número de datos
$v$	Grados de libertad
$s^2$	Variancia muestral
$X^2$	Variable aleatoria
$\text{cm}^3$	Centímetro cúbico
$\text{m}^3$	Metro cúbico
$\text{Kg}$	Kilogramo

## GLOSARIO

- Ácido** Es una sustancia donadora de protones. Se disocia en agua para producir iones  $H^+$ .
- Álcali** Es una sustancia aceptora de protones. Se disocia en agua para producir iones  $OH^-$ .
- Basicidad** Para álcalis, es la cantidad en peso de álcali requerida para la neutralización de un ácido.
- Cal** Es un sólido formado por óxidos o hidróxidos de calcio y magnesio provenientes de la calcinación de la piedra caliza.
- Caliza** Roca compuesta principalmente por carbonato de calcio. Es muy abundante en la naturaleza.
- Calcinación** Descomposición térmica de piedra caliza y dolomita formando cal y dióxido de carbono.

<b>Dolomita</b>	Roca parecida a la caliza formada por carbonato doble de calcio y magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .
<b>Dolomítica</b>	Que proviene de la dolomita. Formada por óxidos o hidróxidos de calcio y magnesio, a ciertas proporciones, provenientes de la calcinación de dolomita.
<b>Galvanizado</b>	Proceso por el cual se cubre con cinc el material de hierro para que no se oxide.
<b>Hidratación</b>	Reacción de una sustancia con el agua.
<b>Ion</b>	Partícula cargada que se forma cuando un átomo neutro o un conjunto de átomos ganan o pierden uno o más electrones.
<b>Lechada</b>	Mezcla de cal en agua.
<b>Magnésica</b>	Que contiene magnesio.



- Neutralización** Es la transferencia de un protón de un ácido a un álcali para formar moléculas de agua.
- Oxidación** Reacción química de un compuesto con el oxígeno. Pérdida de electrones en el átomo de un elemento.
- pH** Término que indica la concentración de iones de hidrógeno en una disolución. Se trata de una medida de la acidez de la disolución y se define como el logaritmo inverso de la concentración de iones  $H^+$  (protones).
- Titulación** Técnica analítica que determina la concentración desconocida de un volumen por medio de su reacción con cierto volumen de solución estándar.

## **RESUMEN**

**En este trabajo se evaluó el comportamiento de los agentes alcalinos: cal hidratada alta en calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y cal dolomítica [ $(\text{Ca}(\text{OH})_2)_{0.6} (\text{Mg}(\text{OH})_2)_{0.4}$ ]; en la neutralización de agua ácida residual proveniente del lavado de metales en la industria de galvanizado, por medio de la construcción de una curva de titulación que indica la cantidad de cal necesaria para la neutralización de una solución.**

**La experimentación se basó en el diseño de una planta de tratamiento compuesta por un reactor con agitación para la neutralización de ácido clorhídrico residual y con aireación para la oxidación del ion ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) contenido en el mismo; además un tanque con agitación por medio de aire para la preparación de la suspensión cal-agua.**

**Para ello se añadieron diferentes volúmenes de cal en forma de lechada, es decir, una suspensión cal-agua para mejorar el contacto del álcali con el ácido. Se agregó el volumen determinado de lechada al ácido residual agitando la mezcla continuamente; la lectura del pH se realizó cuando la reacción entre la cal y el ácido alcanzó el equilibrio y el valor de pH no varió.**

**Este equilibrio se ve afectado por la oxidación del ion ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) como hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) debido a que la reacción produce nuevamente ácido clorhídrico, por lo que el proceso incluye la neutralización de ácido libre y el ácido formado por la oxidación del hierro. Durante las pruebas se determinó la concentración de hierro cuando la neutralización alcanzó un pH de 7.**

**El propósito fue obtener la concentración óptima para la neutralización del ácido residual de una industria de galvanizado y así seleccionar el agente alcalino que haga efectivo el tratamiento, disminuyendo costos y mejorando las condiciones de operación.**

**En base a los resultados obtenidos se determinó que el agente alcalino que hizo efectiva la neutralización de agua ácida residual fue la cal hidratada con alto contenido de calcio, ya que, aunque el costo por unidad de volumen de agua residual tratada es más alto, la velocidad de neutralización es mayor y la concentración utilizada es menor, por lo que produce una menor acumulación de lodos.**

## INTRODUCCIÓN

La importancia que ha adquirido en la actualidad la conservación del ambiente, ha contribuido a que la industria de metales en Guatemala se preocupe por implementar procesos de tratamiento de agua residual, proveniente de los procesos de producción, que reduzcan el riesgo de contaminación durante la descarga.

La manufactura de tubería galvanizada figura en este tipo de industria en la cual se obtiene agua residual proveniente del proceso de lavado del metal. En este proceso se utiliza el ácido clorhídrico para remover el óxido que se obtiene como producto de la corrosión del metal.

El agua ácida residual del proceso de galvanizado se caracteriza por su contenido de ácido y hierro ( $\text{Fe}^{+2}$ ) por lo que es necesario un tratamiento adecuado previo a su descarga. Las características de agua ácida residual requieren como primer paso del tratamiento la neutralización del ácido, que acondiciona el agua con el pH adecuado y permite la oxidación del hierro eliminándolo como un precipitado.

La neutralización eleva el pH del agua residual por medio de la adición de agentes alcalinos, tales como hidróxido de sodio, carbonato de sodio, cales (hidratada, dolomítica, cal viva), resultando un rango de pH adecuado para su descarga.

Los álcalis más utilizados son los diversos tipos de cal; debido a su costo, disponibilidad y fácil manejo. Se diferencian con respecto a la basicidad y reactividad por lo que es necesario evaluar el reactivo a utilizar mediante pruebas de laboratorio.

Con el objeto de elegir el tipo de cal que mejore las condiciones de operación y costo de la neutralización de agua ácida residual, proveniente de la industria de galvanizado, se realizó un estudio comparativo utilizando dos agentes alcalinos: cal hidratada y dolomítica, evaluando sus ventajas y desventajas con lo que se pudo determinar el reactivo adecuado para el tratamiento.

## **JUSTIFICACIONES**

Debido a la contaminación que produce, a los cuerpos receptores de agua, la descarga de agua ácida residual proveniente de la industria de galvanizado; es importante la selección de agentes alcalinos y su uso efectivo durante la etapa de neutralización del proceso de tratamiento de la misma.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivos generales**

1. Determinar el comportamiento de los agentes alcalinos: cal hidratada y cal dolomítica; en la etapa de neutralización del tratamiento de agua ácida residual proveniente del proceso de galvanizado.
2. Optimizar la etapa de neutralización del tratamiento de agua ácida residual mediante el estudio de los agentes alcalinos: cal hidratada y dolomítica.

### **Objetivos específicos**

1. Determinar la concentración óptima de los agentes alcalinos: cal hidratada y dolomítica; necesaria para la neutralización de agua ácida residual proveniente del proceso de galvanizado.
2. Evaluar económicamente el uso de los agentes alcalinos, cal hidratada y dolomítica en la etapa de neutralización de agua ácida residual.

## **HIPÓTESIS**

**La neutralización de agua ácida residual proveniente del proceso de galvanizado es efectiva si se utilizan agentes alcalinos de bajo costo, específicamente cal hidratada y cal dolomítica en cantidades y condiciones apropiadas.**



# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Origen de agua ácida residual**

La industria de galvanizado de tubería de acero en la ciudad de Guatemala inicia su proceso con la limpieza del metal a fin de eliminar el óxido contenido en su superficie y asegurar la adherencia de la capa de zinc. Este lavado se realiza por inmersión en un tanque que contiene en su inicio una solución de ácido clorhídrico al 17% (en peso) a temperatura ambiente y controlando el tiempo de inmersión; este tiempo varía entre 5 y 20 minutos dependiendo de la concentración de ácido y hierro en la solución. (Ref.1)

Principalmente el ácido clorhídrico disuelve cada capa de óxido de la superficie metálica hasta alcanzar la base del metal, a mayor concentración de ácido menor será el tiempo de inmersión en el tanque. Cuando disminuye la concentración de ácido a un 3 a 4% y aumenta el contenido de hierro disuelto en un 7 a 10% el tiempo de lavado aumenta provocando una pérdida de tiempo para la producción. (Ref.1)

## **1.2. Tratamiento de agua ácida residual**

Cuando el ácido del proceso se agota se procede a la descarga del mismo a una planta de tratamiento que consta de una serie de etapas las cuales se describen a continuación:

### 1.2.1. Neutralización

"Un **ácido** se define como una sustancia donadora de protones (H<sup>+</sup>). Una **base** es una sustancia aceptora de protones. La **neutralización** se define como la transferencia de un protón de un ácido, a una base para formar moléculas de agua." (Ref.2)

La primera etapa del tratamiento consiste en eliminar el exceso de acidez por medio de una base o agente alcalino adecuado. En esta etapa se debe asegurar que la base esté en contacto con el ácido residual por un tiempo considerable y con agitación continua para que ocurra una reacción completa.

(Ref.3)

El grado de neutralización puede ser medido por el pH, el cual se define como "el logaritmo negativo de la concentración de ion hidrógeno en solución acuosa". La mayoría de efluentes deben ser neutralizados entre un pH de 6 a 9 antes de la descarga. (Ref.3)

Por otro lado, en el tratamiento de agua ácida residual, proveniente de la limpieza del acero, el pH óptimo para que se lleve a cabo la oxidación del hierro como ion ferroso se encuentra entre 8 y 9, rango que permite la precipitación rápida del hierro presente como hidróxido férrico. (Ref.4)

El agente alcalino más utilizado en la neutralización de ácido residual es la cal proveniente de la calcinación de la piedra caliza y entre los factores principales que se consideran para su selección se encuentran los siguientes:

1. Costo del reactivo.
2. Basicidad, la cual determina la cantidad de cal requerida para la neutralización de un ácido (ver tabla I).
3. Reactividad o velocidad de neutralización.
4. Volumen de sólidos generados por la precipitación del hierro.
5. Disponibilidad y fácil manejo.

(Ref. 5)

**Tabla I. Basicidad de agentes alcalinos para neutralización**

<b>Reactivo</b>	<b>Factor de basicidad equivalente</b>
Cal viva, alto contenido de calcio	1.0
Cal hidratada, alta en calcio	1.32
Cal viva dolomítica	0.86
Cal hidratada dolomítica	1.02
Piedra caliza	1.79
Piedra dolomita	1.65

**Fuente: Ref. 5**

### 1.2.1.1. Cal

Cal es el término que se refiere a los óxidos o hidróxidos de calcio y magnesio provenientes de la calcinación de la piedra caliza. (Ref.4)

La cal es el álcali de menor costo y los sólidos que origina son más fáciles de manejar, por tal motivo es utilizado ampliamente en la neutralización de aguas ácidas residuales. (Ref.6)

Los álcalis de calcio y calcio-magnesio (Ca-Mg) se encuentran en la naturaleza en forma de piedra caliza y calcitas. La piedra caliza puede contener hasta el 95% de carbonatos y se clasifica su contenido en:

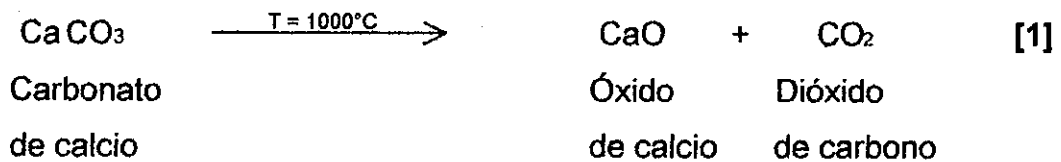
- ♦ Piedra caliza: cuando el carbonato de magnesio está presente alrededor del 1%.
- ♦ Dolomita,  $(CaMg(CO_3)_2)$ : cuando los carbonatos de calcio y magnesio están presentes en concentraciones molares de 52% de carbonato de calcio  $CaCO_3$  y 43% de carbonato de magnesio  $MgCO_3$ .

(Ref.6)

Únicamente la verdadera piedra dolomítica y la piedra con alto contenido de calcio son explotadas para usos químicos, las piedras de composición intermedia o fuera de los rangos mencionados son usualmente para propósitos agrícolas. (Ref.7)

Entre los tipos de cal más utilizadas para la neutralización se encuentran:

♦ **Cal viva:** está compuesta por óxido de calcio proveniente de la calcinación de piedra caliza con un contenido de carbonato de calcio de 50 a 90%. Cuando la caliza con alto contenido de calcio se somete a una temperatura de 1,000°C (1,835°F), se libera dióxido de carbono en forma gaseosa y se produce óxido de calcio de acuerdo a la siguiente reacción:



Dependiendo de la composición química de la cal viva, se divide en tres clases:

- Cal viva con alto contenido de calcio: contiene menos del 5% de óxido de magnesio.
- Cal viva magnésica: contiene del 5 al 35% de óxido de magnesio.
- Cal viva dolomítica: contiene 35 a 40% de óxido de magnesio.

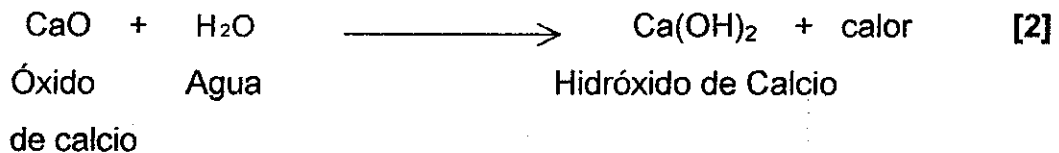
(Ref.4)

Debido a que la proporción de carbonato de magnesio y calcio difiere en la piedra dolomita, la temperatura de calcinación también varía por lo que es difícil determinarla. Una buena aproximación a la temperatura de descomposición de la dolomita es 725°C a una atmósfera de presión. (Ref.5)

Como resultado de la diferencia en los puntos de disociación de los componentes de la dolomita, el óxido de magnesio sufre una mayor calcinación antes de que el óxido de calcio se forme, debido a que el carbonato de calcio requiere una mayor temperatura de calcinación. El óxido de magnesio producido en este proceso influye en la formación de una cal viva densa de menor reactividad que la proveniente de la calcinación de piedra caliza con alto contenido de calcio. (Ref.5)

Para obtener una neutralización eficiente, la cal viva debe ser hidratada mediante un sistema que combine proporciones de agua y cal, formando una mezcla pastosa y viscosa, este proceso provoca una desventaja en el uso de la misma ya que el costo del sistema de hidratación es alto, se necesita un buen control de operación y se corre el riesgo de sufrir severas quemaduras durante el manejo del reactivo. (Ref.4)

♦ **Cal hidratada con alto contenido de calcio:** es un polvo fino y seco compuesto por hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) obtenido mediante el tratamiento de óxido de calcio (cal viva) con agua suficiente para la siguiente reacción de hidratación:



Este proceso es exotérmico, es decir, que durante la reacción entre la cal viva y el agua se libera calor. (Ref.6)

La cal hidratada es una base comúnmente utilizada para la neutralización de agua ácida residual. Es preferible cuando el consumo de cal durante el tratamiento es bajo o el costo de un sistema de hidratación es prohibitivo.

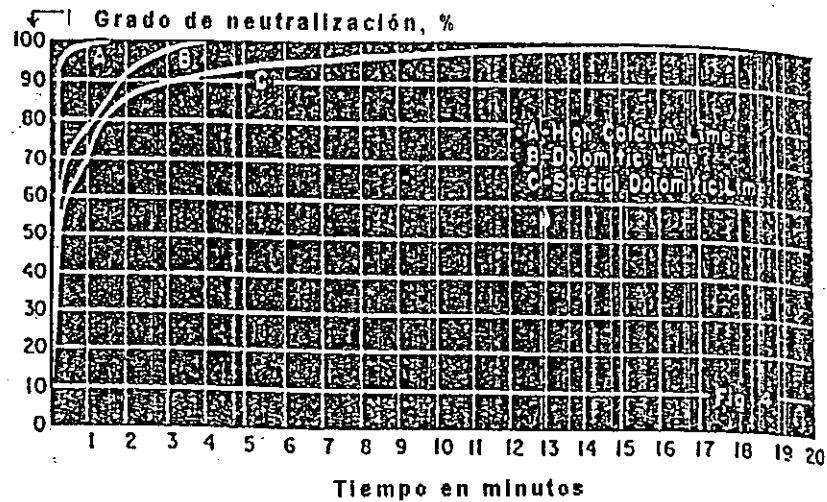
(Ref.4)

La estabilidad de este tipo de cal se ve afectada por la absorción de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por quien posee una fuerte afinidad, incluso en concentraciones diluidas. (Ref.5)

♦ **Cal dolomítica hidratada**  $[(\text{Ca}(\text{OH})_2)_{0.6} (\text{Mg}(\text{OH})_2)_{0.4}]$ : Por otro lado, en el mercado puede encontrarse cal con cierta proporción de óxido e hidróxido de magnesio denominada dolomítica ya que procede de piedras dolomitas o magnésicas con cierta proporción de carbonato de magnesio.

Sin embargo, un alto contenido de óxido de magnesio es problemático, debido a que éste tarda mucho en hidratarse, usualmente el 2 o 3% se convierte en hidróxido de magnesio, ésta puede ser una razón por la cual la cal dolomítica ocupa mayor tiempo en alcanzar la neutralización, como se observa en la Figura 1. (Ref.7)

**Figura 1. Tiempo de neutralización de ácido con cantidades teóricas de cal hidratada; A es con alto contenido de calcio, B una cal dolomítica y C es una cal dolomítica especial.**



**FUENTE: Ref. 7**

Los tipos de dolomítica son un poco más estables que la cal hidratada con alto contenido de calcio, ya que no absorben agua o dióxido de carbono rápidamente. La piedra dolomita calcinada es completamente estable bajo más condiciones, excepto por su baja reactividad con los ácidos fuertes y concentrados. (Ref.5)

### 1.2.1.2. Procesos de neutralización

La neutralización de agua ácida se puede obtener mediante el uso de piedra con alto contenido de calcio o dolomita y sus respectivas cales, sin embargo existen ventajas y desventajas en el uso de éstos reactivos debido a las diferencias en el diseño del equipo necesario para lograr una neutralización efectiva.



I. **Neutralización con piedra caliza o dolomita:** esta piedra es indiscutiblemente la de más bajo costo y una aceptable basicidad (ver tabla I), aunque su reactividad es baja y los sólidos que genera son generalmente más voluminosos y difíciles de manejar. La piedra caliza con alto contenido de calcio ha sido el agente alcalino más utilizado debido a que posee mayor reactividad. La velocidad de reacción de la piedra dolomita se considera ineficiente. (Ref.4)

Para una neutralización efectiva con este tipo de reactivo se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Tamaño mínimo de partícula, preferiblemente menor a 0.044 mm.
- Alto contenido de calcio.
- Bajo contenido de magnesio, eliminando dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) y magnesitas ( $\text{MgCO}_3$ ).
- Mayor área de contacto.

(Ref.4)

El proceso de neutralización con ésta piedra requiere de un flujo de ácido el cual se deja pasar a través de una cama de piedra granulada, durante el proceso se produce una gran pérdida de reactivo, principalmente cuando hay formación de precipitados que evitan el paso del ácido a través de la cama.

(Ref.5)

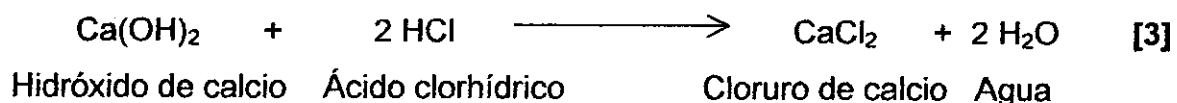
Dependiendo del tamaño de los gránulos, de la concentración de ácido y otros factores, la porción de piedra sin reaccionar puede ser del 40 a 60%. Por consiguiente el uso de este agente alcalino es generalmente insatisfactorio y puede resultar el más costoso de los reactivos. (Ref.5)

Por otro lado, la liberación de CO<sub>2</sub> provoca problemas de espuma y a menos que se libere este gas durante la neutralización, la reacción cesa a un pH de 4.3, por lo que la aireación o agitación son indispensables. (Ref.5)

La piedra alta en calcio es efectiva hasta un pH entre 6 y 7 precipitando la mayoría o todo el ion férrico presente pero no el ion ferroso, que requiere un pH entre 8 y 9 para removerlo completamente. (Ref.5)

**II. Neutralización con cal hidratada con alto contenido de calcio o dolomítica:** La alimentación de los tipos de cal en la etapa de neutralización es un factor importante que influye en la efectividad del agente alcalino a utilizar, previo a iniciar esta etapa se debe preparar una lechada de cal que consiste en una suspensión de agua y cal, este procedimiento asegurará una rápida reacción con el ácido. "Se recomienda que la concentración máxima de cal en la lechada sea del 10%, porcentaje en peso, porque mayores concentraciones ocasionan problemas adicionales de mantenimiento y operación". (Ref.4)

La reacción de neutralización es la siguiente:



La efectividad de las suspensiones agua-cal cuando se mezclan con el ácido residual para su neutralización dependerá del tipo de cal a utilizar. La fracción de magnesio es más reactiva en ácidos fuertes a un pH por debajo de 4.2 unidades. Debido a la existencia de diversos tipos de cal, una evaluación de los tipos disponibles conduce a la determinación del más económico. (Ref.7)

Comparando ambos tipos de cales se observa en la tabla I, que la dolomítica posee mayor basicidad que la cal alta en calcio. Sin embargo, "la cal alta en calcio es mucho más reactiva ya que neutraliza el ácido en minutos en vez de horas" (Ref.5). Este factor se traduce en un diseño de planta más económico con tanques más pequeños, equipo, menos espacio y menor capital de inversión debido a que la retención de ácido residual y álcali se hace innecesaria. Esta ventaja puede minimizarse si se aplica agitación y calor al proceso con cal dolomítica hasta una temperatura de 76.4°C. También añadiendo un exceso de cal dolomítica se acelera la reactividad. (Ref.5)

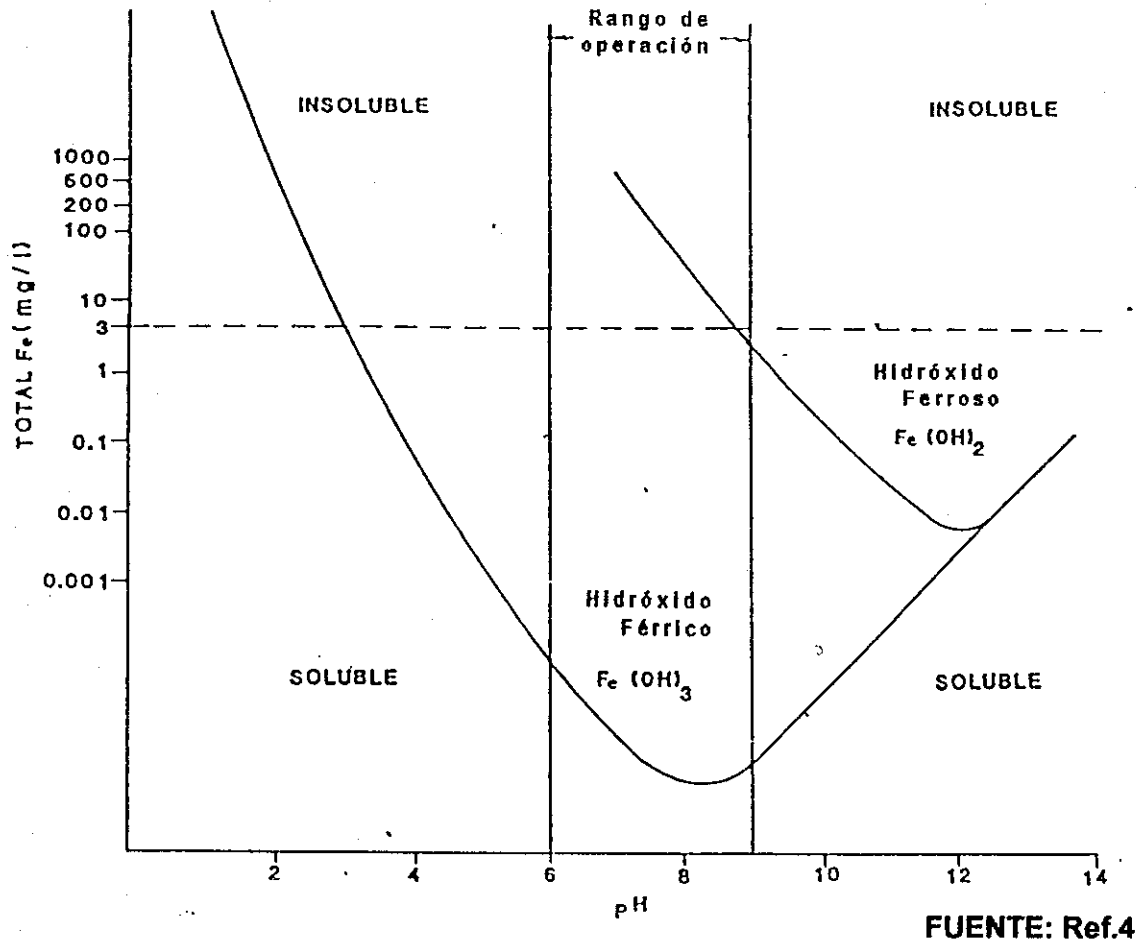
Otra ventaja de la cal alta en calcio es que su reacción es eficiente a mayores valores de pH, mientras que la cal dolomítica es eficiente únicamente hasta un pH de 6.5. Por encima de este punto la reactividad de la cal dolomítica decrece rápidamente y se hace necesario añadir cantidades adicionales de cal, todo el compuesto de óxido de magnesio no reacciona y se pierde, generando más sólidos residuales y actuando negativamente sobre la ventaja de basicidad de la cal. (Ref. 5)

### **1.2.2. Oxidación de hierro**

El ácido residual proveniente de la limpieza del acero en el proceso de galvanizado contiene concentraciones significativas de hierro, resultado de la remoción del óxido de hierro sobre la superficie del metal.

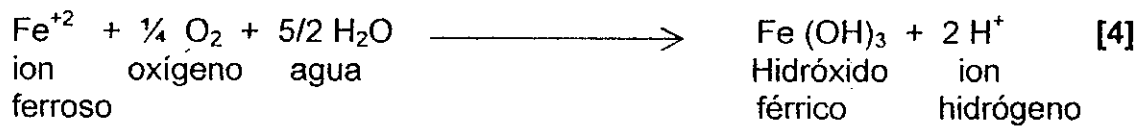
Al inicio, el hierro está presente en el ácido en su forma ferrosa ( $\text{Fe}^{+2}$ ). El ion férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) es menos soluble que el ion ferroso y puede precipitar como hidróxido férrico si el pH se encuentra entre 6 y 9 unidades que es el rango de menor solubilidad del ion férrico como se observa en la Figura 2. (Ref.4)

Figura 2. Solubilidad de ion ferroso y férrico según pH



FUENTE: Ref.4

Esta etapa del tratamiento requiere de un sistema de aireación, el cual se encarga de que el ion ferroso cuando entre en contacto con el oxígeno del aire se oxide a su forma férrica dependiendo de la concentración de ion ferroso, oxígeno disuelto y el pH de solución (Ref.4). La reacción de oxidación es la siguiente:



La aireación deberá proveer de oxígeno disuelto hasta alcanzar el punto de saturación en el cual ocurre la máxima oxidación del ion ferroso. (Ref.4)

La importancia de neutralizar el ácido residual previo a la oxidación radica en que a un pH menor a 3, la oxidación es extremadamente lenta (días), a un pH entre 3 y 6 es lenta, moderadamente rápida en un pH de 6 a 8 y rápida por encima de 8 unidades. La reacción de oxidación ocurre en cuestión de minutos en el rango de pH entre 8.0 y 9.0, por lo tanto, el parámetro de control de diseño de la aireación es función de la eficiencia con que se transfiere el oxígeno y no de la reacción química entre el hierro y el oxígeno. (Ref.4)

### **1.2.3. Sedimentación**

Los sólidos generados durante las dos primeras etapas del tratamiento están compuestos generalmente por hidróxido férrico, exceso de cal sin reaccionar e impurezas.

La neutralización de agua ácida residual con cualquier tipo de cal produce sólidos que se depositan lentamente, caracterizándose por su consistencia liviana, gelatinosa y muy voluminosa. Los sólidos formados en un rango de pH de 6.4 a 7.2 tienen mejores propiedades de deposición, pero la oxidación del hierro es pobre, por lo que la producción de sólidos se incrementa con la concentración de hierro. (Ref.4)

La eliminación de éstos sólidos se realiza en un filtro de arena el cual los retiene dejando pasar el agua neutra y con bajo contenido de hierro.

## 2. RESULTADOS

**Tabla II. Resultados de la neutralización de agua ácida residual con cal hidratada alta en calcio.**

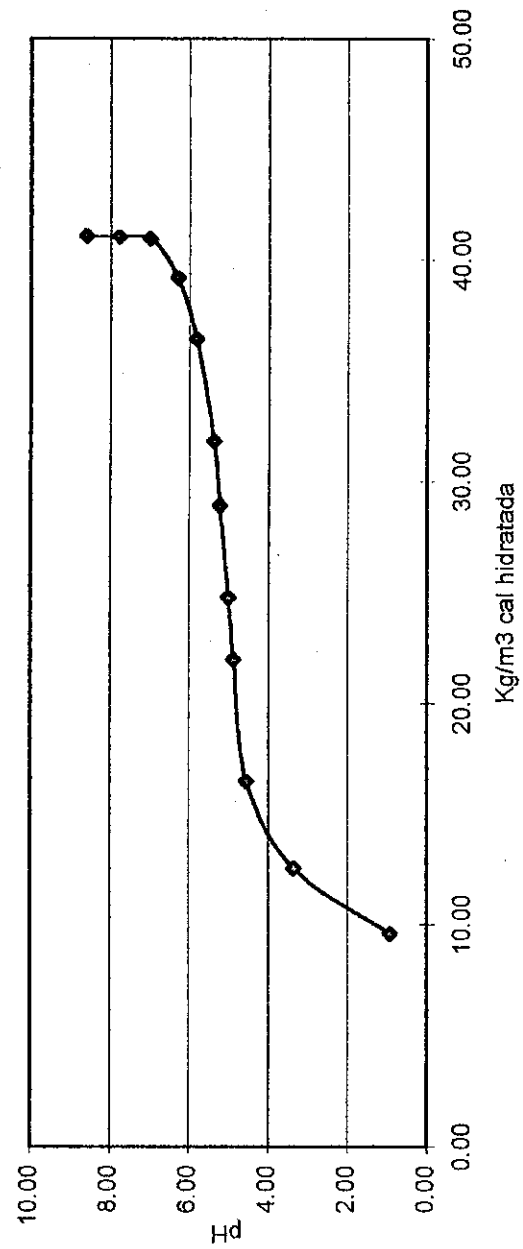
Volumen de lechada de cal añadido cm <sup>3</sup>	Kg de Ca(OH) <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> de HCl	pH				PROMEDIO
		No. de Prueba				
		1	2	3	4	
12	9.57	1.04	0.78	1.01	0.95	0.95
17	12.54	3.43	3.23	3.46	3.40	3.38
25	16.48	4.64	4.48	4.62	4.52	4.57
40	21.97	4.88	4.88	4.92	4.90	4.90
50	24.72	5.01	5.01	5.05	5.02	5.02
70	28.84	5.18	5.28	5.31	5.20	5.24
90	31.78	5.31	5.44	5.47	5.32	5.39
140	36.43	5.80	5.86	5.90	5.79	5.84
190	39.14	6.24	6.26	6.45	6.31	6.32
240	40.92	7.03	6.98	7.02	7.01	7.01
243	41.00	7.82	7.79	7.76	7.80	7.79
244	41.03	8.62	8.59	8.58	8.65	8.61
Concentración de hierro a pH 7 Kg/m <sup>3</sup>		0.1	0.06	0.064	0.084	0.08

**Tabla III. Resultados de la neutralización de agua ácida residual con cal dolomítica**

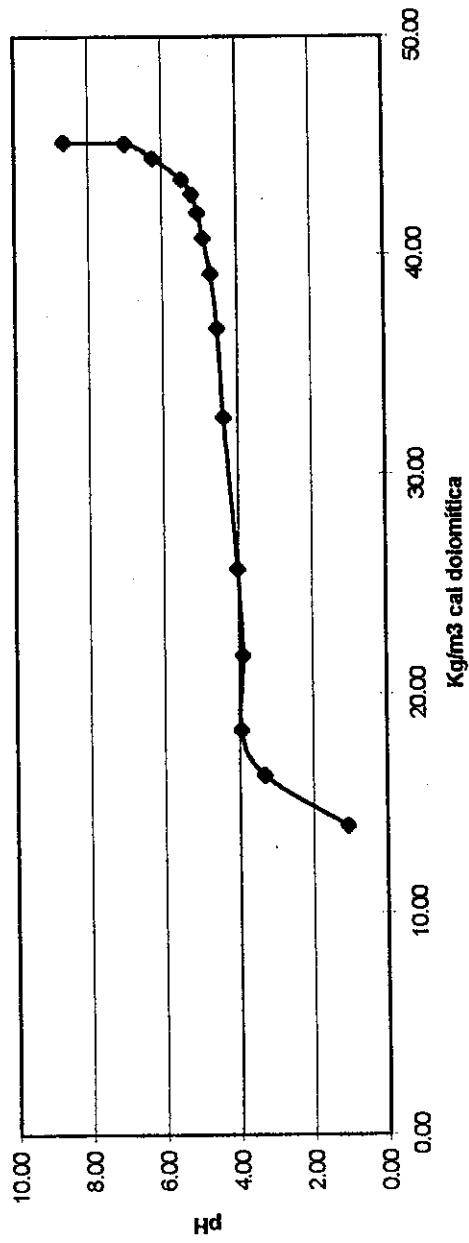
Volumen de lechada de cal añadido cm <sup>3</sup>	Kilogramo de cal dolomítica por m <sup>3</sup> de HCl	pH				PROMEDIO
		No. de Prueba				
		1	2	3	4	
20	13.97	1.10	1.01	1.15	1.12	1.10
25	16.30	3.30	3.3	3.40	3.36	3.34
30	18.34	4.00	3.77	4.08	4.03	3.97
40	21.73	3.83	3.73	4.00	4.10	3.92
55	25.61	4.02	3.85	4.10	4.18	4.04
100	32.60	4.47	4.38	4.32	4.39	4.39
150	36.67	4.50	4.55	4.56	4.64	4.56
200	39.12	4.69	4.71	4.71	4.76	4.72
250	40.75	4.91	4.87	4.89	4.95	4.91
300	41.91	5.01	5.04	5.05	5.09	5.05
350	42.78	5.17	5.20	5.22	5.27	5.22
400	43.46	5.43	5.50	5.48	5.55	5.49
500	44.45	6.22	6.25	6.26	6.31	6.26
600	45.13	7.01	6.99	7.03	7.06	7.02
610	45.19	8.68	8.60	8.70	8.71	8.67
Concentración de hierro a pH 7 Kg/m <sup>3</sup>		3.82	3.36	3.64	3.92	3.69



Gráfica No.3  
Curva de neutralización con cal hidratada



**Gráfica No. 4**  
**Curva de neutralización con cal dolomítica**



### 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se evaluó el comportamiento de los agentes alcalinos: cal hidratada alta en calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y cal dolomítica [ $(\text{Ca}(\text{OH})_2)_{0.6} (\text{Mg}(\text{OH})_2)_{0.4}$ ]; en la neutralización de agua ácida residual proveniente del lavado de metales en la industria de galvanizado; por medio de la construcción de una curva de titulación que indica la cantidad de cal necesaria para la neutralización de una solución agotada de ácido clorhídrico residual al 2% en peso y una concentración de ion ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) de  $151 \text{ Kg/m}^3$ , esta curva se realizó para cada uno de los agentes alcalinos seleccionados.

La experimentación se basó en el diseño de una planta de tratamiento compuesta por un reactor con agitación para la neutralización de ácido clorhídrico residual y con aireación para la oxidación del ion ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) contenido en el ácido residual; además un tanque con agitación por medio de aire para la preparación de la suspensión cal-agua (ver Apéndice A).

Para ello se añadieron diferentes volúmenes de cal en forma de lechada, es decir, una suspensión agua-cal al 4.8% para mejorar el contacto del álcali con el ácido, es recomendable no utilizar suspensiones mayores al 10% en peso de cal debido a que esto ocasiona problemas de operación y mantenimiento del equipo. (Ref.4). Antes de añadir cada volumen de lechada al ácido residual, ésta se agitó vigorosamente para homogeneizar la suspensión y luego se agregó el volumen determinado al ácido residual agitando la mezcla continuamente; la lectura del pH se realiza cuando la reacción entre la cal y el ácido alcanza el equilibrio y no hay variación en las unidades de pH.

Este equilibrio se ve afectado por la oxidación del ion ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) como hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) debido a que la reacción produce nuevamente ácido clorhídrico, por lo que el proceso incluye la neutralización de ácido libre y el ácido formado por la oxidación del hierro. En las pruebas se determinó la concentración de hierro al alcanzar la neutralización indicada por el valor de pH igual a 7.

El propósito fue obtener la concentración óptima para la neutralización del ácido residual de una industria de galvanizado y así seleccionar el agente alcalino que haga efectivo el tratamiento, disminuyendo costos y mejorando las condiciones de operación.

En la tabla II se observan los resultados obtenidos durante la neutralización con cal hidratada de alto contenido de calcio. Partiendo del resultado promedio de las pruebas realizadas se elaboró la gráfica No.1, en ella se demuestra el comportamiento del pH durante la neutralización de ácido con las diferentes cantidades añadidas de cal en  $\text{Kg}/\text{m}^3$ , como se puede observar el pH aumentó rápidamente al inicio desde 0.95 hasta 4.57 (3.62 unidades de pH) añadiendo el 40.2% ( $16.48 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ) de la cantidad total para alcanzar un pH igual a 8.61, en este rango la oxidación es extremadamente lenta. Luego, el aumento de pH desde 4.57 hasta 5.84 (1.27 unidades de pH) fue lento y se añadió el 48.6% ( $19.95 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ) de la cal total, en este rango de pH la oxidación se desarrolla lentamente y la formación de nuevo ácido proveniente de la oxidación del ion ferroso a hidróxido férrico provoca el uso de una cantidad considerable de cal para un aumento menor en el pH.

Por último se alcanzó la neutralización,  $\text{pH}=7$ , añadiendo el 11% ( $4.49\text{Kg}/\text{m}^3$ ) de cal total con un aumento en el  $\text{pH}$  desde 5.84 hasta 7.01 (0.69 unidades de  $\text{pH}$ ), en este rango la oxidación ocurre moderadamente rápida, por lo que al añadir el álcali se neutraliza inmediatamente el ácido producido. Una ventaja de este tipo de cal es su reactividad a valores elevados de  $\text{pH}$ , debido a que la calcinación e hidratación de la piedra de la cual se origina es más eficiente y homogénea que para la cal dolomítica. (Ref.5)

Para alcanzar un  $\text{pH}$  de 8.65 únicamente se necesitó el 0.27% de cal ( $0.11\text{ Kg}/\text{m}^3$ ), en este valor de  $\text{pH}$ , el proceso de aireación resulta más eficiente para la oxidación del ion ferroso. La concentración de hierro en el agua ácida residual se redujo de  $151\text{ Kg}/\text{m}^3$  a  $0.08\text{ Kg}/\text{m}^3$  cuando se alcanzó un  $\text{pH}$  de 7 unidades, determinando así que durante el proceso de neutralización ocurre la mayor oxidación de hierro y por consiguiente se neutraliza la mayoría de ácido producido durante la misma.

La tabla III presenta los resultados de la neutralización de ácido residual con cal hidratada dolomítica, a partir del  $\text{pH}$  promedio se elaboró la gráfica No.2, en la cual se observa el aumento rápido en el  $\text{pH}$  en el rango de 1.10 a 3.97 (3.4 unidades de  $\text{pH}$ ) utilizando el 40.6% ( $18.34\text{ Kg}/\text{m}^3$ ) de la cantidad total de dolomítica para alcanzar un  $\text{pH}$  de 8.67. Luego se observa un aumento lento en el  $\text{pH}$  conforme aumenta la concentración de cal añadida, este rango se extiende desde un  $\text{pH}$  de 3.97 hasta 5.05 (1.08 unidades de  $\text{pH}$ ) utilizando el 52% ( $23.57\text{Kg}/\text{m}^3$ ) de cal, la oxidación se produce durante el aumento en el  $\text{pH}$  al igual que en el experimento anterior con la diferencia que la cal dolomítica posee una menor reactividad, es decir que su velocidad de reacción es muy lenta, por lo que es necesario añadir excesos de cal para incrementarla.

La baja reactividad que presenta la cal dolomítica se debe a que durante la calcinación de la piedra se produce óxido de magnesio (MgO) con mayor grado de calcinación debido a que éste se empieza a formar a una menor temperatura que el óxido de calcio (CaO). Aunque el CaO se forme por medio de una calcinación leve, el MgO formado influye en la baja reactividad de la cal viva obtenida. (Ref.5) Además debido a su mayor estabilidad, no absorbe agua tan rápidamente como la cal alta en calcio por lo que la fracción de MgO que se convierte a hidróxido durante la hidratación es usualmente del 2 ó 3%. (Ref.4)

Para alcanzar la neutralización con cal dolomítica desde un pH de 5.05 hasta 7.02 (aumento en 1.97) se utilizó el 7.13% de cal ( $3.22 \text{ Kg/m}^3$ ), solamente el 0.13% de cal ( $0.06 \text{ Kg/m}^3$ ) se utilizó para aumentar el pH de 7.02 a 8.67. La concentración de hierro disminuyó de  $151 \text{ Kg/m}^3$  a  $3.69 \text{ Kg/m}^3$ , determinando que se utilizó una concentración mayor de cal para neutralizar una menor concentración de ácido comparado con la cal alta en calcio.

Aunque para realizar este estudio no se evaluó el tiempo de neutralización es importante mencionar que para cada prueba realizada con cal dolomítica se utilizó un tiempo de 10 horas para una muestra de  $50 \text{ cm}^3$  de ácido mientras que con la cal hidratada alta en calcio y la misma cantidad de muestra se utilizaron 4 horas para alcanzar la neutralización.

Según el análisis estadístico contenido en el apéndice C, se comprobó la veracidad en las mediciones de pH obtenidas en cada prueba determinando diferencias insignificantes entre los valores de pH obtenidos para cada cantidad de cal añadida.

Por último, se determinó que la concentración óptima para alcanzar la neutralización ( $\text{pH} = 7$ ) de ácido clorhídrico residual utilizando cal hidratada con alto contenido de calcio es de  $40.92 \text{ Kg/m}^3$  con un costo de  $Q 26.32 / \text{m}^3$  de ácido residual mientras que para la cal dolomítica es de  $45.13 \text{ Kg/m}^3$  con un costo de  $Q 8.94 / \text{m}^3$  de ácido residual.

Evaluando los resultados en base al costo del reactivo, se tiene a la cal dolomítica como la mejor alternativa, pero aunque su costo es menor se utiliza una mayor cantidad por  $\text{m}^3$ ,  $4.21 \text{ Kg/m}^3$ , esto indica una mayor cantidad de sólidos generados por el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  precipitado y el  $\text{MgO}$  sin reaccionar proveniente de los excesos de cal añadidos para alcanzar la neutralización. Otra desventaja es el tiempo que requiere la cal dolomítica para neutralizar el ácido residual del proceso de galvanizado, que supera en 2.5 veces el tiempo utilizado en la neutralización con cal alta en Ca, si en la planta de tratamiento en la cual se basó el presente trabajo se tratan  $25 \text{ m}^3$  en 5 días continuando inmediatamente con el siguiente volumen, por lo que se necesitarían tanques y equipo más grande con mayor costo de inversión, para poder retener el ácido residual y el álcali hasta completar el tratamiento y así cumplir con las descargas establecidas en la galvanizadora.

Como la planta de tratamiento en la que se basó el presente trabajo ya está diseñada y construida, el agente alcalino que cumple con las condiciones de operación para las cuales fue diseñada, es la cal hidratada con alto contenido de calcio, aunque el costo de reactivo es mayor que la cal dolomítica, el bajo costo de inversión inicial y el pequeño espacio que ocupa compensa esta diferencia.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó que la neutralización con cal hidratada alta en calcio presentó más ventajas, porque se utilizó una menor concentración de agente alcalino y alcanzó un pH de 7 en menos tiempo.
2. La concentración óptima de cal hidratada alta en calcio para alcanzar un pH de 7 con una desviación estándar de 0.005, fue de 40.92 kilogramo por metro cúbico.
3. La concentración óptima de cal dolomítica para alcanzar un pH de 7 con una desviación estándar de 0.02, fue de 45.13 kilogramo por metro cúbico.
4. El costo por unidad de volumen para alcanzar un pH de 7 en la neutralización de agua ácida residual con cal hidratada es 2.94 veces más alto que con cal dolomítica.
5. El agente alcalino efectivo para la neutralización de agua ácida residual del proceso de galvanizado es la cal hidratada de alto contenido de calcio, ya que aunque el costo por unidad de volumen de agua residual tratada sea más alto, la velocidad de neutralización es mayor y la concentración utilizada es menor por lo que produce una menor acumulación de lodos.



## RECOMENDACIONES

1. La selección del agente alcalino que haga efectiva la neutralización de agua ácida residual del proceso de galvanizado debe determinarse solamente luego de un cuidadoso análisis económico y mediante pruebas de laboratorio, antes de diseñar la planta de tratamiento de agua.
2. Para determinar el costo de neutralización de agua ácida residual se debe incluir, además del costo del reactivo: la formación y disposición de lodos, el grado y velocidad de neutralización requerido y el equipo a utilizar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dupont Corp. **Manual de Galvanizado**. (Estados Unidos, 1985.) pp. 2-3.
2. Kennet Whitten y otros. **Química General**. (3era. Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 1992), pp. 392
3. Joint committee of the water pollution control federation. **Waste water treatment plant design**. (Estados Unidos: Editorial Lancaster Press Inc., 1977.), pp. 183-184.
4. Environmental Protection Agency EPA-600/2-83-001. **Design manual: Neutralization of Acid Mine Drainage**. (Estados Unidos: Office of Research and Development, 1983), pp. 5-15, 28, 46-47, 71-73, 96.
5. Robert Boyton. **Chemistry and technology of lime and limestone**. (2da. ed. Estados Unidos: Editorial John Wiley and sons, Inc., 1980.), pp. 160-161, 210-215, 412-418.
6. National lime association. **Lime handling, application, and storage in treatment processes**. (Washington, D.C. : s.e., 1971), pp. 21-25, 31.
7. H.L. Jacobs. " In waste treatment: Know your chemicals, save money", **Chemical Engineering**: 88-91. 1960.
8. Ronald Walpole y Raymond H. Myers. **Probabilidad y estadística**, (4ta.ed. México: Editorial McGraw-Hill, 1992), pp. 734-735.

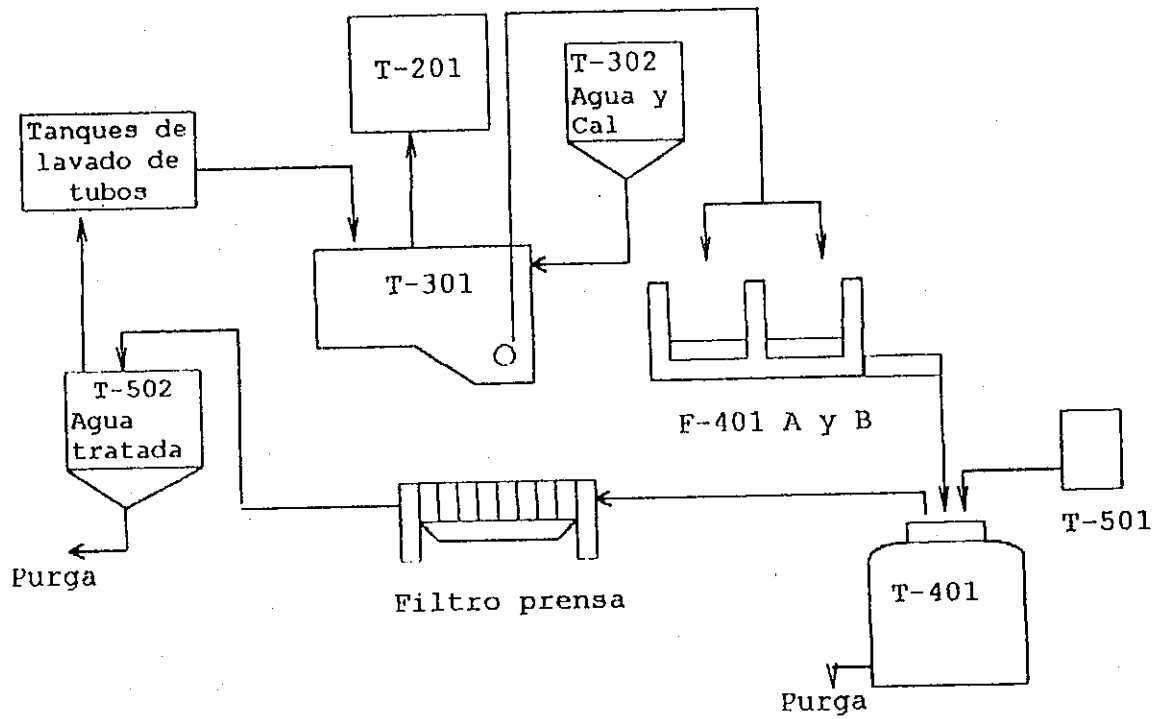
## BIBLIOGRAFÍA

1. ENVIRONMENTAL Protection Agency EPA-600/4-79-020. **Methods for chemical Analysis of water and wastes.** Estados Unidos: Office of Research and Development, 1983.
2. GORONSZY, Mervyn y otros. "Waste water: A guide to industrial pretreatment. A variety of mechanical and biological methods are a your disposal". **Chemical Engineering.** (Estados Unidos), (99): 78. 1992.
3. WANG, Lawrence K. Y Sung Wang Mu Hao. **Handbook of industrial waste treatment.** Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc. 1992.

## APÉNDICE

# APÉNDICE A.

Figura 5. Diagrama de planta de tratamiento de agua ácida residual.



**Tabla IV. Dimensiones de equipo en la planta de tratamiento**

<b>Descripción</b>	<b>Volumen</b>
T-301 Reactor de concreto	30 m <sup>3</sup>
T-302 Preparación de lechada	15 m <sup>3</sup>
T-201 Almacenaje de agua residual	20 m <sup>3</sup>
T-401 Receptor de agua de filtros de arena	5 m <sup>3</sup>
T-501 Preparación de coagulante	0.2m <sup>3</sup>
T-502 Almacén de agua tratada	15 m <sup>3</sup>
F- 401 A y B Filtro de arena y grava	20 m <sup>3</sup>

## **APÉNDICE B.**

### **MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

#### **Recursos**

##### **Equipo de laboratorio**

- Potenciómetro Marca HANNA modelo HI 9024. Exactitud de  $\pm 0.01$ .
- Balanza analítica marca ACCULAB. Exactitud de  $\pm 0.01$  gramos.
- Bureta de  $50 \text{ cm}^3$
- Balones aforados de  $500$  y  $1000 \text{ cm}^3$
- Erlenmeyer de  $250 \text{ cm}^3$
- Pipetas de  $5$  y  $10 \text{ cm}^3$
- Equipo de agitación con barra magnética.
- Espectrofotómetro
- Hornilla eléctrica
- Frascos de vidrio
- Probetas graduadas.

##### **Reactivos**

1. Solución buffer estándar primario.
2. Solución buffer estándar secundario.
3. Solución estándar de carbonato de sodio  $0.548 \text{ N}$ .
4. Indicador naranja de metilo.
5. Dicromato de potasio  $0.1 \text{ N}$ .
6. Indicador difenilamina sulfúrica
7. Cal hidratada y dolomítica

## **Método de determinación de pH**

### **Calibración de potenciómetro**

1. Colocar un volumen suficiente de solución buffer que cubra el extremo del electrodo y brinde espacio para la barra magnética
2. Sumergir el electrodo en la muestra agitando constantemente de manera adecuada.
3. Calibrar con dos puntos diferentes de acuerdo a las instrucciones del manual del fabricante.

### **Medición de pH**

4. Luego de la calibración se limpia el electrodo con agua desmineralizada y se sumerge en el beacker que contiene la muestra de ácido residual agitando constantemente para obtener homogeneidad y sólidos en suspensión. Anotar la lectura de pH y temperatura.

### **Cálculos**

El potenciómetro brinda una lectura directa de las unidades de pH. Reportar el pH con una aproximación de 0.1 unidades y la temperatura en °C.



## Determinación de ácido libre

### Principio

La concentración de ácido libre se determina por medio de la titulación con una solución estándar de carbonato de sodio con un indicador del punto final en un pH cercano a 4. El naranja de metilo, el cual cambia de rojo a amarillo en un intervalo de pH de 3.1 a 4.4, es el más utilizado. A valores de pH cercanos o sobre 4.5 unidades, el hidróxido ferroso empieza a precipitar lo que provoca un enmascaramiento del cambio de color en el punto final causando serios errores en la titulación de ácido libre.

### Procedimiento

1. Medir 2 cm<sup>3</sup> de ácido clorhídrico residual con una pipeta y agregarlo en un earlenmeyer conteniendo 100 cm<sup>3</sup> de agua destilada. Añadir de 3 a 4 gotas de indicador naranja de metilo.
2. Titular la muestra con solución estándar de carbonato de sodio 0.548 N hasta observar el cambio de color de rojo a amarillo.
3. Determinar la concentración de ácido en gramos/ 100 cm<sup>3</sup> leyendo directamente el número de centímetros cúbicos de carbonato de sodio utilizados.

## Determinación de Hierro

1. Mezclar 10 cm<sup>3</sup> de muestra, 50 cm<sup>3</sup> de agua desmineralizada, 5 gotas de difenilamina sulfúrica.
2. Valorar con dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 0.1N hasta observar el viraje de incoloro a azul violeta.
3. Por estequiometría se sabe que un cm<sup>3</sup> de dicromato equivale a 0.56 Kg/m<sup>3</sup> de hierro (Fe<sup>+2</sup>) por lo que la concentración de hierro se obtiene:

$$\text{Kg/ m}^3 (\text{Fe}^{+2}) = (\text{cm}^3 \text{ de K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) * 0.56$$

## Curva de neutralización

1. Agregar 50 cm<sup>3</sup> de ácido residual en un earlenmeyer de 1000 cm<sup>3</sup>.
2. Preparar 1,000 ml de lechada con el 4.8% en peso de cal. Las propiedades de la suspensión de cal hidratada alta en calcio en agua al 4.8% son: densidad específica de 1.03 para 49.02 gramos por litro (ver Anexo 1).
3. Determinar la densidad de la suspensión de cal dolomítica, pesando un volumen conocido de mezcla (densidad=masa/volumen). En este experimento resultó una densidad de 1.004 g/cm<sup>3</sup> para una suspensión al 4.82%, con 48.48 g de cal por litro.
3. Añadir pequeños volúmenes de lechada a la muestra de ácido hasta observar una variación de una unidad de pH alcanzando el equilibrio después de cada adición de cal. La agitación debe ser constante.
4. Continuar con la adición de cal hasta alcanzar un pH de 8.0 ó 9.0. Plotear los valores de pH obtenidos en una curva de titulación, pH versus Kg de cal por m<sup>3</sup> de ácido residual.

### Cálculo de Kg de cal por m<sup>3</sup> de ácido residual:

v= volumen de muestra

V= volumen de suspensión añadido en cm<sup>3</sup>

d= densidad de suspensión en g/cm<sup>3</sup>

%= porcentaje de cal en la suspensión

$$\text{Kg de cal / m}^3 \text{ de ácido residual} = \frac{V * d * \% * 10}{(V + v)}$$

Así se tiene para 240 cm<sup>3</sup> de suspensión de cal hidratada alta en Ca al 4.8%, densidad de 1.03 g/ cm<sup>3</sup> y muestra de ácido de 50 cm<sup>3</sup> un resultado de 40.92 Kg/ m<sup>3</sup>, (ver Tabla II), de la misma forma se obtienen los datos de la cal dolomítica variando los valores correspondientes.

## APÉNDICE C.

### Procedimiento estadístico para el análisis de resultados

#### Distribución muestral de $(n - 1) s^2 / \sigma^2$

Para comprobar la veracidad de las mediciones de pH obtenidas en cada prueba y poder utilizar el promedio de los datos sin afectar el resultado final se utilizó la distribución muestra, la cual se refiere a la distribución de probabilidad de un estadístico que depende del tamaño de muestra ( $n$ ), la variancia muestral ( $s^2$ ) y la desviación estándar ( $\sigma^2$ ).

#### 1. Estadística

Si  $s^2$  es la variancia de una muestra aleatoria, tomada de una población normal, los valores de la variable aleatoria  $X^2$  se calculan a partir de cada muestra por la fórmula:

$$X^2 = \frac{(n - 1) s^2}{\sigma^2} \quad [5]$$

La cual tiene una distribución ji cuadrada con  $v = n - 1$  grados de libertad. La probabilidad de que una muestra aleatoria produzca un valor  $X^2$  más grande que cualquier valor especificado es igual al área  $\alpha$  bajo la curva a la derecha de este valor.

La tabla VII da los valores de  $\chi^2_{\alpha}$  para varios valores de  $\alpha$  y  $v$ . Las áreas son los encabezados de las columnas; la columna izquierda presenta los grados de libertad  $v$  y el cuerpo de la tabla son los valores de  $\chi^2$ .

El 95% de una distribución ji cuadrada cae entre  $\chi^2_{0.975}$  y  $\chi^2_{0.025}$ . Un valor de  $\chi^2$  que cae a la derecha de  $\chi^2_{0.025}$  no puede ocurrir a no ser que el valor supuesto de  $\sigma^2$  sea demasiado pequeño. De igual manera, un valor de  $\chi^2$  que cae a la izquierda de  $\chi^2_{0.975}$  es imposible a no ser que el valor asumido de  $\sigma^2$  sea bastante grande. Por lo tanto es posible tener un valor de  $\chi^2$  a la izquierda de  $\chi^2_{0.975}$  o a la derecha de  $\chi^2_{0.025}$  cuando  $\sigma^2$  es correcto.

Conociendo estos parámetros, se procedió a determinar la menor desviación estándar posible por cada tipo de cal a partir de las mediciones de pH obtenidas en las cuatro pruebas. Para ello se tienen los siguientes datos:

$$\text{Grados de libertad } (v) = 4 - 1 = 3$$

La variancia muestral se obtiene con la siguiente ecuación:

$$s^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad [6]$$

En la tabla VI se obtienen los valores de  $\chi^2$  correspondientes al 95% de la distribución ji cuadrada con 3 grados de libertad, los cuales se utilizarán para determinar la desviación estándar en el pH para la neutralización con cada tipo de cal:

$$\chi^2_{0.975} = 0.216$$

$$\chi^2_{0.025} = 9.348$$

Como la desviación estándar,  $\sigma^2$ , es el dato que se desea obtener, se despeja de la ecuación [5], sustituyendo las variancias obtenidas para cada concentración de cal añadida y fijando el dato menor o mayor de  $X^2$  según corresponde, tal como se muestra en las tablas IV y V para cada tipo de cal.

Con los resultados se obtiene por inspección la menor  $\sigma^2$  que haga posible mantener los valores de  $X^2$  en cada adición de cal dentro del rango correspondiente al 95% de la distribución ji cuadrada.

## 2. Resultados

Para la neutralización con cal hidratada alta en calcio se obtiene una desviación estándar de 0.005 unidades en las mediciones de pH, dato con el cual el valor de  $X^2$  se mantiene dentro del rango de distribución establecido.

En la neutralización con cal dolomítica, la desviación estándar es de 0.02 unidades de pH, siendo este resultado mayor que para la cal hidratada.

Tomando en cuenta que el potenciómetro utilizado tiene una aproximación de  $\pm 0.01$ , se concluye que no existe diferencia significativa en las mediciones de pH realizadas en cada prueba, por lo que se comprueba la veracidad de los experimentos.

**Tabla V. Resultados de análisis estadístico en los valores de pH durante la neutralización con cal hidratada alta en calcio**

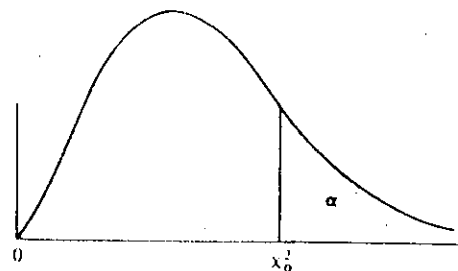
Volumen de lechada de cal añadido cm <sup>3</sup>	Kg de Ca(OH) <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> de HCl	pH				Resultado
		variancia S <sup>2</sup>	Desviación estándar según valor mínimo de distribución muestral con v=3	Desviación estándar según valor máximo de distribución muestral con v=3	Valor X2 para desv.std.= 0.005 unidades de pH y v=3	
12	9.57	0.0135	0.1875	0.0043	8.10	0.216« 8.10 «9.348
17	12.54	0.0106	0.1472	0.0034	6.36	0.216« 6.36 «9.348
25	16.48	0.0060	0.0829	0.0019	3.58	0.216« 3.58 «9.348
40	21.97	0.0004	0.0051	0.0001	0.22	0.216« 0.22 «9.348
50	24.72	0.0004	0.0050	0.0001	0.22	0.216« 0.22 «9.348
70	28.84	0.0039	0.0541	0.0012	2.34	0.216« 2.34 «9.348
90	31.78	0.0067	0.0931	0.0022	4.02	0.216« 4.02 «9.348
140	36.43	0.0027	0.0374	0.0009	1.61	0.216« 1.61 «9.348
190	39.14	0.0090	0.1245	0.0029	5.38	0.216« 5.38 «9.348
240	40.92	0.0005	0.0065	0.0001	0.28	0.216« 0.28 «9.348
243	41.00	0.0006	0.0087	0.0002	0.38	0.216« 0.38 «9.348
244	41.03	0.0010	0.0139	0.0003	0.60	0.216« 0.60 «9.348



**Tabla VI. Resultados de análisis estadístico en los valores de pH durante la neutralización con cal dolomítica**

Volumen de lechada de cal añadido cm <sup>3</sup>	Kilogramos de cal dolomítica por m <sup>3</sup> de HCl	Para valores de pH				Resultado
		Variación S <sup>2</sup>	Desviación estándar según valor mínimo de distribución muestral con v=3	Desviación estándar según valor máximo de distribución muestral con v=3	Valor X <sup>2</sup> para desv. std. = 0.02 unidades de pH y v=3	
20	13.97	0.0036	0.0505	0.0012	1.09	0.216« 1.09 «9.348
25	16.30	0.0024	0.0333	0.0008	0.72	0.216« 0.72 «9.348
30	18.34	0.0189	0.2620	0.0061	5.66	0.216« 5.66 «9.348
40	21.73	0.0276	0.3838	0.0089	8.29	0.216« 8.29 «9.348
55	25.61	0.0199	0.2763	0.0064	5.97	0.216« 5.97 «9.348
100	32.60	0.0038	0.0528	0.0012	1.14	0.216« 1.14 «9.348
150	36.67	0.0034	0.0466	0.0011	1.01	0.216« 1.01 «9.348
200	39.12	0.0009	0.0124	0.0003	0.27	0.216« 0.27 «9.348
250	40.75	0.0012	0.0162	0.0004	0.35	0.216« 0.35 «9.348
300	41.91	0.0011	0.0152	0.0004	0.33	0.216« 0.33 «9.348
350	42.78	0.0018	0.0245	0.0006	0.53	0.216« 0.53 «9.348
400	43.46	0.0025	0.0343	0.0008	0.74	0.216« 0.74 «9.348
500	44.45	0.0014	0.0194	0.0004	0.42	0.216« 0.42 «9.348
600	45.13	0.0009	0.0124	0.0003	0.27	0.216« 0.27 «9.348
610	45.19	0.0025	0.0346	0.0008	0.75	0.216« 0.75 «9.348

**Tabla VII. Valores críticos de la distribución ji cuadrada**



v	$\alpha$									
	.995	.99	.98	.975	.95	.90	.80	.75	.70	.50
1	.04393	.04157	.04628	.04982	.00393	.0158	.0642	.102	.148	.455
2	.0100	.0201	.0404	.0506	.103	.211	.446	.575	.713	1.386
3	.0717	.115	.185	.216	.352	.584	1.005	1.213	1.424	2.366
4	.207	.297	.429	.484	.711	1.064	1.649	1.923	2.195	3.357
5	.412	.554	.752	.831	1.145	1.610	2.343	2.675	3.000	4.351
6	.676	.872	1.134	1.237	1.635	2.204	3.070	3.455	3.828	5.348
7	.989	1.239	1.564	1.690	2.167	2.833	3.822	4.255	4.671	6.346
8	1.344	1.646	2.032	2.180	2.733	3.490	4.594	5.071	5.527	7.344
9	1.735	2.088	2.532	2.700	3.325	4.168	5.380	5.899	6.393	8.343
10	2.156	2.558	3.059	3.247	3.940	4.865	6.179	6.737	7.267	9.342
11	2.603	3.053	3.609	3.816	4.575	5.578	6.989	7.584	8.148	10.341
12	3.074	3.571	4.178	4.404	5.226	6.304	7.807	8.438	9.034	11.340
13	3.565	4.107	4.765	5.009	5.892	7.042	8.634	9.299	9.926	12.340
14	4.075	4.660	5.368	5.629	6.571	7.790	9.467	10.165	10.821	13.339
15	4.601	5.229	5.985	6.262	7.261	8.547	10.307	11.036	11.721	14.339
16	5.142	5.812	6.614	6.908	7.962	9.312	11.152	11.912	12.624	15.338
17	5.697	6.408	7.255	7.564	8.672	10.085	12.002	12.792	13.531	16.338
18	6.265	7.015	7.906	8.231	9.390	10.865	12.857	13.675	14.440	17.338
19	6.844	7.633	8.567	8.907	10.117	11.651	13.716	14.562	15.352	18.338
20	7.434	8.260	9.237	9.591	10.851	12.443	14.578	15.452	16.266	19.337
21	8.034	8.897	9.915	10.283	11.591	13.240	15.445	16.344	17.182	20.337
22	8.643	9.542	10.600	10.982	12.338	14.041	16.314	17.240	18.101	21.337
23	9.260	10.196	11.293	11.688	13.091	14.848	17.187	18.137	19.021	22.337
24	9.886	10.856	11.992	12.401	13.848	15.659	18.062	19.037	19.943	23.337
25	10.520	11.524	12.697	13.120	14.611	16.473	18.940	19.939	20.867	24.337
26	11.160	12.198	13.409	13.844	15.379	17.292	19.820	20.843	21.792	25.336
27	11.808	12.879	14.125	14.573	16.151	18.114	20.703	21.749	22.719	26.336
28	12.461	13.565	14.847	15.308	16.928	18.939	21.588	22.657	23.647	27.336
29	13.121	14.256	15.574	16.047	17.708	19.768	22.475	23.567	24.577	28.336
30	13.787	14.953	16.306	16.791	18.493	20.599	23.364	24.478	25.508	29.336

Fuente: Ref. 8

(Continuación)

v	x									
	.30	.25	.20	.10	.05	.025	.02	.01	.005	.001
1	1.074	1.323	1.642	2.706	3.841	5.024	5.412	6.635	7.879	10.827
2	2.408	2.773	3.219	4.605	5.991	7.378	7.824	9.210	10.597	13.815
3	3.665	4.108	4.642	6.251	7.815	9.348	9.837	11.345	12.838	16.268
4	4.878	5.385	5.989	7.779	9.488	11.143	11.668	13.277	14.860	18.465
5	6.064	6.626	7.289	9.236	11.070	12.832	13.388	15.086	16.750	20.517
6	7.231	7.841	8.558	10.645	12.592	14.449	15.033	16.812	18.548	22.457
7	8.383	9.037	9.803	12.017	14.067	16.013	16.622	18.475	20.278	24.322
8	9.524	10.219	11.030	13.362	15.507	17.535	18.168	20.090	21.955	26.125
9	10.656	11.389	12.242	14.684	16.919	19.023	19.679	21.666	23.589	27.877
10	11.781	12.549	13.442	15.987	18.307	20.483	21.161	23.209	25.188	29.588
11	12.899	13.701	14.631	17.275	19.675	21.920	22.618	24.725	26.757	31.264
12	14.011	14.845	15.812	18.549	21.026	23.337	24.054	26.217	28.300	32.909
13	15.119	15.984	16.985	19.812	22.362	24.736	25.472	27.688	29.819	34.528
14	16.222	17.117	18.151	21.064	23.685	26.119	26.873	29.141	31.319	36.123
15	17.322	18.245	19.311	22.307	24.996	27.488	28.259	30.578	32.801	37.697
16	18.418	19.369	20.465	23.542	26.296	28.845	29.633	32.000	34.267	39.252
17	19.511	20.489	21.615	24.769	27.587	30.191	30.995	33.409	35.718	40.790
18	20.601	21.605	22.760	25.989	28.869	31.526	32.346	34.805	37.156	42.312
19	21.689	22.718	23.900	27.204	30.144	32.852	33.687	36.191	38.582	43.820
20	22.775	23.828	25.038	28.412	31.410	34.170	35.020	37.566	39.997	45.315
21	23.858	24.935	26.171	29.615	32.671	35.479	36.343	38.932	41.401	46.797
22	24.939	26.039	27.301	30.813	33.924	36.781	37.659	40.289	42.796	48.268
23	26.018	27.141	28.429	32.007	35.172	38.076	38.968	41.638	44.181	49.728
24	27.096	28.241	29.553	33.196	36.415	39.364	40.270	42.980	45.558	51.179
25	28.172	29.339	30.675	34.382	37.652	40.646	41.566	44.314	46.928	52.620
26	29.246	30.434	31.795	35.563	38.885	41.923	42.856	45.642	48.290	54.052
27	30.319	31.528	32.912	36.741	40.113	43.194	44.140	46.963	49.645	55.476
28	31.391	32.620	34.027	37.916	41.337	44.461	45.419	48.278	50.993	56.893
29	32.461	33.711	35.139	39.087	42.557	45.722	46.693	49.588	52.336	58.302
30	33.530	34.800	36.250	40.256	43.773	46.979	47.962	50.892	53.672	59.703

Fuente: Ref. 8

## APÉNDICE D.

### Análisis económico

En este análisis se tomó en cuenta solamente el costo del reactivo, que para este trabajo fueron evaluados la cal hidratada con alto contenido de calcio y la dolomítica en la neutralización de agua ácida residual.

El precio de las cales en distribuidoras es el siguiente:

Cal hidratada alta en calcio: Q 0.64 / Kg

Cal dolomítica: Q 0.20 / Kg

Determinando la concentración necesaria de cal para alcanzar la neutralización a pH 7 se calculó el costo por m<sup>3</sup> de ácido residual tratado de la siguiente forma:

Para cal hidratada alta en Ca

$$\frac{Q \ 0.64}{1 \text{ Kg. de Ca(OH)}_2} * \frac{40.92 \text{ Kg. de Ca(OH)}_2}{1 \text{ m}^3 \text{ de ácido residual}} = Q26.32 / \text{m}^3$$

Para cal dolomítica

$$\frac{Q \ 0.20}{1 \text{ Kg. de cal dolomítica}} * \frac{45.13 \text{ Kg. de Ca(OH)}_2}{1 \text{ m}^3 \text{ de ácido residual}} = Q 8.94 / \text{m}^3$$

**ANEXO 1.**

**PROPIEDADES DE SUSPENSIONES CAL-AGUA**

TABLE  
PROPERTIES OF LIME SLURRIES

Approx. % Solids Ca(OH) <sub>2</sub> (by wt)	Specific Gravity @ 15°C	Pounds per gallon	Grams CaO per liter	Grams Ca(OH) <sub>2</sub> per liter	Pounds CaO per gallon	Pounds Ca(OH) <sub>2</sub> per gallon	Pounds Slurry per cubic foot	Weight Ratio Water to CaO	Weight Ratio Water to Ca(OH) <sub>2</sub>
1.5	1.010	8.41	11.7	15.46	0.097	0.128	62.94	85.70:1	64.70:1
3.2	1.020	8.50	24.4	32.24	0.203	0.268	63.62	40.81:1	30.72:1
4.8	1.030	8.58	37.1	49.02	0.309	0.408	64.22	26.77:1	20.03:1
6.3	1.040	8.66	49.8	65.81	0.415	0.548	64.82	19.87:1	14.80:1
7.8	1.050	8.75	62.5	82.59	0.520	0.686	65.49	15.83:1	11.76:1
9.4	1.060	8.83	75.2	99.37	0.626	0.826	66.09	13.11:1	9.69:1
10.8	1.070	8.91	87.9	116.15	0.732	0.966	66.69	11.17:1	8.22:1
12.2	1.080	8.99	100.0	132.14	0.833	1.10	67.29	9.79:1	7.17:1
13.7	1.090	9.08	113	149.32	0.941	1.24	67.96	8.65:1	6.32:1
15.2	1.100	9.16	126	166.50	1.05	1.39	68.56	7.72:1	5.59:1
16.4	1.110	9.25	138	182.35	1.15	1.52	69.23	7.04:1	5.09:1
18.0	1.120	9.33	152	200.85	1.27	1.68	69.83	6.35:1	4.55:1
19.2	1.130	9.41	164	216.71	1.37	1.81	70.43	5.87:1	4.20:1
20.4	1.140	9.50	177	233.89	1.47	1.94	71.10	5.46:1	3.90:1
21.8	1.150	9.58	190	251.07	1.58	2.09	71.73	5.06:1	3.58:1
23.1	1.160	9.66	203	268.24	1.69	2.23	72.35	4.72:1	3.33:1
24.4	1.170	9.75	216	285.42	1.80	2.38	72.97	4.42:1	3.10:1
25.6	1.180	9.85	229	302.60	1.91	2.52	73.73	4.15:1	2.91:1
26.9	1.190	9.91	242	319.78	2.02	2.67	74.17	3.91:1	2.71:1
28.0	1.200	10.00	255	336.96	2.12	2.80	74.85	3.72:1	2.57:1
29.2	1.210	10.08	268	354.14	2.23	2.94	75.44	3.52:1	2.43:1
30.4	1.220	10.16	281	371.31	2.34	3.09	76.04	3.34:1	2.29:1
31.5	1.230	10.24	294	388.49	2.45	3.23	76.64	3.18:1	2.17:1

(continued)

TABLE (continued)

Approx. % Solids Ca(OH) <sub>2</sub> (by wt)	Specific Gravity @ 15°C	Pounds per gallon	Grams CaO per liter	Grams Ca(OH) <sub>2</sub> per liter	Pounds CaO per gallon	Pounds Ca(OH) <sub>2</sub> per gallon	Pounds Slurry per cubic foot	Weight Ratio Water to CaO	Weight Ratio Water to Ca(OH) <sub>2</sub>
32.7	1.240	10.33	307	405.67	2.56	3.38	77.33	3.04:1	2.20:1
33.8	1.250	10.41	321	424.17	2.67	3.52	77.92	2.90:1	1.96:1
35.4	1.260	10.49	331	437.38	2.81	3.71	78.52	2.73:1	1.83:1
36.4	1.270	10.58	343	453.24	2.92	3.85	79.19	2.62:1	1.75:1
37.5	1.280	10.66	356	470.42	3.03	4.00	79.79	2.52:1	1.67:1
38.5	1.290	10.74	370	488.92	3.14	4.14	80.38	2.42:1	1.59:1
39.6	1.300	10.83	382	504.77	3.25	4.29	81.06	2.33:1	1.52:1
40.8	1.310	10.91	396	523.27	3.37	4.45	81.66	2.24:1	1.45:1
41.7	1.320	11.00	410	541.77	3.48	4.59	82.33	2.16:1	1.40:1
42.7	1.330	11.08	422	557.63	3.58	4.73	82.93	2.09:1	1.34:1
43.7	1.340	11.16	435	574.81	3.70	4.88	83.53	2.02:1	1.29:1
44.7	1.350	11.25	448	591.99	3.81	5.03	84.20	1.95:1	1.24:1
45.7	1.360	11.33	460	607.84	3.92	5.18	84.80	1.89:1	1.19:1
46.6	1.370	11.41	472	623.70	4.03	5.32	85.40	1.83:1	1.14:1
47.7	1.380	11.50	484	639.56	4.15	5.48	86.07	1.77:1	1.10:1
48.4	1.390	11.58	496	655.41	4.25	5.61	86.67	1.72:1	1.06:1
49.5	1.400	11.66	510	673.91	4.37	5.77	87.27	1.67:1	1.02:1
50.6	1.410	11.75	524	692.41	4.50	5.94	87.95	1.61:1	0.98:1
51.5	1.420	11.83	538	710.91	4.61	6.09	88.54	1.57:1	0.94:1
52.2	1.430	11.91	550	726.77	4.71	6.22	89.14	1.53:1	0.91:1
52.8	1.440	12.00	562	742.63	4.82	6.34	89.82	1.49:1	0.89:1
53.9	1.450	12.08	575	759.81	4.93	6.51	90.42	1.45:1	0.86:1

United States Environmental Protection Agency  
 Design Manual: Neutralization of Acid Mine Drainage  
 EPA/600/2-83/001  
 USA, 1983

TABLE (continued)

Approx. % Solids Ca(OH) <sub>2</sub> (by wt)	Specific Gravity @ 15°C	Pounds per gallon	Grams CaO per liter	Grams Ca(OH) <sub>2</sub> per liter	Pounds CaO per gallon	Pounds Ca(OH) <sub>2</sub> per gallon	Pounds Slurry per cubic foot	Weight Ratio Water to CaO	Weight Ratio Water to Ca(OH) <sub>2</sub>
32.7	1.240	10.33	307	405.67	2.56	3.38	77.33	3.04:1	2.20:1
33.8	1.250	10.41	321	424.17	2.67	3.52	77.92	2.90:1	1.96:1
35.4	1.260	10.49	331	437.38	2.81	3.71	78.52	2.73:1	1.83:1
36.4	1.270	10.58	343	453.24	2.92	3.85	79.19	2.62:1	1.75:1
37.5	1.280	10.66	356	470.42	3.03	4.00	79.79	2.52:1	1.67:1
38.5	1.290	10.74	370	488.92	3.14	4.14	80.38	2.42:1	1.59:1
39.6	1.300	10.83	382	504.77	3.25	4.29	81.06	2.33:1	1.52:1
40.8	1.310	10.91	396	523.27	3.37	4.45	81.66	2.24:1	1.45:1
41.7	1.320	11.00	410	541.77	3.48	4.59	82.33	2.16:1	1.40:1
42.7	1.330	11.08	422	557.63	3.58	4.73	82.93	2.09:1	1.34:1
43.7	1.340	11.16	435	574.81	3.70	4.88	83.53	2.02:1	1.29:1
44.7	1.350	11.25	448	591.99	3.81	5.03	84.20	1.95:1	1.24:1
45.7	1.360	11.33	460	607.84	3.92	5.18	84.80	1.89:1	1.19:1
46.6	1.370	11.41	472	623.70	4.03	5.32	85.40	1.83:1	1.14:1
47.7	1.380	11.50	484	639.56	4.15	5.48	86.07	1.77:1	1.10:1
48.4	1.390	11.58	496	655.41	4.25	5.61	86.67	1.72:1	1.06:1
49.5	1.400	11.66	510	673.91	4.37	5.77	87.27	1.67:1	1.02:1
50.6	1.410	11.75	524	692.41	4.50	5.94	87.95	1.61:1	0.98:1
51.5	1.420	11.83	538	710.91	4.61	6.09	88.54	1.57:1	0.94:1
52.2	1.430	11.91	550	726.77	4.71	6.22	89.14	1.53:1	0.91:1
52.8	1.440	12.00	562	742.63	4.82	6.34	89.82	1.49:1	0.89:1
53.9	1.450	12.08	575	759.81	4.93	6.51	90.42	1.45:1	0.86:1

United States Environmental Protection Agency  
 Design Manual: Neutralization of Acid Mine Drainage  
 EPA/600/2-83/001  
 USA, 1983