

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y TEXTIL



**“CONTROL QUÍMICO DE INCRUSTACIONES EN CARBÓN
ACTIVADO, PARA LOS PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE ORO
(CIC)”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

MARCO ANTONIO AGUIRRE OCANA

LIMA – PERÚ

2004

En gratitud a mi esposa e hijos por su gran amor y constante apoyo, a mis padres por su esfuerzo y dedicación.

RESUMEN

La recuperación de metales preciosos a partir de soluciones de lixiviación puede realizarse a través de diferentes procedimientos, en los que se encuentra la precipitación con polvo de zinc o procesos Merrill Crowe y la adsorción con carbón activado. Entre los factores que determinan el procedimiento a utilizar se encuentran la composición química de la solución lixivante y la relación de concentración de metales preciosos en solución, principalmente. La precipitación con polvo de zinc es recomendable para aquellas soluciones con alto contenido de plata (relación de plata a oro mayor de 10), o con una concentración alta de arcillas. La adsorción con carbón activado se recomienda con soluciones de baja ley y que corresponde a la planta de procesamiento de minerales que es tema de nuestro estudio.

Dado que el carbón activado tiene una gran selectividad por los metales preciosos, el principal problema de la aplicación de este método se asociaba hasta hace algunos años a la etapa de despojamiento. Sin embargo el desarrollo de los procesos Zadra y A.A.R.L para el despojamiento del carbón permitió que estos métodos de recuperación de metales preciosos se popularizaran significativamente, en principio el Zadra y actualmente el AARL.

Ambos procesos emplean soluciones alcalinas y altas temperatura para la recuperación del metal precioso, lo cual incrementa la tendencia de las incrustaciones de naturaleza inorgánica en las porosidades del carbón activado, ocasionando finalmente una pérdida de capacidad de adsorción en el carbón conforme aumenta su tiempo de reciclaje en el circuito de recuperación. En consecuencia para poder mantener las propiedades de adsorción en el carbón es necesario evitar las posibles incrustaciones calcáreas, mediante la aplicación de polímeros químicos específicos y cuya efectividad será demostrada en presente trabajo.

INDICE

RESUMEN

I.	INTRODUCCIÓN	6
II.	DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS	7
2.1.	Química del Agua	7
2.2.	Fuentes de Agua en Procesos Mineros	10
2.3.	Problemas de Incrustación Ocasionados por la Calidad de Agua	12
2.4.	Factores Necesarios para la Formación de Incrustaciones	13
2.5.	Factores Secundarios que Favorecen la Formación de Incrustaciones	15
2.6.	Incrustaciones Comunes Encontradas en los Procesos Mineros	17
2.7.	Carbón Activado	19
2.8.	Recuperación del Oro con Carbón Activado	22
2.9.	Problemas de Incrustación en Carbón Activado	27
III.	DESARROLLO DEL TEMA	29
3.1.	Diagrama de Procesos de Obtención de Oro, Proceso CIC (Carbon In Column)	29
3.2.	Problemática Actual del Sistema de Recuperación de Oro por Carbón Activado	31
3.3.	Tratamiento Actual de Control Químico de Incrustaciones y Métodos de Monitoreo	35
3.4.	Propuesta Técnica para mejorar el control de Incrustaciones en Carbón Activado	38
3.5.	Evaluaciones a Nivel Planta con Productos a base de Polímeros Dispersantes Nalco	45

IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
V.	BIBLIOGRAFÍA	53
VI.	APÉNDICE	54

I. INTRODUCCIÓN

El carbón puede existir en diferentes formas en estructuras cristalinas o amorfas. Los diamantes y el grafito son las formas en que mejor se conoce el carbón y sus usos son bien conocidos y documentados. Las formas amorfas incluyen el carbón activado, las fibras de carbón y los carbones porosos, todos ellos se obtienen al calentar o quemar, bajo condiciones controladas, materiales carbonosos tales como, las cascaras de coco, la madera, la turba, el lignito y el petróleo. El material carbónico es generalmente sólido y de origen natural.

El uso del carbón activado en la metalurgia extractiva se ha intensificado en las últimas dos décadas, empleándose en los procesos de flotación de minerales, tratamiento de aguas industriales, etc. El carbón activado se emplea además para recuperar el oro contenido en soluciones originadas en diversos procesos de cianuración, entre los que figuran actualmente el de lixiviación, carbón en pulpa (CIP), carbón en lixiviación (CIL) y carbón en columnas (CIC).

Por lo señalado anteriormente la tendencia actual es adoptar la tecnología del carbón activado para la recuperación de oro desde soluciones alcalinas diluidas que contengan cantidades pequeñas de oro en solución, es decir, su aplicación ha permitido explotar yacimientos de baja ley (poza de menores eventos), con el concurso de métodos de bajo costo de lixiviación, rebajando los costos de capital para la planta. El mecanismo empleado para la recuperación del oro contenido en solución es la adsorción, característica muy particular de los carbones activados y que a su vez es una desventaja debido a que esta propiedad le permite captar el oro y otros minerales contaminantes como el óxido de calcio y especies precipitadas como el carbonato de calcio, los que dañan la porosidad del carbón, reduciendo el tiempo de vida y eficiencia de recuperación.

Bajo este contexto el informe de suficiencia esta orientado a evaluar, los productos más adecuados para llevar a cabo el control de las incrustaciones en los procesos de adsorción y desorción del carbón activado, lo cual permitirá alargar el tiempo de vida útil del carbón y mantener las eficiencias de recuperación de oro.

II. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉCNICAS

2.1. QUÍMICA DEL AGUA

El denominador común de la mayor parte de los problemas del agua es la dureza. La dureza es uno de los términos heredados del pasado y que se origina en el uso casero del agua para lavado. Se encontró que algunas aguas eran duras para utilizarlas al realizar el lavado de la ropa familiar. Se necesitaba más jabón para producir espuma en estas aguas, tanto que en algunas casas tenían barriles o cisternas para recoger el agua de lluvia para el lavado. Esta relación entre la dureza y la espuma resultó tan fundamental que los químicos han desarrollado una solución estándar de jabón, la cual se utilizó durante muchos años para determinar la dureza del agua. Por lo tanto, la tradición define la dureza como la capacidad de consumo de jabón por el agua. Con fines prácticos, es el contenido de calcio y magnesio del agua, aunque los metales pesados como el hierro y el manganeso también consumen jabón. Entonces, la dureza es la solución en agua tanto de calcio como de magnesio en forma de cationes, independientemente de la naturaleza de los aniones presentes. Esta se ha expresado, por lo general, en función del carbonato de calcio, CaCO_3 . Esta es una elección fortuita puesto que la masa molar del CaCO_3 es 100 y su masa equivalente es 50, proporcionando una unidad conveniente de intercambio para expresar a todos los iones en agua, en vez de mostrar a cada uno de ellos con su propia masa equivalente.

❖ **Propiedades disolventes.**- En contraste con su conveniente capacidad para enfriar, el agua tiene características que pueden ser muy perjudiciales. El agua se considera el "disolvente universal" a causa de su tendencia a disolver, en mayor o menor grado, una extensa variedad de materiales incluyendo metales, tierra y piedra. La capacidad disolvente del agua es perjudicial para los equipos de los sistemas de enfriamiento, porque al contener especies químicas disueltas pueden tener un efecto directo sobre la cantidad de incrustaciones y corrosión.

Respecto a los sistemas de agua de proceso, la capacidad disolvente del agua puede causar graves problemas. Cuando el agua disuelve diversos

minerales, los retiene en solución; estos minerales disueltos se llaman *sólidos disueltos*. Cada gota de lluvia, la forma más pura del agua natural, recoge calcio, magnesio, azufre, hierro, potasio y una variedad de otras sales y gases al caer y penetrar en el suelo.

Antes de utilizar el agua para un determinado proceso hay que controlar adecuadamente estas impurezas mediante tratamientos, o eliminarlas del suministro de agua, para evitar problemas como corrosión, incrustaciones y ensuciamiento que pueden perjudicar el rendimiento de los procesos y destrucción de los equipos.

Dependiendo de la situación geográfica, el agua de empleo en los procesos mineros puede contener diversas combinaciones y concentraciones de minerales, gases y materia microbiológica. Como estas impurezas pueden causar graves problemas en un sistema de enfriamiento o adsorción en carbón activado, es importante conocer en todo momento la cantidad y tipo de sólidos presentes.

Las siguientes propiedades químicas del agua nos dan información valiosa acerca del efecto del agua en un determinado proceso: conductividad, dureza, alcalinidad y pH.

❖ **Conductividad.-** La conductividad es una medida que indica la facilidad con que circula la corriente eléctrica a través de una muestra de agua.

Los minerales como el cloruro sódico, bicarbonato de calcio, carbonato de magnesio y dióxido de silicio, son sustancias comunes que se disuelven en el agua, formando soluciones electrolíticas o conductoras. Ya que la conductividad es proporcional a la cantidad de sólidos disueltos en el agua, se puede usar como medida de la cantidad de sólidos disueltos. La conductividad es una medida importante porque indica la concentración de minerales disueltos en el agua, así como su aumento o disminución. Si la concentración de algunos minerales crece demasiado, se pueden formar en

poco tiempo depósitos peligrosos que reducen la eficiencia del sistema que trabaja con el agua.

Aunque la conductividad proporciona una buena medida de la cantidad de materiales disueltos en el agua, no indica qué tipos de contaminantes están presentes. Para obtener información acerca de los tipos de impurezas del agua de enfriamiento tenemos que medir otras propiedades químicas del agua.

❖ **Dureza.-** Entre los muchos minerales que disuelve el agua están los compuestos de calcio y magnesio. La dureza del agua se refiere a la cantidad de calcio y magnesio presentes. Estos compuestos pueden causar dificultades en los procesos de adsorción con carbón activado, porque pueden precipitarse formando depósitos densos y muy duros, particularmente en equipos de intercambio de calor. Es necesario monitorear la dureza cuidadosamente, ya que esos depósitos pueden reducir considerablemente la eficiencia de un proceso. En algunos casos pueden causar la parada total del sistema.

A diferencia de la mayoría de las sales, la solubilidad de las sales de calcio y magnesio varía en relación inversa con la temperatura, por eso son tan importantes.

Una manera de determinar el potencial de formación de depósitos de estas sales en un determinado proceso es conocer la alcalinidad del sistema.

❖ **Alcalinidad.-** Cuando se forman incrustaciones o hay corrosión en un intercambiador de calor, a menudo es a causa de la alcalinidad, al menos parcialmente. Hay dos formas de alcalinidad que requieren particular atención en los sistemas de agua en proceso es la alcalinidad debida a los bicarbonatos y a los carbonatos.

❖ **pH.-** El pH, igual que la alcalinidad, es una medida clave en las aguas de proceso, debido a que muchos programas de tratamiento de agua están

diseñados para funcionar solamente dentro de ciertos intervalos del pH. La definición científica del pH es la siguiente: el logaritmo de la inversa de la concentración de iones hidronio, H_3O^+ , (comúnmente llamado ión hidrógeno) en una solución. Sencillamente, a medida que la cantidad de iones hidrógeno (H^+) presentes en el agua cambia, también cambia el pH. Recuerde que el programa de tratamiento del agua usado para combatir las incrustaciones y la corrosión solamente puede funcionar dentro de un intervalo del pH cuidadosamente prescrito. Si el sistema funciona fuera de ese intervalo, aunque sea durante un periodo muy breve, los aditivos químicos pueden ser ineficaces y pronto comenzarán a surgir problemas. Cuanto más alto sea el pH, más incrustaciones formará el agua. Cuanto más bajo sea el pH, más corrosiva será el agua.

2.2.FUENTES DE AGUA EN PROCESOS MINEROS

2.2.1. Usos del agua en los procesos mineros

El agua empleada en los procesos de mina y procesamiento de minerales esta separado en dos partes.

La primera incluiría todos los usos de agua y tratamiento de agua durante el extracción física del mineral de la tierra. La fuente de este tipo de agua puede ser subterránea o superficial (Lagos, Ríos).

La segunda categorización esta definida por el agua empleada en el procesamiento industrial de los minerales en planta. Durante estas operaciones se emplea el agua como medio de transporte y disolución de los minerales de las menas, denominándose a la mezcla mineral-agua, slurry, este slurry es llevado a los sistemas de separación mecánica donde mediante el empleo de químico específicos se separa el mineral deseado, de los no deseados. La solución final se separa por decantación, siendo el sobre nadante el agua recuperada para el siguiente proceso.

2.2.2. Fuentes de agua

Las fuentes de agua que se emplean en la industria minera son las aguas subterráneas y las aguas superficiales, cada tipo de agua difiere una de la otra en sus características químicas que hacen su empleo más ó menos viable, es importante considerar la disponibilidad de estas fuentes.

❖ Aguas subterráneas (Agua de Mina)

Las aguas subterráneas son las que generalmente se encuentran en los procesos mineros extractivos, este tipo de agua también es denominada Agua de Mina. El agua de este tipo de fuente es rica en minerales por lo cual su tendencia a ocasionar problemas de llegarse a emplear en los procesos mineros, no extractivo de mineral virgen, es alta. Es importante considerar la disponibilidad de fuentes de agua dentro de un proceso minero, ya que si la operación se encuentra en una zona de insuficiente nivel de aguas superficiales, el empleo de agua subterránea será la única alternativa, siempre y cuando se cuente con un tratamiento adecuado para acondicionar la característica del agua y de esta forma pueda emplearse en el proceso.

Durante la extracción de los minerales en mina es necesario el control obligado del polvo por las cuestiones ambientales y de seguridad del personal, por tal motivo el agua subterránea es muy empleado en estos casos. De igual forma se emplea este tipo de agua para acondicionar al superficie de trabajo donde se realizará la extracción, este es un proceso continuo, por lo cual es necesario retirar constantemente este tipo de agua mediante bombeo y transferirlo a pozas de retención para un posterior tratamiento.

❖ Aguas superficiales

En el sector minero las aguas superficiales son empleadas en los procesamiento de minerales, por contar este tipo de agua con una característica química más benigna que el Agua de Mina. Corresponden a este tipo de agua los manantiales y ríos, en las empresas mineras se

cuentan con plantas de tratamiento de aguas recuperadas de proceso y que luego son enviados a grandes pozas de retención y que se juntan con las denominadas aguas de lluvia, siendo una fuente adicional de suministro de agua que se puede considerar como superficial.

Es última denominación es el enfoque actual que las empresas mineras están adoptando, con el objetivo de no dañar recursos naturales de agua, si no recuperar las del proceso y aprovechar al máximo las agua de lluvia.

2.3.PROBLEMAS DE INCRUSTACIÓN OCASIONADOS POR CALIDAD DE AGUA

Las incrustaciones constituyen uno de los problemas más comunes encontrados en los sistemas de agua de proceso, sea en los procesos de adsorción o intercambio de calor. Cuando se forman incrustaciones en las superficies de los intercambiadores de calor y en las tuberías de transferencia, demoran el intercambio de calor, aceleran el ensuciamiento, fomentan cierto tipo de corrosión y crecimiento microbiano, y aumentan la contrapresión de bombeo. Esto, a su vez, resulta en la disminución del rendimiento de la planta, reducción de la productividad, retrasos de los planes, más tiempos de parada de mantenimiento y aumento de los costos de los equipos, reparaciones y repuestos. Todo lo anterior provoca el aumento de los costos de operación y la disminución de los beneficios.

2.3.1. Mecanismos de la formación de incrustaciones

La acumulación de incrustaciones tiene lugar cuando las sales en disolución acuosa precipitan debido a que se ha excedido su solubilidad. Las incrustaciones normalmente forman una capa densa de minerales muy adherente entre sí y a las superficies del metal. Las incrustaciones pueden ser de naturaleza cristalina o amorfa y, debido a su baja conductividad térmica, impiden la transferencia de energía a través de las superficies del intercambiador de calor.

Los fangos y los agentes de ensuciamiento normalmente son partículas insolubles presentes en el agua de reposición o introducidas por fugas del proceso o crecimiento microbiano dentro de un sistema de enfriamiento. Estos sólidos tienden a formar depósitos o masas sueltas, no adherentes, normalmente en las secciones de un sistema con baja velocidad de flujo. No obstante, se pueden incorporar sólidos en suspensión a las incrustaciones.

El carbonato cálcico es el tipo más común de incrustaciones encontrado en los sistemas de agua de los procesos mineros; no obstante, también se observan incrustaciones de sulfatos, fosfatos y silicatos, así como también otras sales de calcio, hierro, manganeso, magnesio y zinc.

2.4.FACTORES NECESARIOS PARA LA FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES

La cristalización directa de un compuesto sobre una superficie ocurre cuando se dan cuatro condiciones simultáneamente.

- ❖ **Sobresaturación**, excediendo la solubilidad del compuesto en el agua del sistema
- ❖ **Nucleación**, formación de pequeñas partículas de incrustaciones embrionarias
- ❖ **Tiempo de contacto adecuado**, que permite el crecimiento del cristal
- ❖ **Formación de incrustaciones excediendo la disolución.**

Éstos son los cuatro factores principales que influyen en la formación de incrustaciones, que pasaremos a definir de la siguiente manera.

2.4.1. Sobresaturación

La sobresaturación es el punto en que la concentración de una sal excede su solubilidad en el agua. Un sistema de enfriamiento llega a la sobresaturación debido a evaporación, fluctuaciones de pH o cambios de temperatura.

El nivel de sobresaturación en la masa de agua no es indicativo siempre del nivel de sobresaturación en zonas localizadas. La sobresaturación puede ser muy localizada, tal como en una película delgada de flujo de agua laminar junto a una superficie de transferencia de calor, en la interfase gas/líquido de una burbuja, en una hendidura o debajo de una capa de depósito existente. Ésta es la razón por la que se pueden formar incrustaciones en intercambiadores de calor aun cuando la masa de agua esté considerada como no incrustante.

2.4.2. Nucleación

La nucleación o formación inicial de un precipitado, tiene lugar por medio de dos mecanismos básicos: nucleación homogénea y heterogénea. La nucleación homogénea ocurre de forma espontánea y está causada por un alto nivel de sobresaturación de la especie incrustante. La nucleación heterogénea ocurre cuando partículas extrañas o la rugosidad superficial inician la formación de incrustaciones. La nucleación heterogénea es más común en los sistemas de agua de enfriamiento debido a la presencia de sólidos en suspensión, productos de corrosión, zonas de corrosión, soldaduras, hendiduras, la rugosidad superficial de un intercambiador de calor y películas de óxido, que pueden iniciar incrustaciones.

Para que tenga lugar la nucleación, un mínimo de moléculas (varios miles) deben orientarse de manera que formen una red. Si los núcleos son demasiado pequeños, se volverán a disolver. Los núcleos se estabilizan una vez sobrepasado cierto tamaño. El tiempo necesario para la nucleación varía, dependiendo en gran medida del nivel de sobresaturación. El tiempo necesario para la nucleación disminuye al aumentar la sobresaturación.

2.4.3. Tiempo de contacto adecuado

Para que se formen incrustaciones después de que se sobresature una solución y haya ocurrido la nucleación, debe transcurrir suficiente tiempo de contacto entre la solución y las zonas de nucleación. Por lo general,

cuanto mayor sea el tiempo de contacto, más probable será la formación de incrustaciones. El tiempo necesario para la formación de incrustaciones puede variar de unos pocos segundos a muchos años, dependiendo del nivel de sobresaturación, tipo y número de zonas de nucleación, temperatura, pH, agitación y otros factores.

2.4.4. Disolución, formación y envejecimiento de incrustaciones

Durante la acumulación de depósitos de incrustaciones, se producen fenómenos constantes de disolución y nueva formación de depósitos en las caras del cristal. Las incrustaciones se acumulan cuando la velocidad de formación de depósitos es mayor que la velocidad de disolución. Cuando las incrustaciones empiezan a precipitar, especialmente si se depositan rápidamente, muestran generalmente una estructura relativamente porosa que se elimina fácilmente con un ligero esfuerzo mecánico. Sin embargo, el envejecimiento cambia drásticamente las propiedades físicas de la mayoría de las incrustaciones. Las incrustaciones recientemente precipitadas normalmente pueden eliminarse con facilidad, mientras que las incrustaciones envejecidas tienden a endurecerse, a hacerse densas y más adherentes y difíciles de eliminar. Este fenómeno se debe en su mayor parte a la disolución, a la formación de depósitos, al crecimiento de cristales y a los cambios de fase, en los que tiene lugar una hidratación y deshidratación, hasta que los cristales individuales formen una masa maciza y unificada. Este proceso de envejecimiento se acelera si ocurre sobre las superficies de los intercambiadores de calor.

2.5. FACTORES SECUNDARIOS QUE FAVORECEN LA FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES

En el punto anterior se han descrito los principales factores que favorecen la formación de incrustaciones; pero existen otros que al combinarse con los anteriores favorecen aun más la formación de la especie incrustante, en este sentido se indican los siguientes:

❖ Temperatura

La solubilidad de muchos de los minerales incrustantes comunes es inversamente proporcional a la temperatura, lo que significa que la solubilidad de estas especies disminuye al aumentar la temperatura. Esto es particularmente cierto en el caso del carbonato cálcico y fosfato cálcico, que se forman más velozmente en aquellos puntos en que la temperatura de la superficie es máxima. Así pues, las altas temperaturas de la superficie pueden provocar la formación de incrustaciones localizadas de las superficies del intercambiador de calor, reduciendo en consecuencia la transferencia de calor. Ver tabla de solubilidad de compuestos químicos.

Tabla de la solubilidad de los compuestos químicos.

Compuesto	ppm en forma de CaCO ₃	
	0 °C (32°F)	100 °C (212°F)
CALCIO		
Bicarbonato	1620	Se descompone
Carbonato	15	13
Sulfato	1290	1250
MAGNESIO		
Bicarbonato	37100	Se descompone
Carbonato	101	75
Sulfato	170000	356000
SODIO		
Bicarbonato	38700	Se descompone
Carbonato	61400	290000
Cloruro	225000	243000
Hidróxido	370000	970000
Sulfato	336000	210000

❖ pH del sistema

Las grandes fluctuaciones del pH tienen un efecto significativo en la formación de incrustaciones, en los sistemas de agua de enfriamiento. Al aumentar el pH, aumenta también el potencial de incrustación de casi todas las incrustaciones comunes en el agua de enfriamiento, incluyendo el carbonato cálcico, fosfatos de calcio y zinc, hidróxido de zinc y silicato magnésico. Los

descensos de pH aceleran la corrosión, proporcionan zonas de nucleación para la formación de incrustaciones y aumentan el potencial para algunas formas de incrustaciones de sílice.

❖ **Velocidad del flujo**

Las bajas velocidades de flujo menores de 0,5 m/s (2 pies/s) en los tubos del intercambiador de calor pueden producir un flujo no turbulento o laminar. Esto crea una capa límite de muy baja velocidad junto a la superficie del metal. El comportamiento de esta capa es bastante diferente del comportamiento del resto del agua con respecto a la temperatura, sobresaturación y zonas de nucleación. Las irregularidades de la superficie también influyen de forma significativa en el comportamiento de la capa límite. Como resultado del aumento de la sobresaturación y del potencial de incrustación en la capa límite, las bajas velocidades del flujo dan tiempo para que se produzca la nucleación, el crecimiento de los cristales y la formación de incrustaciones densas muy adherentes.

2.6. INCRUSTACIONES COMUNES ENCONTRADOS EN LOS PROCESOS MINEROS

2.6.1. Carbonato de calcio

Las incrustaciones minerales más comunes en los sistemas de agua son las de carbonato cálcico (CaCO_3). Su solubilidad es inversamente proporcional a la temperatura, es decir, disminuye al aumentar la temperatura. La reacción de precipitación es como sigue:



En esta reacción, la solución de bicarbonato de calcio, al calentarse se convierte en carbonato de calcio insoluble.

En el agua del proceso, el equilibrio entre el calcio, el dióxido de carbono, el bicarbonato y el carbonato es delicado, y cualquier cambio que desplace la reacción hacia el carbonato cálcico, tal como un aumento de la

temperatura tenderá a producir la precipitación. Los mismos fenómenos que describen las reacciones de ablandamiento con cal se aplican a la precipitación de estas incrustaciones.

En condiciones de operación, el carbonato de calcio es de color blanco o pardo. Las fotografías hechas con un microscópico electrónico mostrando la estructura cristalina del CaCO_3 puede contribuir a veces a la identificación de pequeñas partículas de CaCO_3 .

2.6.2. Sulfato de calcio

El sulfato de calcio es relativamente soluble comparado con otras incrustaciones y no presenta problemas en la mayoría de las aplicaciones de agua de proceso.

Existen dos formas potenciales de sulfato de calcio: anhidro (CaSO_4) e hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, yeso). La solubilidad del yeso es directamente proporcional a la temperatura mientras que la del anhidro es inversamente proporcional a la misma.

Para que ocurra la precipitación, la concentración del calcio (en forma de CaCO_3) normalmente debe ser mayor que 700 ppm, y la de los sulfatos (en forma de Na_2SO_4) necesita ser muy elevada (mayor que 20 000 a 30 000 ppm). En sistemas de enfriamiento, los mecanismos de concentración que tienen lugar debajo de los depósitos o en pequeñas hendiduras pueden causar la precipitación de CaSO_4 , aun cuando los análisis de la masa de agua tal vez no muestren estas elevadas concentraciones de iones calcio y sulfato.

2.6.3. Fosfato de calcio

La solubilidad del fosfato de calcio, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, como la del carbonato de calcio, es inversamente proporcional a la temperatura. También se hace menos soluble al aumentar el pH. La combinación de calcio, ortofosfato, alta temperatura y alto pH es por lo tanto muy proclive a la formación de una gran variedad de precipitados que colectivamente se denominan

fosfato cálcico (por ejemplo, fosfato cálcico amorfo, fosfato tricálcico, fosfato octacálcico e hidroxiapatito amorfos).

En los sistemas donde las concentraciones de calcio varían de 200 a 1000 ppm (como CaCO_3), una concentración de ortofosfato (como PO_4 tan pequeña como 2 a 5 ppm puede producir una gran cantidad de incrustaciones de fosfato de calcio. No obstante, en los casos donde se tiene agua ablandada, las concentraciones de ortofosfato pueden ser mucho mayores sin que se formen incrustaciones de fosfato cálcico. En ciertas condiciones, se pueden agregar ortofosfatos como inhibidores de corrosión.

Por último, incluso en condiciones en las que el fosfato de calcio pueda estar precipitando, no se debe suponer automáticamente que este material forme unas incrustaciones duras en las superficies metálicas.

2.7. CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado se usó desde principios de 1880 como precipitante del oro en el proceso de clorinación y, posteriormente, en 1917, para la recuperación de oro de soluciones de cianuro en la planta de la mina Yuanni, Australia, donde éstas se bombeaban a través de tres filtros en serie que contenían carbón de madera. Este carbón tenía la desventaja de poseer una muy baja capacidad de adsorción, además de que se utilizaba un procedimiento inadecuado para realizar el despojo, ya que tenía que quemarse para recuperar los metales preciosos.

En años recientes, han surgido varias técnicas para la recuperación de oro y plata de soluciones de cianuro, tiourea, y tiosulfatos, entre las que se encuentra el uso de carbón activado como adsorbente.

2.7.1. Propiedades físicas y químicas del carbón activado

Las propiedades físicas y químicas del carbón activado dependen tanto de la materia prima como de las condiciones de activación, es decir, la temperatura y el tiempo de duración del proceso, lo cual será descrito más

adelante en el punto que corresponde a la fabricación del carbón activado. Se ha demostrado que los carbones obtenidos a partir de diferentes materiales tienen la estructura material orgánico original, y por lo tanto también la cantidad y distribución del tamaño de los poros desarrollados dentro de la partícula del mismo; por ejemplo, la estructura del hueso de durazno y de la cáscara de coco, están aún presentes en el esqueleto del carbón final.

Las imperfecciones estructurales en el carbón activado producen numerosos sitios reactivos, de tal manera que las superficies de los poros y de la partícula se componen principalmente de oxígeno, y contienen grupos funcionales localizados preferentemente en los bordes de los anillos incompletos de carbón. No se conoce con precisión la naturaleza de estos óxidos superficiales, pero se han sugerido los siguientes:

- Ácido carboxílico
- Hidroxilo fenólico
- Grupos carbonilo tipo quinona
- Lactonas normales y de fluoroceína
- Anhídruos de ácido carboxílico
- Peróxidos cíclicos

Es importante tener en cuenta que el término carbón activado comprende toda una familia de sustancias. Ninguno de los miembros de esta familia se caracteriza por una fórmula estructural definida, y la única base para su diferenciación es por medio de su capacidad de adsorción y de sus propiedades catalíticas.

2.7.2. Fabricación de carbón activado

Para la fabricación del carbón activado se han utilizado una gran variedad de materiales como madera, hueso, cáscara de coco, plásticos, huesos de durazno, llantas, carbones bituminoso, azúcar y sangre, entre otros. El material producido tiene una gran área superficial y el tamaño de sus poros

puede variar considerablemente. Los poros se clasifican según su tamaño de la manera siguiente;

<u>Tipo de Poros</u>	<u>Diámetro del Poro</u>
Macroporos	500 - 20 000 Å°
Mesoporos	100 - 500 Å°
Microporos	8 - 100 Å°

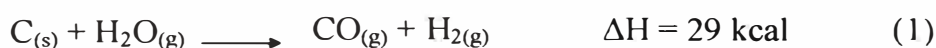
Los poros pueden ser de sección circular o rectangular o tener una gran variedad de formas irregulares.

De acuerdo con McDougall (1986), los macroporos contribuyen poco al área interna total del producto y dependen principalmente de la materia prima utilizada para su fabricación. La principal función de los macroporos es servir como un conducto de transporte para que la parte interna se ponga en contacto con las especies que serán adsorbidas. Los mesoporos contribuyen con un 5% del área interna total, mientras que los microporos con cerca del 95%.

El primer paso empleado en el proceso de la producción del carbón activado es una carbonización por calentamiento en una atmósfera inerte, a una temperatura de 700°C o menor, para deshidratar el material y remover los compuestos volátiles. Es deseable un contenido de carbón fijo de 80% o más en el producto de esta etapa.

En la siguiente etapa el carbón se activa por calentamiento entre 800 y 1000°C en presencia de vapor de agua, dióxido de carbono o una mezcla de ambos. Durante la activación, la porción reactiva del esqueleto del carbón se quema como CO y CO₂, dependiendo del agente utilizado.

Para el proceso de activación, las reacciones del carbón con el vapor y dióxido de carbono son de naturaleza endotérmica:



Mientras que la reacción del carbón con aire es demasiado exotérmica:



Esta reacción es difícil de controlar, por lo que puede ocurrir un quemado excesivo de la superficie del carbón, lo que ocasiona una disminución en el tamaño promedio de la partícula.

La reacción del carbón con vapor se cataliza en presencia de ciertos compuestos químicos, como por ejemplo óxidos y carbonatos de metales alcalinos, hierro, cobre y otros metales.

En resumen, para la producción del carbón activado se debe conducir el proceso de activación en forma tal que la combustión del material ocurra internamente y no en la parte exterior de los gránulos. Aunque es una costumbre que la carbonización y la activación se efectúen por separado, en la actualidad existe la tendencia de llevar a cabo estos pasos de manera simultánea, lo que ha provocado grandes innovaciones en los equipos de fabricación.

2.8. RECUPERACIÓN DE ORO CON CARBÓN ACTIVADO

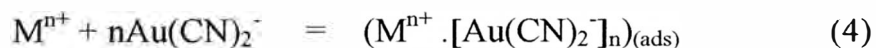
Los sistemas de recuperación de metales con carbón activado se han aplicado ampliamente en los últimos veinte años, debido a que tienen la gran ventaja de que no requieren de un tratamiento del licor rico de lixiviación previo a la recuperación, así como a su gran versatilidad. Existen un sinnúmero de alternativas, lo que permite múltiples variaciones para las distintas operaciones unitarias, incluyendo lixiviación, adsorción, electrodeposición, despojamiento y tratamiento ácido, entre otras.

2.8.1. Adsorción

El mecanismo de adsorción en carbón de metales preciosos a partir de soluciones de cianuro, no se ha establecido totalmente, sin embargo, para el caso del oro se reconocen las siguientes características principales:

- La extracción se mejora en presencia de electrolitos como CaCl_2 y KCl .
- La adsorción de oro aumenta con el pH de la solución.
- Los complejos neutros de cianuro como $\text{Hg}(\text{CN})_2$ se adsorben fuertemente, independientemente de la fuerza iónica de la solución.

- La adsorción es un proceso reversible, con una tasa de despojamiento más alta para condiciones ligeramente diferentes.
- Existen evidencias de que la adsorción depende del potencial de reducción del sistema.
- Para la mayoría de las condiciones, la relación molar de oro cargado a nitrógeno es de 0,5; lo que es consistente con la presencia del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$.
- La adsorción disminuye conforme la temperatura aumenta.
- El mecanismo de adsorción puede representarse por la ecuación:



La evidencia cinética indica además que la velocidad inicial de adsorción del complejo de cianuro de metales preciosos es rápida, y disminuye conforme se aproxime al equilibrio. En estas condiciones, la tasa de adsorción está controlada por el transporte de masa del complejo hacia la superficie del carbón. Una vez alcanzado el pseudo-equilibrio, la difusión del complejo a través de los microporos del carbón se convierte en un proceso más lento que la difusión a través de la capa límite, debido a la longitud y tortuosidad de los poros. La energía de activación para la adsorción de oro, por ejemplo, es del orden de 11 kJ/mol, lo que indica un control por transporte de masa.

La velocidad de adsorción de oro en carbón puede describirse por medio de una ecuación de velocidad de primer orden:

$$\text{Log } C_t = \text{Log } C_0 + kt \quad (5)$$

donde C_t es la concentración de oro en cualquier tiempo, t , C_0 la concentración inicial de oro y k es una constante de velocidad.

La adsorción de cianuros de metales preciosos en carbón depende de una serie de factores químicos y físicos que afectan tanto la cinética de adsorción como la capacidad de carga al equilibrio. A continuación se señalan los efectos más sobresalientes.

2.8.2. Factores físicos que afectan a la adsorción

❖ **Tipo de carbón.**- En general los carbones de mayor actividad son los más blandos debido a que poseen una estructura más porosa. Esto reduce su resistencia mecánica y ocasiona una mayor pérdida de carbón, y en consecuencia, de valores metálicos en operación debido a la fractura del material de adsorción. El tipo de carbón que se requiere para un proceso en particular depende de varios factores como: tipo de proceso de adsorción (Carbón en pulpa, CIP; Carbón en lixiviación, CIL o Carbón en columna, CIC), concentración de metales preciosos, velocidad de flujo de pulpa/solución, velocidad de producción de metales preciosos, velocidad de atrición del carbón y condiciones del proceso.

La actividad de los carbones utilizados en la industria extractiva de metales preciosos disminuye con el uso, por lo que es necesario emplear alguna técnica de reactivación para minimizar la amplitud de esta degradación.

❖ **Tamaño de partícula del carbón.**- Tiene un efecto considerable en la longitud media del poro dentro de las partículas de carbón, y la velocidad de adsorción aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Esto tiene una importancia fundamental para las operaciones industriales, ya que éstas normalmente operan con capacidades de carga de oro muy por debajo de la capacidad de carga del carbón al equilibrio.

Los rangos de tamaño en aplicaciones industriales varían entre 1,2 x 2,4 mm (14 x 8 mallas) y 1,7 x 3,4 mm (10 x 6 amallas).

Otros factores que influyen en el tamaño de partícula seleccionado son:

- Entre más fino sea el carbón más difícil es su tamizado, especialmente cuando se trabaja con el proceso de carbón en pulpa.
- El carbón más fino es más susceptible de perderse por atrición debido a su muy alta relación de área superficial a masa, y por lo general se reduce a un tamaño tal que puede salir del circuito mucho más rápido que el carbón más grueso.

- El carbón más pequeño tiene una velocidad de fluidización menor que el carbón más grueso, lo que afecta el diseño del equipo.

❖ **Eficiencia de mezclado.**- Para lograrla se requiere que:

- Mantenga al carbón, solución y sólidos suspendidos y a la mezcla tan homogéneos como sea posible.
- Maximice la velocidad de transporte de masa de las especies de cianuro de oro a la superficie del carbón, de preferencia más rápido que la velocidad de adsorción.

❖ **Densidad de pulpa (masa por unidad de volumen en una mezcla de mineral/agua (slurry)).**- La disminución de la velocidad de adsorción de metales preciosos en carbón al aumentar la densidad de pulpa, se atribuye a los siguientes factores:

- Disminución en la eficiencia de mezclado debido a un aumento de la viscosidad de la pulpa y a una disminución de la energía suministrada por unidad de masa de suspensión.

- Taponamiento de los poros debido a partículas de mineral muy finas.

También existe un efecto negativo cuando se procesan menas arcillosas que ocasionan un cambio en la viscosidad de la suspensión, con las consecuencias ya mencionadas.

2.8.3. Factores químicos que afectan a la adsorción

❖ **Temperatura.**- La adsorción de los metales preciosos en carbón es un proceso exotérmico, lo que explica su reversibilidad al aumentarse la temperatura. Por lo tanto, la capacidad de carga disminuye al aumentar la temperatura. La velocidad de adsorción aumenta un poco con la temperatura debido a un incremento en la velocidad de difusión de los complejos de metales preciosos.

❖ **Concentración de metales preciosos en solución.**- La velocidad de adsorción de oro y su capacidad adsorción de operación en equilibrio

aumentan al incrementarse la concentración de oro en solución. En la práctica se logran velocidades de carga de 10 a 100 g Au/h/t de carbón, y capacidades de carga de 5 a 10 kg Au/t de carbón.

❖ **Concentración de cianuro.**- Al aumentar la concentración de cianuro disminuyen tanto la velocidad de adsorción como la capacidad de carga del oro, lo que se atribuye a una mayor competencia de la especie cianuro libre por los sitios de adsorción. Sin embargo, la selectividad del carbón por oro a otras especies de cianuro metálicos aumenta con la concentración de cianuro.

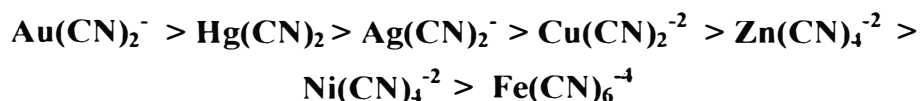
❖ **pH.**- Una disminución del pH aumenta la velocidad de adsorción y la capacidad de carga; sin embargo, en la práctica, dentro del rango de operación, es mínimo el efecto debido a la variación de pH.

❖ **Fuerza iónica.**- La velocidad de adsorción y la capacidad de carga aumentan con la fuerza iónica.

❖ **Oxígeno disuelto.**- La oxidación catalítica de cianuro en presencia de oxígeno, trae como consecuencia una mejoría en la adsorción debido a la disminución de la concentración de cianuro libre.

❖ **Envenenamiento del carbón.**- Se debe a la adsorción o atrapado físico de otras especies en solución y constituyentes del mineral, que pueden tener un efecto adverso severo en la eficiencia de adsorción de los metales preciosos. Las especies inorgánicas y orgánicas pueden afectar el carbón activado, dentro de las especies más perjudiciales se encuentra el CaCO_3 .

❖ **Adsorción de otros metales.**- Afortunadamente, el carbón es muy selectivo con respecto a oro y plata, por lo que el efecto de adsorción de otras especies dañinas es mínimo con excepción del mercurio; el orden de preferencia de adsorción es como sigue:



❖ **Plata.**- El mecanismo de adsorción de la plata en carbón es similar al del oro; sin embargo, la capacidad de adsorción del carbón para plata es mucho menor. Además, el complejo de cianuro de oro tiende a desplazar al de plata del carbón. Estos factores son importantes en el diseño y operación de una planta.

❖ **Mercurio.**- El complejo de cianuro de mercurio $\text{Hg}(\text{CN})_2$ compite directamente con el de oro $\text{Au}(\text{CN})_2$ por sitios en el carbón y puede, en algunos casos, desplazarlo. En aquellos casos donde se tengan cantidades significativas de mercurio en el mineral, se requiere un tratamiento para su eliminación.

❖ **Cobre.**- La adsorción de cobre está relacionado con el pH y la concentración de cianuro libre. Para bajas concentraciones y bajo pH se favorece la formación del complejo $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$, que se adsorbe fácilmente, mientras que para altas concentraciones y alto pH predomina el complejo $\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-}$, que se adsorbe pobremente. Para el tratamiento de un material con un alto contenido de cobre, se requiere un control cuidadoso del pH y de la concentración de cianuro libre, para evitar un efecto negativo en la adsorción de metales preciosos.

2.9. PROBLEMAS DE INCRUSTACIÓN EN CARBÓN ACTIVADO

La formación de incrustaciones es un problema que afecta grandemente a los sistemas de procesamiento de minerales, debido a los grandes volumen de agua que en estos procesos se emplea. La composición de la incrustación puede ser muy variada de un circuito del proceso a otro; pero los mecanismos de deposición y las necesidades de prevenirlos son los mismos.

Las incrustaciones de carbonato de calcio en los procesos de obtención de metales preciosos no solo es una molestia, también pueden reducir la eficiencia del proceso debido a costosas paradas de mantenimiento. Las diferentes formas de incrustación es el resultado de la combinación de las diferentes especies químicas solubles que bajo ciertas condiciones pueden causar un precipitado. Estos cristales precipitados pueden adherirse en las superficies

metálicas y partes del sistema, gradualmente crecer y conformar una estructura sólida y dura.

En los sistemas de recuperación de metales preciosos, las incrustaciones de carbonato de calcio pueden deberse a un número de razones relacionadas al proceso. Grandes cantidades de cal son agregadas en el proceso de recuperación, pads de lixiviación, por lo tanto los niveles de calcio disuelto se incrementan, conjuntamente con un incremento medio de la alcalinidad, situación que promueve la formación del carbonato de calcio.

El agua de estos procesos es muy inestable, con tendencia predominante a la formación de depósitos de carbonato de calcio cuando son forzadas (Stress) en cualquier momento, el no controlar adecuadamente esta situación puede conllevar a serios problemas de ensuciamiento en las válvulas, líneas de transferencia, boquillas de riegos, carbón activado, etc.

III. DESARROLLO DEL TEMA

3.1. DIAGRAMA DE PROCESOS DE OBTENCIÓN DE ORO, PROCESO CIC (CARBON IN COLUMN)

3.1.1. Diagrama (CIC).

En los procesos de recuperación de metales preciosos mediante carbón activado sigue tres etapas, que serán resumidas a continuación. Ver Figura 1 (Pag 55) y Figura 2 (Pag 56).

3.1.2. La adsorción

Es el proceso en donde el compuesto aurocianuro, en forma de ion queda en las estructuras y microestructuras (aberturas) de carbón adsorbidos. La adsorción es el proceso mediante el cual las moléculas de los fluidos se adhieren a la superficie por fuerzas químicas o físicas (o una combinación de ambas). En la adsorción física, las fuerzas débiles de Van Der Waals dejan las impurezas en la superficie del carbón; en la adsorción química utilizando carbones impregnados, las fuerzas son relativamente fuertes y ocurren en los lugares impregnados de la superficie. La adsorción física predomina cuando se utilizan carbones activados en la purificación de agua, y la eficiencia del carbón dependerá de su superficie disponible. La adsorción de elementos disueltos es compleja, porque en muchos casos las impurezas sólidas y elementos disueltos tienen afinidad por la superficie carbonosa.

Varios factores pueden afectar la adsorción: la distribución del tamaño de los poros, el tamaño molecular de la impureza, tamaño de la partícula de carbón, temperatura del tratamiento del carbón, y el pH de la solución. Sin embargo cuando las otras variables se mantienen constantes, las siguientes situaciones se producen:

La eficiencia de la adsorción aumenta cuando el tamaño de la partícula de carbón disminuye.

- La eficiencia de la adsorción aumenta cuando la temperatura disminuye.
- La eficiencia de adsorción aumenta cuando la solubilidad del contaminante disminuye.
- La eficiencia de la adsorción aumenta cuando el tiempo de contacto aumente.

3.1.3. La desorción

La desorción es la separación del carbón y el oro el cual se hace en un circuito cerrado. Este sistema esta compuesto de un reactor y un sistema de calentamiento.

La desorción es el proceso de extraer el oro del carbón mediante el método Anglo-americano (A.A.R.L). El paso de la solución cáustica con cianuro a través de una columna a presión y a unos 140 °C provoca la desorción de los metales del carbón hacia la solución.

Los objetivos de la desorción son:

- Recuperar la mayor cantidad de valores metálicos cargados a partir de la solución desorbida en un volumen tan pequeño como sea posible.
- Producir una solución impregnada con el tenor mas alto posible de metales preciosos.
- Dejar la menor cantidad de oro y plata posible en el carbón después de la desorción.
- Dejar el carbón listo para retornar al sistema de adsorción.

3.1.4. La regeneración o reactivación

El carbón se incrusta de sustancias inorgánicas y orgánicas que afectan negativamente la adsorción de los metales preciosos. El objetivo de la reactivación o regeneración es la remoción de las impurezas depositadas durante el proceso de adsorción y la regeneración de su estructura porosa

y su actividad. Durante este proceso, el carbón sufrirá un pequeño daño, el cual debe minimizarse.

Para la regeneración del carbón comúnmente se utilizan dos métodos:

❖ **Tratamientos químicos**

Los métodos químicos como extracción por solventes, lavado ácido y alcalino y tratamiento con peróxidos, se emplean para remover solventes específicos o incrustaciones inorgánicas del carbón. Estos tratamientos únicamente logran una regeneración parcial del carbón. En la industria de metales preciosos la práctica común es el lavado ácido para la eliminación de incrustaciones de naturaleza inorgánica.

❖ **Tratamientos térmico**

Para lograr una regeneración más completa del carbón, se requiere un tratamiento térmico que permita la eliminación de incrustaciones orgánicas y todas aquellas sustancias que los métodos químicos no eliminan o eliminan parcialmente, para tal efecto se emplean una gran variedad de hornos de calentamiento directo e indirecto.

3.2.PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ORO POR CARBÓN ACTIVADO

La unidad operativa que es materia de estudio procesa solución de baja ley en Columnas de Carbón Activado(CIC), esta unidad cuenta con 2 plantas, a la que denominaremos 1 y 2.

Cada planta cuenta con 4 Trenes y cada tren con 6 columnas de adsorción de carbón activado, la unidad operativa cuenta con 2 tanques para la desorción o despojamiento (Strip), donde se le retira el oro al carbón activado con una solución cianurada y a alto pH. El sistema estuvo trabajando con 2 productos para el control de incrustaciones, el primero es un dispersante al que denominaremos DISP 1 que es aplicado en la solución de ingreso a las columnas de carbón y el producto dispersante DISP 2, que es aplicado en los tanques de despojamiento.

La planta de carbón activado que es materia de estudio procesa solución de baja ley a un flujo total de 5000 m³/h aproximadamente, ésta solución contiene sales minerales propias del proceso, siendo la más perjudicial el carbonato de calcio.

El carbón activado es susceptible a muchas especies químicas que merman su capacidad de adsorción, situación que se ha presentado en la columnas de adsorción de ambas plantas, el resultado negativo estuvo orientado principalmente a la perdida de capacidad y reducción en la eficiencia de recuperación en 5 %.

Los estudios constaron de 2 etapas, la primera orientada a determinar que carbón se encontraba contaminado con especies extrañas y la segunda etapa estaba orientada a determinar la naturaleza del contaminante.

❖ **Etapa 1 (Análisis Físico).**- Los estudios realizados en las Universidades de San Marcos y La Pontificia Universidad Católica, fueron los siguientes:

- Índice de Iodo
- Fotos de la estructura del carbón (Ver anexo 11)

Estos dieron como resultado las siguientes conclusiones:

1. Se observó la existencia de especies contaminantes en la estructura del carbón activado, al compararse un carbón nuevo con uno luego de sometido a proceso (adsorción, lavado ácido y desorción).
2. El lavado ácido no estaba cumpliendo con el objetivo al cual estaba destinado, debido a que se observó especies atrapadas en la estructura del carbón activado.
3. Las especies extrañas se presentaban más predominantes en el carbón activado luego del proceso de desorción, lo cual hacía que el sistema se torne en un círculo vicioso con carbón contaminado luego del proceso de desorción y que retornaba a las columnas de adsorción.

❖ **Etapa 2 (Determinación química del tipo de contaminante).**- La segunda etapa del estudio se orientó principalmente a determinar el tipo de

contaminante y nivel de contaminación presente en el carbón activado luego de que el carbón termine el circuito de adsorción, el análisis consistió en comparar el carbonato de calcio atrapado en los siguientes carbones:

- Carbón activado nuevo.
- Carbón activado que ingresa al lavado ácido.
- Carbón activado después del lavado ácido.
- Carbón activado antes de la desorción.
- Carbón activado después de la desorción.

Se obtuvieron las siguientes conclusiones.

1. La existencia de carbonato de calcio en la estructura del carbón activado quedó completamente demostrada.
2. El ensuciamiento es muy ligero en las columnas de carbón activado, de acuerdo a los análisis realizados no se observa caída de dureza entre la solución que ingresa y la que sale de los filtros.
3. El lavado ácido no está removiendo en su totalidad el carbonato alojado en el carbón activado, observar resultados.
4. El carbón activado sufre su principal contaminación en el proceso de desorción, al darse las condiciones para la formación de incrustación, las que son alto pH, alta alcalinidad, alta temperatura y dureza cálcica.

A continuación se muestra el último análisis de carbonato de calcio encontrado en el carbón activado, tomado en el mes de Agosto del 2003 (Tabla I).

Tabla I.

Muestra	ppm CaCO₃ (En 350 ml de solución con 100 g de carbón)	mg de CaCO₃ (Por cada 1 g de carbón activado)
Carbón nuevo	460	1,61
Carbón que ingresa al lavado ácido	18000	63,00
Carbón que sale del lavado ácido	13500	47,50
Carbón que ingresa a desorción	14500	50,75
Carbón que sale de desorción	21500	72,25

De la tabla I podemos obtener las siguientes conclusiones:

1. El carbón nuevo posee 1,61 mg de CaCO₃/g de carbón antes de iniciado el proceso de absorción, llegando al lavado ácido con un valor de 63,00 mg de CaCO₃/g de carbón, definitivamente una parte de estos contaminantes se adsorben en las columnas; pero una gran parte es proveniente del desorción.
2. Luego del lavado ácido solo se remueve 15,50 g de CaCO₃ por cada gramo carbón lavado, lo cual indica baja eficiencia de ésta etapa.
3. Luego del proceso de desorción el carbón adsorbe más carbonato de calcio, lo cual hace incrementar el nivel de este compuesto inorgánico que daña la performance de trabajo. Como se puede apreciar el nivel se va de 50,75 mg de CaCO₃ por cada gramo de carbón activado a 72,25 mg de CaCO₃/g de carbón activado. Lo cual es de suponer por las siguientes causas:
 - No se está empleando agua blanda.
 - Los niveles de pH son altos por condiciones del proceso.
 - Las temperaturas son altas por condiciones del proceso.

- El carbón que ingresa al sistema de desorción posee carbonatos que no han sido removidos luego del lavado ácido.

El primer factor es importante para tener un buen manejo del sistema, el que al combinarse con los otros factores origina los problemas de pérdida de eficiencia, reducción de la vida útil del carbón, incrustaciones en los intercambiadores y líneas relacionadas al proceso.

3.3. TRATAMIENTO ACTUAL DE CONTROL QUÍMICO DE INCRUSTACIONES Y MÉTODOS DE MONITOREO

Al cabo de tres meses se ha estado aplicando un tratamiento antincrustante, para el control de las incrustaciones en los procesos de adsorción y despojamiento, que se pueden indicar de la siguiente manera:

3.3.1. Tratamiento Químico en adsorción

Consiste en la aplicación de un antincrustante a la solución de ingreso a las columnas de carbón activado, el producto aplicado, al que denominaremos DISP 1 se inyecta a la troncal principal de solución de alimentación a las columnas, siendo este producto de naturaleza polimérica (mezcla de acrilatos y fosfonatos).

La dosis empleada del producto es de 3 ppm en base al flujo de ingreso a las columnas de carbón, que en este caso corresponden a 3000 m³/h y se emplea un dosificador automático sin sistemas de medición del consumo de producto químico.

3.3.2. Tratamiento químico en desorción

El tratamiento químico empleado para este caso es el DISP2, producto de la misma familia química que el DISP1. El producto se aplica en el carbón durante cada ciclo de desorción.

La dosis aplicada es de 100 ppm en base al volumen total de solución de desorción por ciclo, que en este caso corresponde a 120 m³/ciclo. La forma de aplicar el producto es manual, no contándose con sistemas automáticos.

3.3.3 Control de los resultados (Monitoreos)

El Control de los resultados del tratamiento aplicado se llevará a cabo de la siguiente manera:

❖ Adsorción

- El objetivo principal del tratamiento es mantener constante los niveles de dureza que ingresan y salen del sistema de columnas de carbón activado. Lo cual significa que la diferencial de dureza que sale de la última columna de un determinado tren, con relación a la misma solución que ingresa a dicha columna, debe ser igual a 0 ppm. Valores superiores indican la posibilidad de formación de incrustaciones de carbonato de calcio.
- Mantener limpios de incrustaciones las líneas, bombas, filtros, válvulas, etc que forman parte del sistema de transferencia de solución en la adsorción.
- Mantener la eficiencia de adsorción constante en el proceso, siendo el objetivo del 92 %.
- Reducir la frecuencia de limpieza ácida del carbón activado, la cual se incrementa conforme los depósitos de carbonato de calcio se presentan en el carbón activado.

Objetivo en Adsorción

Caída de dureza = 0 ppm CaCO_3

Dureza entrada tren X – Dureza de salida tren X = 0 ppm CaCO_3

(Cuando la diferencia es menor de 0 ppm se presenta un proceso de limpieza)

❖ Desorción.

- El objetivo principal del tratamiento es mantener constante el índice de dureza depositada por tonelada de carbón que ingresa al proceso de desorción. Lo que significa que durante el proceso de desorción no debe haber incremento del nivel de dureza expresada como carbonato de calcio con el que ingresa el carbón, este debe permanecer constante o en el menor de los casos disminuir.

- Eliminar o minimizar los problemas de incrustación en las partes componentes de un sistema de desorción, tales como los filtros del tanque de desorción, intercambiadores de calor, líneas, válvulas, etc.

Objetivo en desorción

Sin lavado ácido (Situación más adecuada para medir la performance de un producto)

Dureza depositada en el carbón por desorción = 0 kg/t carbón
kg/t carbón sale de desorción – kg/t carbón que ingresa a desorción = 0
(Cuando la diferencia es menor a 0 kg/t de carbón se presenta un proceso de limpieza)

Con lavado ácido

Dureza depositada en el carbón por desorción = 0 kg/t carbón
kg/t carbón sale de desorción – kg/t carbón que ingresa a desorción = 0
(Cuando la diferencia es menor de 0 kg/t de carbón se presenta un proceso de limpieza)

III.3.1. Resultados de tratamiento

Según el tratamiento propuesto y los objetivos buscados se ha podido obtener los siguientes resultados, que se muestran en las tablas II y III.

Tabla II. (Resultados de adsorción).

Producto	Dosis de producto aplicado	Caída sin tratamiento (ppm CaCO₃)	Caída con tratamiento (ppm CaCO₃)	Eficiencia de inhibición (%)
DISP 1	3,00 ppm	28,98	6,72	76,80

Tabla III. (Resultados de Desorción)

Producto	Número de desorciones realizadas	Dosis aplicadas en cada desorción	Inhibición de incrustación (kg de CaCO₃/t de carbón)
DISP 2	28	0 ppm	-0,93
DISP 2	11	100 ppm	0,67

3.4. PROPUESTA TÉCNICA PARA MEJORAR EL CONTROL DE INCRUSTACIONES EN CARBÓN ACTIVADO.

El tratamiento propuesto esta resumido de la siguiente manera:

❖ Tratamiento Preventivo en Filtros de Carbón

En esta caso emplearemos solo el **Nalco 95DA193** a una dosis que puede ir de 1 a 3 ppm como máximo, iniciaremos con una dosis de 1 ppm y luego optimizaremos en el proceso.

❖ Tratamiento antincrustante en desorción

En este caso se recomienda la aplicación del producto **Nalco 95DO066**. Este producto está diseñado para prevenir incrustaciones en el carbón activado de los sistemas de desorción e intercambiadores de calor, cuando los sistemas se tornan muy agresivos.

La dosis recomendada de este producto es de 30 ppm en base al volumen de solución de desorción a emplear, es una tecnología completamente distinta a los poliacrilatos.

3.4.1. Propuesta técnica

A efectos de cumplir con los requisitos establecidos en el proceso de acuerdo a las condiciones analizadas, se propone el siguiente Programa Integral de Control de incrustaciones en el sistema de carbón activado, según se indica en la tabla IV.

Tabla IV .

	Sistema	
	Adsorción	Desorción
Nalco 95DA193	Producto para prevenir la formación de incrustaciones en el carbón de las columnas de absorción. El tratamiento es preventivo al no ser este punto, el crítico para el ensuciamiento del lecho.	
Nalco 95DO066		Producto para prevenir la formación de incrustaciones en circuitos de desorción a altas temperaturas, principalmente en el carbón activado. Producto que se emplea para sistemas altamente drásticos que requieran un control total, tanto en el carbón activado como en los intercambiadores de calor.

3.4.2. Productos químicos - Tratamientos

De acuerdo a las características de la solución y la naturaleza del sistema se han seleccionado los siguientes productos, para la implementación total del Programa Integral de Control de Incrustación:

❖ **NALCO 95DA193 Dispersante**, modificador de cristales e Inhibidor de Incrustaciones.

(Tratamiento preventivo – Columnas de Carbón)

Características

- Producto balanceado químicamente que permite el control de las incrustaciones en los sistemas que transportan agua de proceso con alto nivel de carbonato de calcio disuelto.
- Específicamente diseñados para prevenir formación de incrustaciones en los sistemas de riego, líneas de agua, filtros Merrill Crowe y carbón activado (Lado Frío).
- Cuenta con tres efectos de trabajo, como lo son el efecto dispersante, umbral y modificador de cristales.

A diferencia de otros productos el Nalco 95DA193 combina estas tres acciones.

Propiedades Físicas

- | | |
|------------------------|---------------------------------|
| • Densidad | 1,11 – 1,15 g/cm ³ . |
| • Punto de Inflamación | NE. |
| • Solubilidad en Agua | Completa |
| • Viscosidad a 20 °C | 7 cp |
| • pH | 3,5 – 4,5 |

❖ Nalco 95DO066 Inhibidor de incrustaciones y modificador de cristales.

(Tratamiento para sistemas de muy severas condiciones de operación)

Características

- Producto empleado para prevenir incrustaciones en sistemas de carbón activado e intercambiadores de calor, en los procesos de desorción.
- Posee una combinación de polímeros que evitan que los depósitos modificados puedan tener efecto sobre superficies con alta transferencia calórica.
- Totalmente soluble agua y se puede aplicar diluido.
- Esta orientado principalmente a evitar problemas en los sistemas de desorción en los procesos de recuperación de oro.

Propiedades Físicas

- Densidad : 1,17 g/cm³
- Punto de Inflamación : NE
- Solubilidad en Agua : Completa.
- Viscosidad a 20 °C : 3 cp.
- pH : < 2

3.4.3. Dosificación de productos químicos.

❖ Dosificación y Puntos de Inyección de Productos Químicos:

A continuación se detallan las dosis de producto químico recomendadas para el tratamiento (Intervalo de dosificación y dosis media) y punto de inyección, según se observa en la tabla V:

Tabla V.

Producto	Punto de Dosificación	Dosis Media (ppm)	Intervalo (ppm)
Nalco 95DA193	Poza de distribución de solución de ingreso a columnas de carbón	2,5	1 - 3
Nalco 95DO066	Solución pobre que ingresa a desorción	50	40 - 60

La dosis de ambos productos se ha determinado en base al análisis de los índices de incrustación que se determinaron de los chequeos químicos realizados a la solución rica. La solución que ingresa a los filtros de carbón activado posee un índice de estabilidad que esta en el orden de 3 a 3,6 ; la cual le da una característica de muy incrustante.

En otras aplicaciones se han llegado a valores de 0,5 a 0,7 ppm, para un adecuado control de las incrustaciones en los trenes de carbón activado.

3.4.4. Control y monitoreo del programa

Para alcanzar los resultados de un programa propuesto es necesario implementar control y monitoreo, que se puede indicar de la siguiente manera:

❖ Determinaciones analíticas

Es de gran importancia establecer un comportamiento de la naturaleza química del agua de proceso y del carbón activado, de tal forma que se puedan tomar todas las acciones correctivas del caso. En este sentido se proponen el siguiente plan de análisis y frecuencia de ensayos, que serán llevados a cabo por personal de laboratorio en planta, según se indica en la tabla VI y VII.

Tabla VI (Análisis de solución).

Punto de Monitoreo	Determinación	Frecuencia
Solución de ingreso a columnas de carbón (Análisis en cada tren)	pH	2 por mes
	Dureza total	2 por mes
	Alcalinidad total	2 por mes
	Temperatura	2 por mes
	Sólidos totales disueltos	2 por mes
	Índice de incrustación	2 por mes
Solución de salida de columnas de carbón (Análisis en cada tren)	pH	2 por mes
	Dureza total	2 por mes
	Alcalinidad total	2 por mes
	Temperatura	2 por mes
	STD	2 por mes
	Índice de incrustación	2 por mes
Agua fresca (Reposición en desorción)	pH	2 por mes
	Dureza total	2 por mes
	Alcalinidad total	2 por mes
	Temperatura	2 por mes
	STD	2 por mes
	Índice de Incrustación	2 por mes
Solución de desorción	pH	2 por mes
	Dureza total	2 por mes
	Alcalinidad total	2 por mes
	STD	2 por mes
	Temperatura	2 por mes
	Índice de Incrustación	2 por mes

Tabla VII (Análisis en carbón activado).

Punto de Monitoreo	Determinación	Frecuencia
Carbón activado nuevo	Dureza total	1 por mes
Carbón activado que ingresa al lavado ácido	Dureza total	1 por mes
Carbón activado que sale del lavado ácido	Dureza total	1 por mes
Carbón que ingresa a desorción	Dureza total	1 por mes
Carbón que sale de desorción	Dureza total	1 por mes

❖ Monitoreos

Como medio de monitoreo se propone la instalación de cupones (testigos metálicos que permiten evaluar incrustación – ver anexo 12) de incrustación en las líneas de proceso con mayor tendencia a formar depósitos calcáreos. Pueden considerarse en este caso la línea de ingreso de solución a las columnas de carbón activado, tal como se indica en la Tabla VIII.

Tabla VIII.

Punto de Monitoreo	Ensayo	Método de lectura	Frecuencia
Línea de solución de ingreso a columnas de carbón activado	Tasa de Incrustación	Probeta Retractable	Cada 30 días

3.4.5 Servicio técnico

El servicio técnico asociado al Programa Integral de Control de Incrustación propuesto debe contemplar lo siguiente:

❖ **Servicio de campo**

- Revisión y ajuste, cuando fuere necesario, de la dosificación de productos químicos, todos los días hábiles de la semana, de acuerdo a variables operativas de control.
- Revisión de variables de proceso y operativas críticas.
- Seguimiento de resultados de los análisis químicos.
- Lecturas de tasas de incrustación de acuerdo a la frecuencia y métodos indicados en el ítem (Monitoreo de los Procesos Incrustantes).
- Control de stock de productos químicos en planta.
- Emisión de Reporte Personal de Servicio (tres veces por semana)
- Emisión de Informe Mensual.

La supervisión del tratamiento, debe estar enmarcada en un servicio global de asistencia, basada en la amplia e importante experiencia del proveedor en este tipo de Programas de Control.

La Supervisión del tratamiento debe ser realizada por personal técnico especializado y con experiencia demostrada.

❖ **Equipos / Sistemas de Dosificación**

Se deben proporcionar las bombas necesarias para la aplicación del producto, de acuerdo a todos los requerimientos propios del servicios, como así también en estricto acuerdo a las normas de Seguridad vigentes.

Asimismo, los productos químicos deben ser provistos en contenedores de 1 m³, para minimizar la generación de residuos y disminuir pérdidas por derrames y mermas.

3.5. EVALUACIONES A NIVEL PLANTA CON PRODUCTOS A BASE DE POLIMEROS DISPERSANTES NALCO

3.5.1. Objetivo de la evaluación

El objetivo de la presente evaluación es lograr la mejor performance del programa antincrustante Nalco 95DA193 y Nalco 95DO066 Strip, para los sistemas de carbón activado de la planta en estudio.

Los programas indicados están orientados a prevenir la formación de carbonato de calcio en el sistema, por las condiciones agresivas que se generan, tanto en el proceso de adsorción como el de desorción.

3.5.2. Metodología de las evaluaciones

La metodología empleada en las evaluaciones fue la siguiente:

❖ Etapa de evaluaciones para el sistema de adsorción

Etapa Preliminar. (02.12.2003 al 09.12.2003)

- Dosis empleada de Nalco 95DA193 : 0,0 ppm

Etapa I. (10.12.2003 al 22.12.2003).

- Dosis empleada de Nalco 95DA193 : 1,0 ppm

Etapa II. (23.12.2003 al 29.12.2003).

- Dosis empleada de Nalco 95DA193 : 2,0 ppm

Etapa III. (30.12.2003 AL 13.01.2004.).

- Dosis empleada de Nalco 95DA193 : 0,0 ppm

❖ Etapa de evaluaciones para el sistema de desorción

Etapa Preliminar (02.12.2003 al 09.12.2003)

- Dosis empleada de Nalco 95DO066 Strip : 0,0 ppm
- Desorciones realizadas : (19 Strips)(1212-1230)

Etapa I. (10.12.2003 al 23.12.2003)

- Dosis empleada de Nalco 95DO066 Strip : 50,0 ppm

- Desorciones realizadas : (51 Strips)(1231-1281)
Etapa II. (23.12.2003 al 13.01.2003).
- Dosis empleada de Nalco 95DO066 Strip : 0,0 ppm
- Desorciones realizadas : (75 Strips)(1282-1364)

3.5.3. Puntos de aplicación de los productos Nalco

Los productos seleccionados para esta prueba fueron los siguientes:

❖ Nalco 95DA193

Antincrustante para sistemas de adsorción, su aplicación se observa en la tabla IX.

Tabla IX

Producto	Función	Punto de aplicación.
Nalco 95DA193	Antincrustante para sistemas de recirculación y adsorción.	Línea troncal de entrada a las columnas de adsorción tanto para la planta antigua como la nueva.

❖ NALCO 95DO066 - STRIP.

Antincrustante para sistemas de condiciones de altas temperaturas, su aplicación se observa en la tabla X.

Tabla X.

Producto	Función	Punto de aplicación.
Nalco 95DO066	Antincrustante para sistemas de altas temperaturas, evaporadores y sistemas de desorción.	1.-Tanque de Solución Presoak. 2.-Tanque de solución intermedia.

Ver Anexo 1 y Anexo 2

3.5.4.DOSIS APLICADAS.

Las dosis aplicadas fueron las siguientes:

Tabla XI (Planta Antigua – Planta 1)

Producto	Función	Dosis recomendada.
Nalco 95DA193	Antincrustante para sistemas de re-circulación y adsorción.	1 – 2,0 ppm. En base al flujo de solución de ingreso a carbón activado.
Nalco 95DO066	Antincrustante para procesos de desorción	50 ppm. En base al volumen de solución de desorción.

Tabla XII (Planta Nueva –Planta 2):

Producto	Función	Dosis recomendada.
Nalco 95DA193	Antincrustante para sistemas de re-circulación y adsorción.	1 – 2,0 ppm. En base al flujo de solución de ingreso a carbón activado.
Nalco 95DO066	Antincrustante para procesos de desorción.	50 ppm. En base al volumen de solución de desorción.

Consumo de productos

Tabla XIII (Planta Antigua-Planta 1)

Producto	Caudal	Dosis (ppm)	Consumo
Nalco 95DA193	1800 m ³ /h	2,0	77,13 L/día
Nalco 95DO066	40 m ³ (Presoak) 80 m ³ (Intermedio)	50 50	1,6 L/desorción 3,4 L/desorción

Tabla XIV (Planta Nueva - Planta 2)

Producto	Caudal	Dosis (ppm)	Consumo
Nalco 95DA193	2700 m ³ /h	2,0	115,7 L/día
Nalco 95DO066	40 m ³ (Presoak)	50	1,6 L/desorción
	80 m ³ (Intermedio)	50	3,4 L/desorción

3.5.5. Sistemas de dosificación

Los equipos y accesorios requeridos para la aplicación correcta del producto Nalco 95DA193, fueron suministrados por la empresa Nalco, equipos que constaron de lo siguiente:

- Bombas dosificadoras para aplicación de Nalco 95DA193 en cada sistema de adsorción.
- Sistemas de calibración y medición del consumo de productos químicos flujo, para obtener la dosis apropiada del sistema (ver Anexo 13-sistemas de dosificación).

3.5.6. Resultados

Los resultados obtenidos de las evaluaciones los podemos resumir en cuadros, donde se han evaluado las caídas de dureza en CaCO₃ por cada tren y por columna de carbón. De igual forma se han evaluado los índices de incrustación para el carbón en el strip, antes y después del proceso, con aplicación de producto y sin aplicación de producto.

Los resultados se pueden resumir de la siguiente forma:

❖ Resultados de Adsorción.

Observar los resultados en los respectivos anexos:

- ETAPA PRELIMINAR. (Anexo 3)
- ETAPA I. (Anexo 4)

- ETAPA II. (Anexo 5)
- ETAPA III. (Anexo 6)
- GRAFICO CAIDA DE DUREZA VS DOSIS DE PRODUCTO (Anexo 7)

❖ **Resultados de Desorción**

Observar los resultados en los respectivos anexos:

- ETAPA PRELIMINAR. (Anexo 8)
- ETAPA I. (Anexo 9).
- ETAPA II. (Anexo 10).

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Las conclusiones y recomendaciones que se pueden plantear a partir de las evaluaciones realizadas en cada uno de los procesos son las siguientes:

❖ Adsorción.

El producto Nalco 95DA193 ha cumplido satisfactoriamente el objetivo buscado, el cual fue de mantener bajo control la caída de dureza en las columnas de adsorción de carbón (0,0 ppm como CaCO_3). Ver anexos 4, 5, 6 y 7.

La dosis óptima de Nalco 95DA193 es de 2,0 ppm para los sistemas de adsorción, alcanzándose a estas dosis un control total en la caída de dureza como carbonato de calcio.

Nalco 95DA193 debe aplicarse en la solución que ingresa al sistema de adsorción, en forma continua como preventivo para la formación de incrustaciones.

Se redujo el diferencial de caída de dureza desde 18,6 ppm como CaCO_3 en el sistema obtenido a 0 ppm de dosis del producto, hasta - 2,6 ppm de Dureza Total como CaCO_3 . El signo negativo indica limpieza del sistema, lo cual significa que sin tratamiento se depositarían 18,6 g de dureza Total como CaCO_3 por cada 1 tonelada de solución que ingresa y sale del sistema, tomando como referencia final 0 ppm de dureza total como CaCO_3 , si lo totalizamos tendríamos que para un flujo de 2800 m^3/h , se están precipitando 52,08 kg de dureza total como carbonato de calcio. Es importante recalcar que este valor representa una caída teórica de dureza, la cual puede depositarse como partícula suelta o como incrustación, cualquiera que sea la modalidad del depósito no debe existir, ya que en ambos casos se afecta el carbón.

Si bien el objetivo de la planta es no bajar la eficiencia de recuperación, la cual se ha mantenido constante en 93 %. El ahorro se muestra por el lado de cambio de carbón, el índice inicial de cambio fue de 15 tonelada/mes, actualmente se encuentran trabajando con un índice de cambio de 2

toneladas/mes. Esto ha significado un ahorro de 13 toneladas de carbón por mes, lo que equivale a 16900 US\$/mes, mientras que el costo del tratamiento es de 5000 US\$/mes.

❖ **Desorción**

El producto Nalco 95DO066 STRIP ha cumplido satisfactoriamente el objetivo de controlar la caída de dureza en los sistemas de desorción.

La dosis óptima del Nalco 95DO066 STRIP es de 50 ppm en base al volumen total de desorción (aprox. 120 m³), con esta dosis se logra controlar el índice de deposición de dureza total como carbonato de calcio en el carbón. Lo cual significa que si el carbón ingresa con un nivel de dureza al proceso de desorción, este valor debe mantenerse o disminuir, nunca aumentar, los valores negativos reportados en las evaluaciones indican que la diferencia de carbonatos en el carbón que sale del proceso de desorción es menor a la que ingresa. (Ver Anexo 8, 9 y 10).

Nalco 95DO066 STRIP es un producto diseñado para trabajar bajo condiciones severas de stress térmico, lo cual le permite tener un control adecuado de la dureza que ingresa a los sistemas de desorción de carbón a altas temperaturas.

❖ **Conclusiones y recomendaciones generales del proceso.**

Si bien el objetivo de la planta es no bajar la eficiencia de recuperación el cual se ha mantenido constante en 93 %, el ahorro se muestra por el lado del cambio de carbón, el índice inicial de cambio fue de 15 toneladas/mes, actualmente se encuentran trabajando con un índice de cambio de 2 toneladas/mes. Esto ha significado un ahorro de 13 toneladas de carbón por mes, lo que equivale a 16900 US\$/mes, mientras que el costo del tratamiento es de 5000 US\$/mes.

Se recomienda la aplicación de productos con sistemas adecuados de dosificación, de forma similar a los instalados durante las evaluaciones, tanto

para sistemas de adsorción y desorción. Estos sistemas constarán de Bombas dosificadoras, sistemas de almacenamiento de producto y probetas para medición y calibración de dosis de producto aplicado.

V. BIBLIOGRAFIA

Fast. J., CARBON STRIPPING THE PRACTICAL ALTERNATIVES.
Denver Minerals Engineer. Reno Nevada. 1989.

Díaz H, Aguayo S, Fundamentos de Carbón Activado, Primera Edición,
Universidad de Sonora 1999, Pag 3-17.

Failon B, Scale Detection and Control During Mineral Beneficiation, Nalco
Chemical, American Institute of Mining Engineers Annual Meeting, Denver-
USA.

Roe J., Scale Formation and inhibition: Practical Applications in Precious
Metals Circuits, Nalco Chemical, Forum 85 Gold & Silver Recovery, Santa
Fe, New Mexico, 1985.

Nalco Chemical Company, Mining And Mineral processing Chemical
Technical Manual, Mill Water Stabilization – Section 8.6.2 (Pag 1-5).

Nalco Chemical Company, Generación de vapor, Manual Técnico Generación
de Vapor, Sección 2,8,1(Pag 1).

VI. APENDICE

Figura 1: Diagrama general del proceso (Oro y Plata).

Figura 2: Diagrama del proceso (Oro).

Anexo 1: Punto de aplicación del Nalco 95DA193.

Anexo 2: Punto de aplicación del Nalco 95DO066.

Anexo 3: Etapa preliminar proceso de adsorción.

Anexo 4: Etapa I proceso de adsorción.

Anexo 5: Etapa II proceso de adsorción.

Anexo 6: Etapa III proceso de adsorción.

Anexo 7: Caída de dureza vs dosis de producto – Adsorción.

Anexo 8: Etapa preliminar proceso de desorción.

Anexo 9A y 9B: Etapa I proceso de desorción.

Anexo 10A y 10B: Etapa II proceso de desorción.

Anexo 11 : Fotos de Carbón Activado.

Anexo 12 : Fotos de cupones de incrustación.

Anexo 13 : Sistemas de dosificación de productos químicos.

FIGURA 1

**DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO
(ORO Y PLATA)**

La recuperación del Oro y la Plata por medio de la adsorción con carbón activado, consiste de tres etapas básicas:

Carga : Adsorción del Oro y la Plata sobre el carbón, a partir de la solución obtenida en lixiviación.

Desorción : Reextracción del Oro y la Plata adsorvidos en el carbón, mediante solución cianurada y a altas temperaturas (100 - 120 °C).

Recuperación : Por medio de la cementación del Oro y la Plata, con polvo de zinc, a partir de soluciones concentradas de metales nobles. La mezcla sólida obtenida pasa a fundición, mientras que la solución retorna a lixiviación.

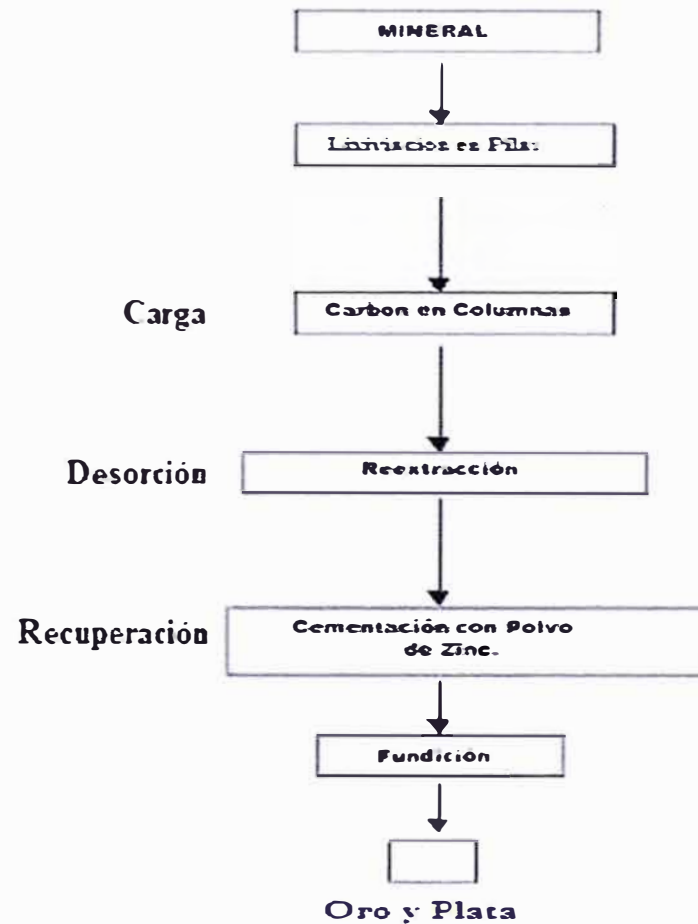
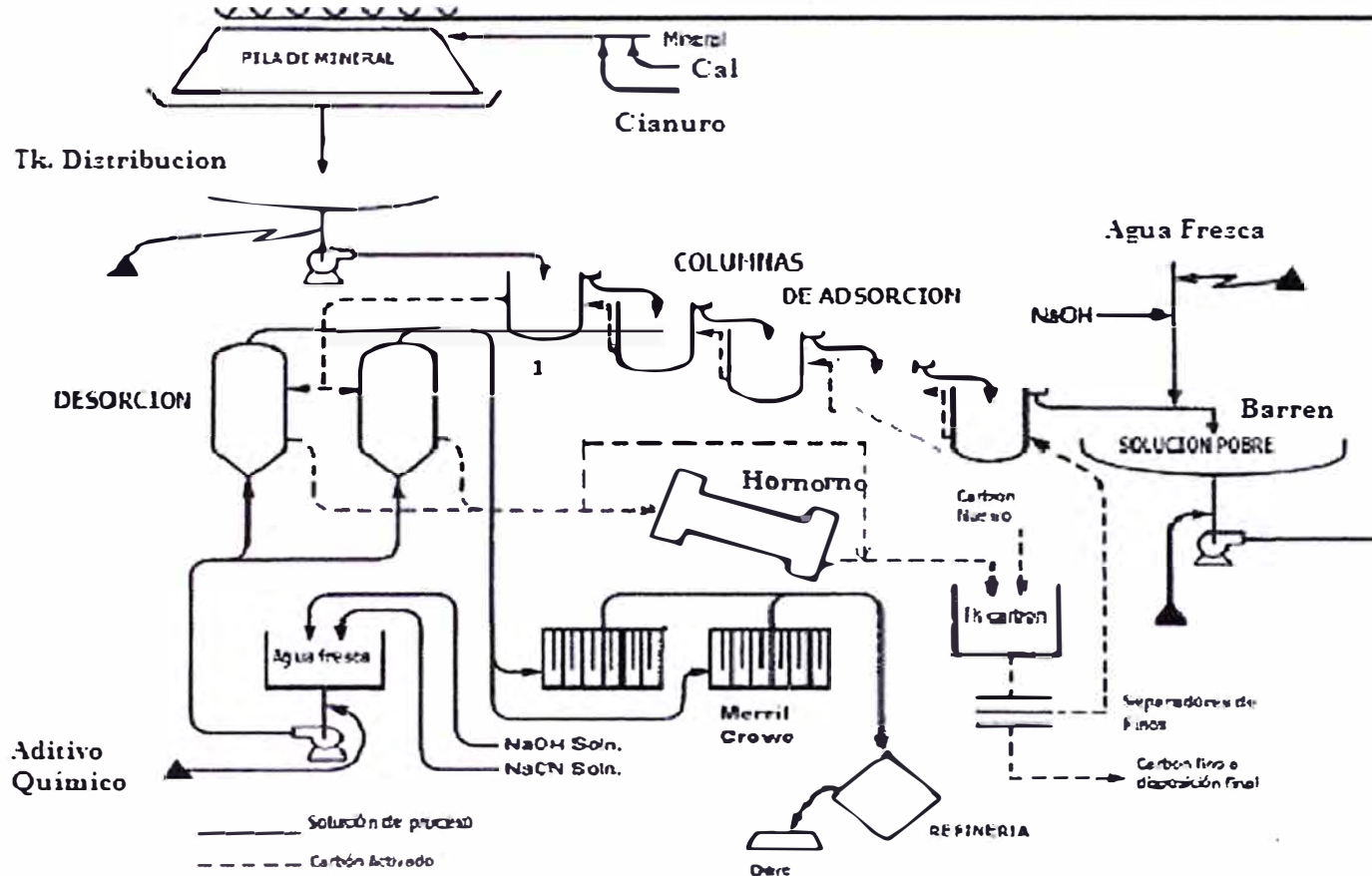


FIGURA 2

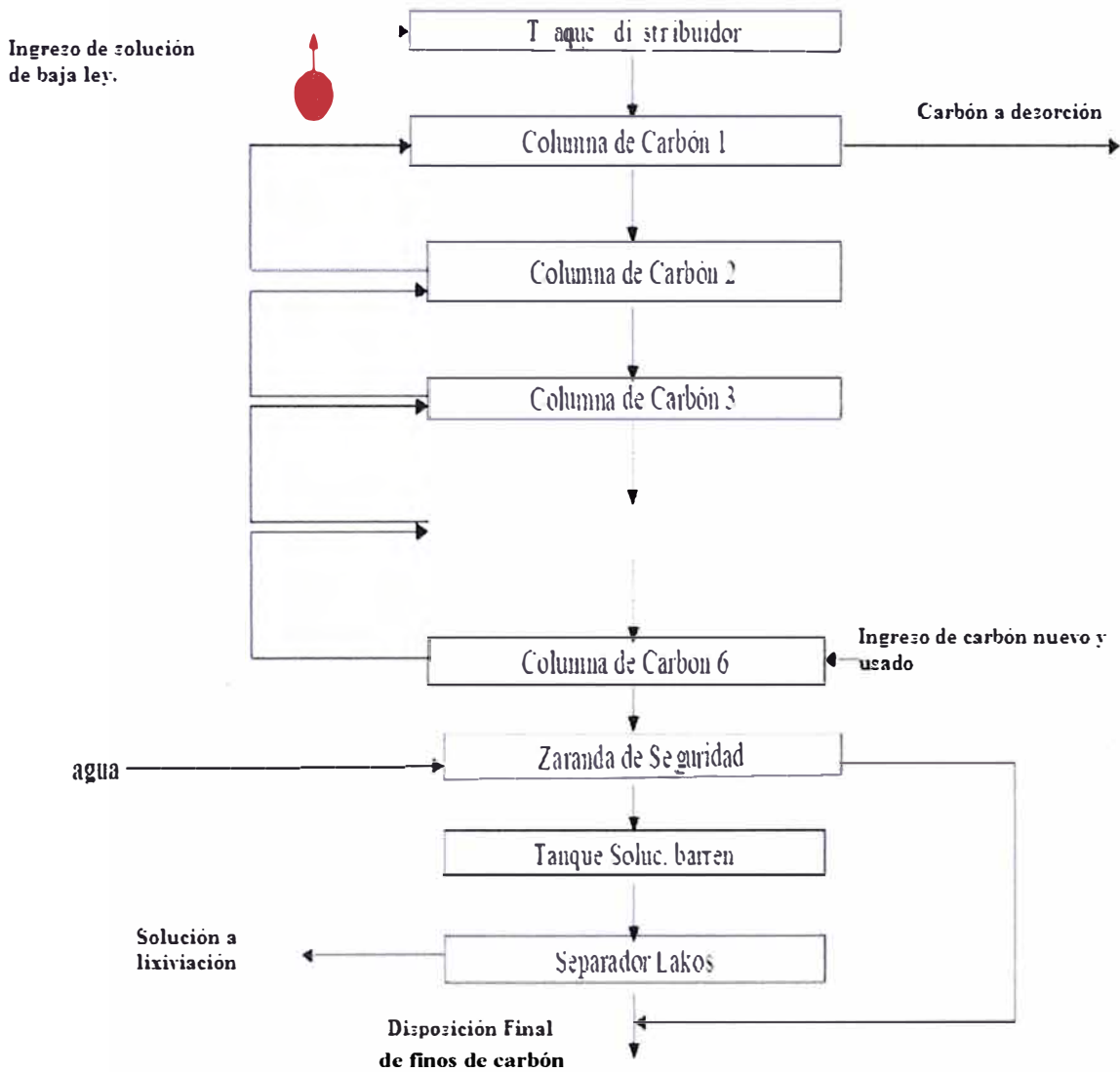
DIAGRAMA DEL PROCESO
RECUPERACION DE ORO POR CARBON ACTIVADO



ANEXO 1

PUNTO DE APLICACIÓN DEL PRODUCTO NALCO 95DA193

ETAPA DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN

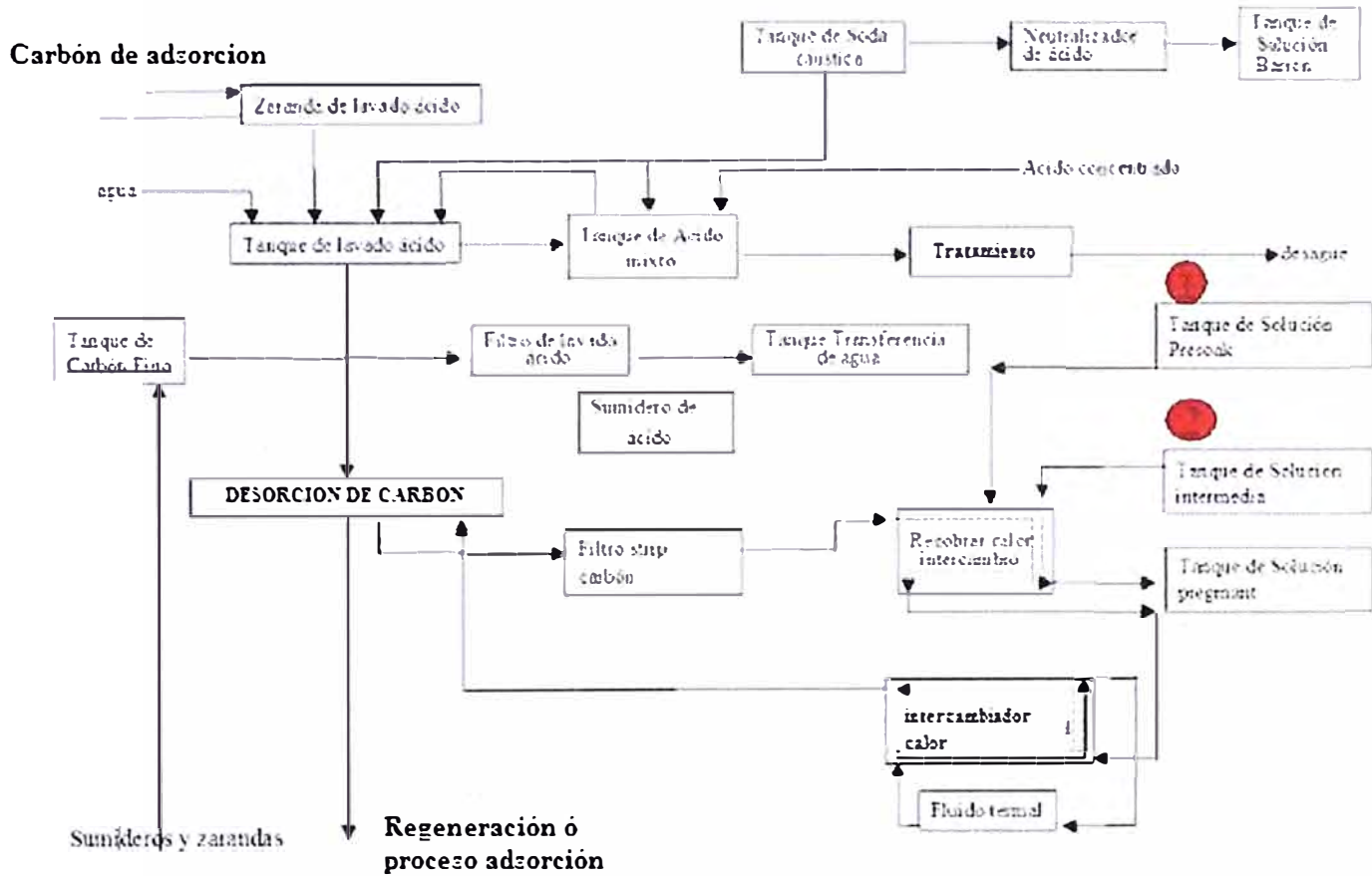


ANEXO 2

PUNTO DE APLICACIÓN DEL NALCO 95DO066



ETAPA DE DESORCIÓN DEL CARBÓN



ANEXO 3

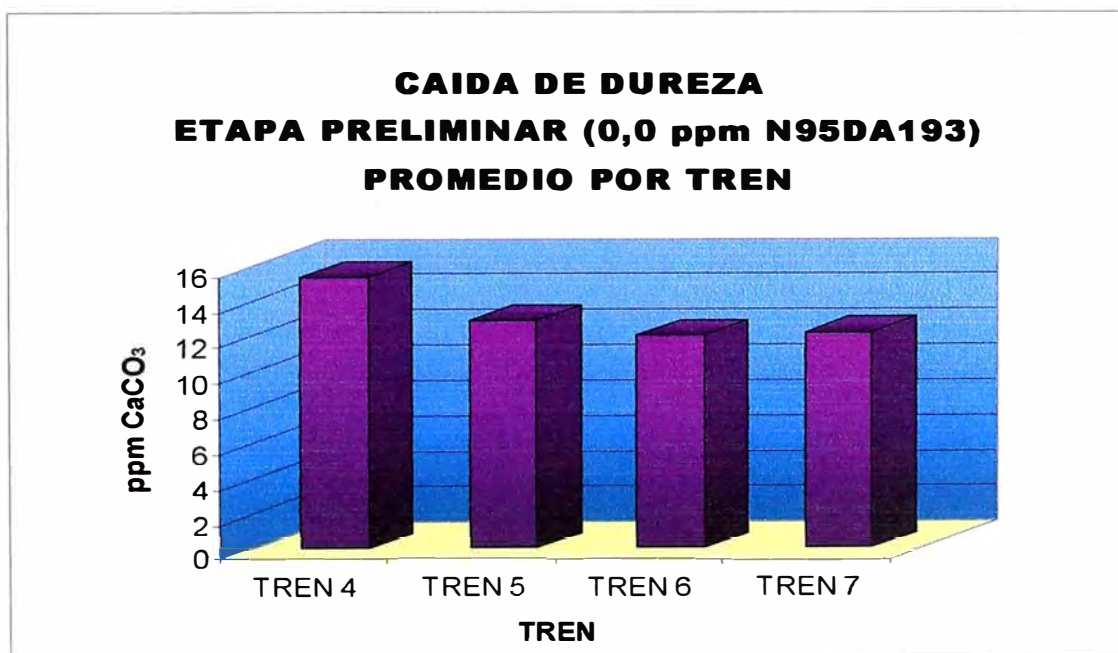
TABLA DE CAIDA DE DUREZA PROCESO DE ADSORCIÓN ETAPA PRELIMINAR

(Diferenciales de dureza entre la entrada y salida (C1-C6))
DOSIS DE PRODUCTO = 0

	TREN 4	TREN 5	TREN 6	TREN 7
DIA	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃
02/12/2003	16.0	8.0	13.6	12.4
03/12/2003	21.2	16.0	6.4	6.0
04/12/2003	26.8	29.2	25.2	25.6
05/12/2003	9.6	10.0	8.4	10.0
06/12/2003	12.0	13.6	11.2	12.8
07/12/2003	14.0	13.2	15.2	13.6
08/12/2003	9.2	-0.4	4.0	0.0
09/12/2003	14.0	13.6	12.4	17.2
PROMEDIO	15.4	12.9	12.1	12.2

PROMEDIO DEL SISTEMA	13.1 ppm
----------------------------	----------

DOSIS N 95DA193	0.0 ppm
-----------------	---------



ANEXO 4

TABLA DE CAIDA DE DUREZA PROCESO DE ADSORCIÓN ETAPA I

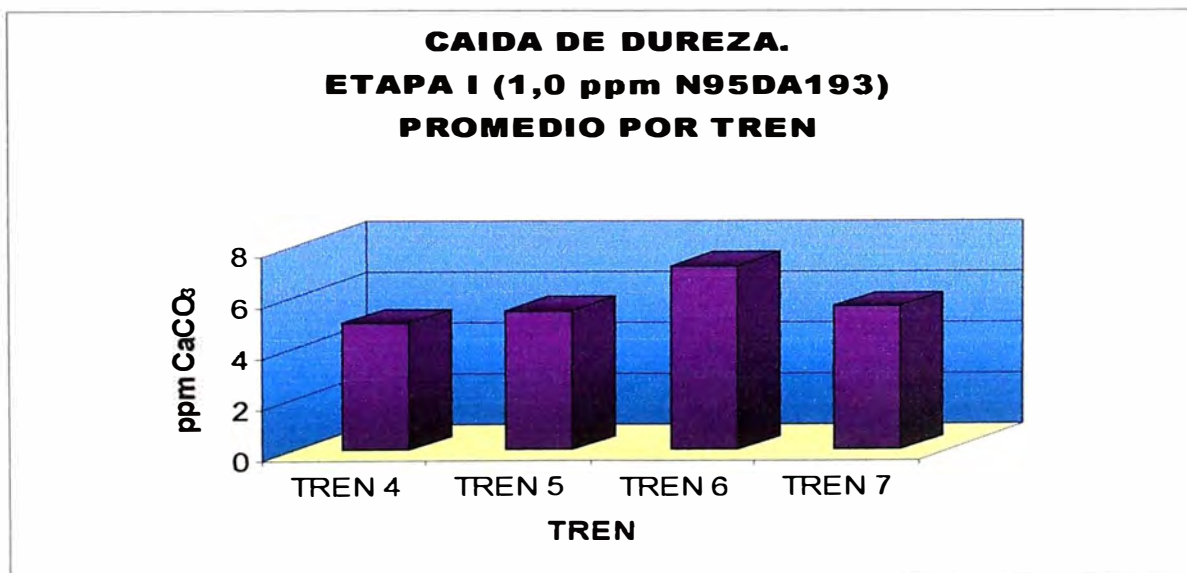
ETAPA I: DEL 10 AL 22 DE DICIEMBRE.

(Diferenciales de dureza entre la entrada y salida - C1-C6)

DOSIS DE PRODUCTO : 1 ppm

DIA	TREN 4	TREN 5	TREN 6	TREN 7
	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃
10/12/2003	11.2	13.6	2.8	2.4
11/12/2003	0.4	0.4	0.8	0.8
12/12/2003	19.2	19.2	36.0	31.2
13/12/2003	10.4	10.0	18.0	8.0
14/12/2003	6.4	2.4	5.2	6.0
15/12/2003	0.8	-0.4	-0.4	0.4
16/12/2003	6.8	-0.8	0.8	1.2
17/12/2003	1.2	0.8	6.0	5.6
18/12/2003	1.2	2.8	2.8	4.0
19/12/2003	0.8	4.4	3.6	2.4
20/12/2003	0.4	1.2	2.0	-0.8
21/12/2003	4.0	15.6	14.0	8.8
22/12/2003	2.0	1.6	2.0	2.8
PROMEDIO	5.0	5.4	7.2	5.6

PROMEDIO DEL SISTEMA	5.8 ppm
DOSIS N95DA193	1.0 ppm



ANEXO 5

TABLA DE CAIDA DE DUREZA PROCESO DE ADSORCIÓN ETAPA II

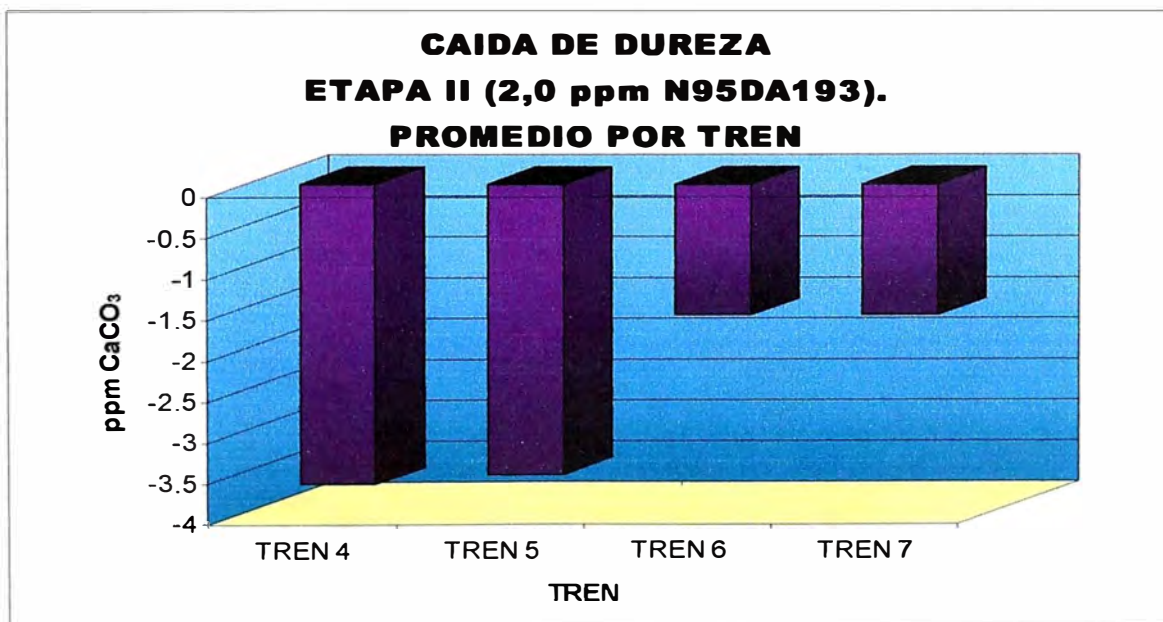
ETAPA II : DEL 23 AL 29 DE DICIEMBRE.

(Diferenciales de dureza entre la entrada y salida - C1-C6)

DOSIS DE PRODUCTO : 2,0 ppm

DIA	TREN 4	TREN 5	TREN 6	TREN 7
	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃
23/12/2003	0.4	0.0	0.0	0.8
24/12/2003	-3.6	-4.4	-1.6	0.4
25/12/2003	-0.8	-3.2	-2.4	-2.8
26/12/2003	-1.6	-2.0	-1.6	0.0
27/12/2003	-5.6	-3.2	-2.4	-1.2
28/12/2003	-3.6	-0.8	-2.0	0.0
29/12/2003	-10.8	-11.2	-1.2	-8.4
PROMEDIO	-3.7	-3.5	-1.6	-1.6

PROMEDIO DEL SISTEMA	-2.6 ppm
DOSIS N95DA193	2,0 ppm



ANEXO 6

TABLA DE CAIDA DE DUREZA PROCESO DE ADSORCIÓN ETAPA III

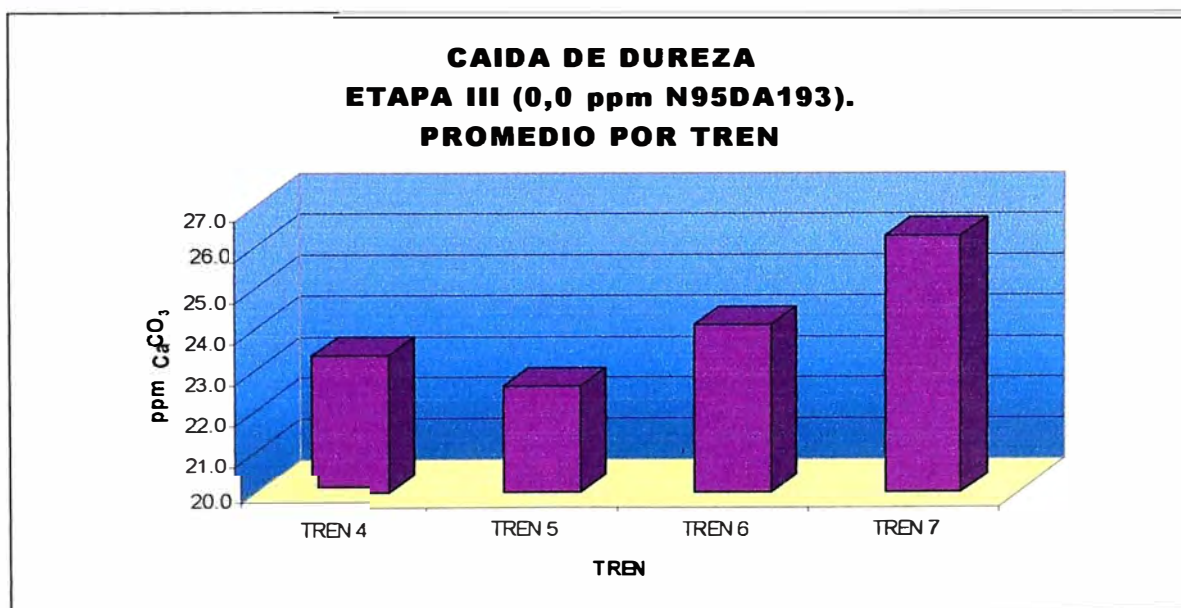
ETAPA III : DEL 30 DIC AL 13 ENERO 2004.

(Diferenciales de dureza entre la entrada y salida - C1-C6)

DOSIS DE PRODUCTO : 0,0 ppm

DIA	TREN 4	TREN 5	TREN 6	TREN 7
	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃
30/12/2003	1.2	0.0	7.2	6.8
31/12/2003	32.8	11.2	11.2	7.2
01/01/2004	8.0	3.2	7.2	17.6
02/01/2004	11.6	10.4	22.0	52.8
03/01/2004	18.0	20.4	18.4	16.8
04/01/2004	29.2	50.4	31.6	41.2
05/01/2004	18.8	19.2	22.0	19.6
06/01/2004	20.8	20.0	24.8	24.0
07/01/2004	34.8	26.8	40.0	44.4
08/01/2004	25.2	24.4	26.8	22.4
09/01/2004	42.4	35.2	23.6	20.0
10/01/2004	6.8	11.6	16.0	10.8
11/01/2004	34.0	38.4	40.0	34.0
12/01/2004	34.8	34.8	33.2	38.8
13/01/2004	32.0	32.8	37.2	37.6
PROMEDIO	23.4	22.6	24.1	26.3

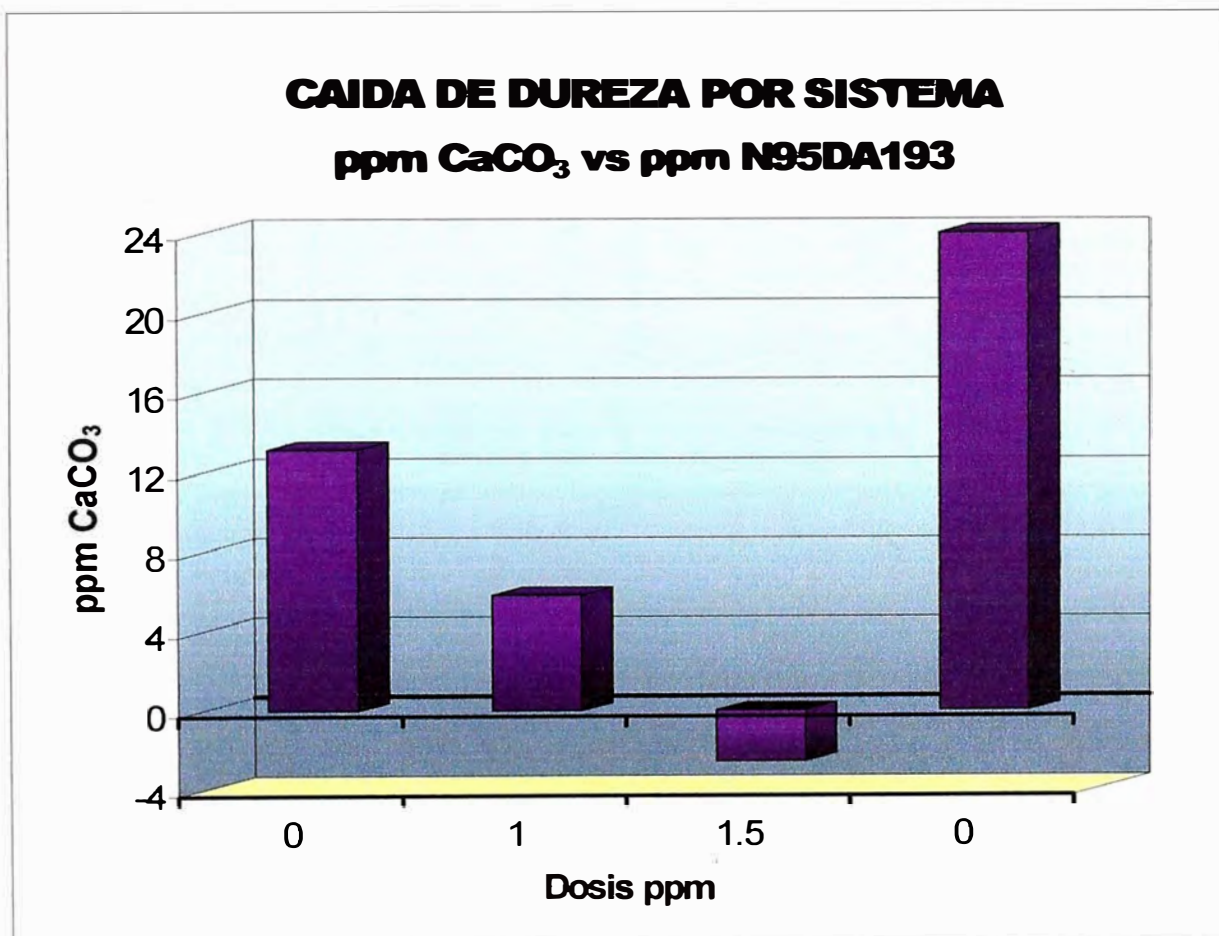
PROMEDIO DEL SISTEMA	24.1 ppm
DOSIS 95DA193	0,0 ppm



ANEXO 7

**TABLA DE CAIDA DE DUREZA VS DOSIS
PROCESO DE ADSORCIÓN**

DOSIS DE N 95DA193 ppm	CAIDA DE DUREZA DEL SISTEMA (PROMEDIO DE TODOS LOS TRENES)
0,0	13,1 ppm CaCO ₃
1,0	5,8 ppm CaCO ₃
2,0	-2,6 ppm CaCO ₃
0,0	24,1 ppm CaCO ₃



ANEXO 8

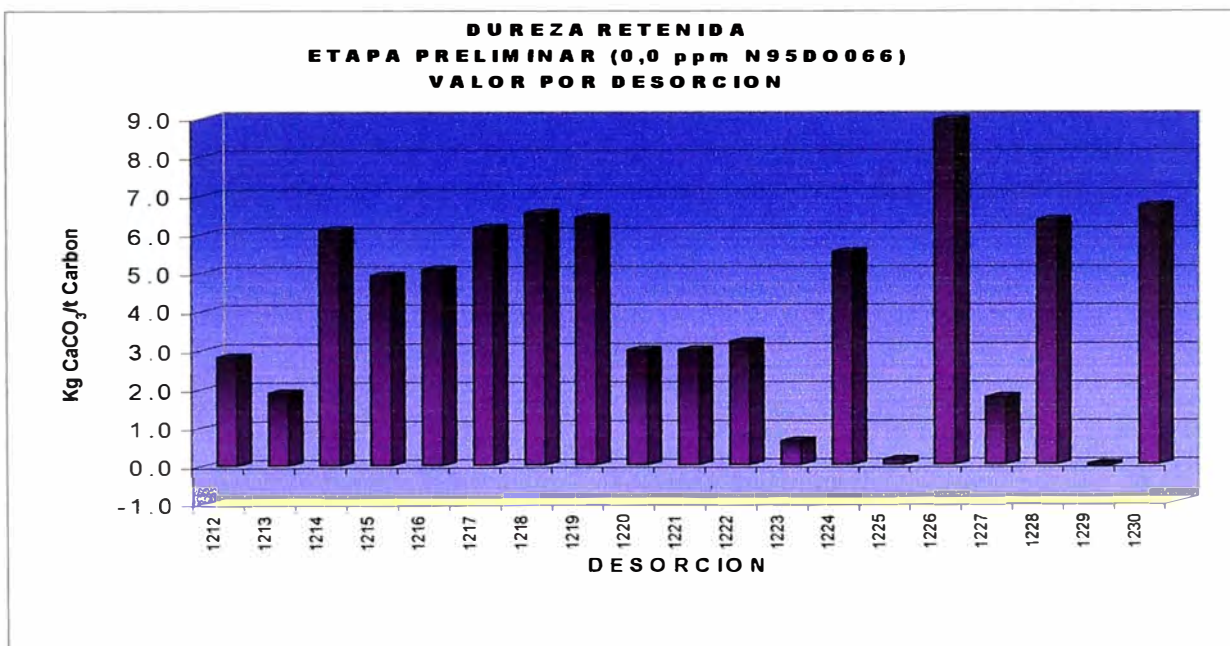
TABLA DE DUREZA DEPOSITADA EN CARBÓN PROCESO DE DESORCIÓN ETAPA PRELIMINAR

ETAPA PRELIMINAR - BLANCO

(Dureza retenida en carbón (Salida - Entrada))

DOSIS DE PRODUCTO = 0 ppm NALCO 95DO066.

STRIP	1	2	2 - 1
	INGRESO k CaCO ₃ /t Carbón	SALIDA k CaCO ₃ /t Carbón	DUREZA RETENIDA k CaCO ₃ /t Carbón
1212	18.6	21.4	2.8
1213	22.7	24.6	1.9
1214	21.4	27.5	6.1
1215	23.1	28.0	4.9
1216	22.6	27.7	5.1
1217	21.4	27.6	6.1
1218	23.0	29.6	6.5
1219	21.4	27.8	6.4
1220	19.8	22.8	3.0
1221	18.7	21.7	3.0
1222	20.5	23.7	3.2
1223	22.4	23.0	0.6
1224	15.3	20.8	5.5
1225	16.9	17.0	0.1
1226	19.9	28.9	8.9
1227	30.5	32.2	1.7
1228	18.7	25.0	6.3
1229	23.0	23.0	0.0
1230	23.2	29.9	6.7



ANEXO 9A

TABLA DE DUREZA DEPOSITADA EN CARBÓN PROCESO DE DESORCIÓN ETAPA I

ETAPA I

(Dureza retenida en carbón (Salida - Entrada))

DOSIS DE PRODUCTO = 50 ppm NALCO 95DO066

STRIP	1	2	2 - 1
	INGRESO k CaCO ₃ /t carbón	SALIDA k CaCO ₃ /t carbón	DIFERENCIAL k CaCO ₃ /t carbón
1231	18.9	20.0	1.1
1232	23.5	25.6	2.0
1233	20.3	20.7	0.5
1234	23.0	23.0	0.0
1235	31.0	24.0	-6.9
1236	27.2	23.9	-3.3
1237	26.5	25.6	-0.9
1238	27.8	27.2	-0.6
1239	25.6	25.3	-0.3
1240	24.6	23.7	-0.9
1241	24.4	19.5	-4.9
1242	30.3	29.3	-1.1
1243	23.8	22.1	-1.7
1244	27.8	26.3	-1.5
1245	18.4	20.9	2.5
1246	31.6	30.1	-1.5
1247	28.9	28.0	-0.9
1248	32.2	31.1	-1.1
1249	29.9	29.5	-0.5
1250	32.6	26.9	-5.6
1251	22.0	25.3	3.3
1252	24.9	21.4	-3.5
1253	26.0	24.6	-1.4
1254	22.7	21.6	-1.1
1255	28.3	18.8	-9.5

ETAPA I

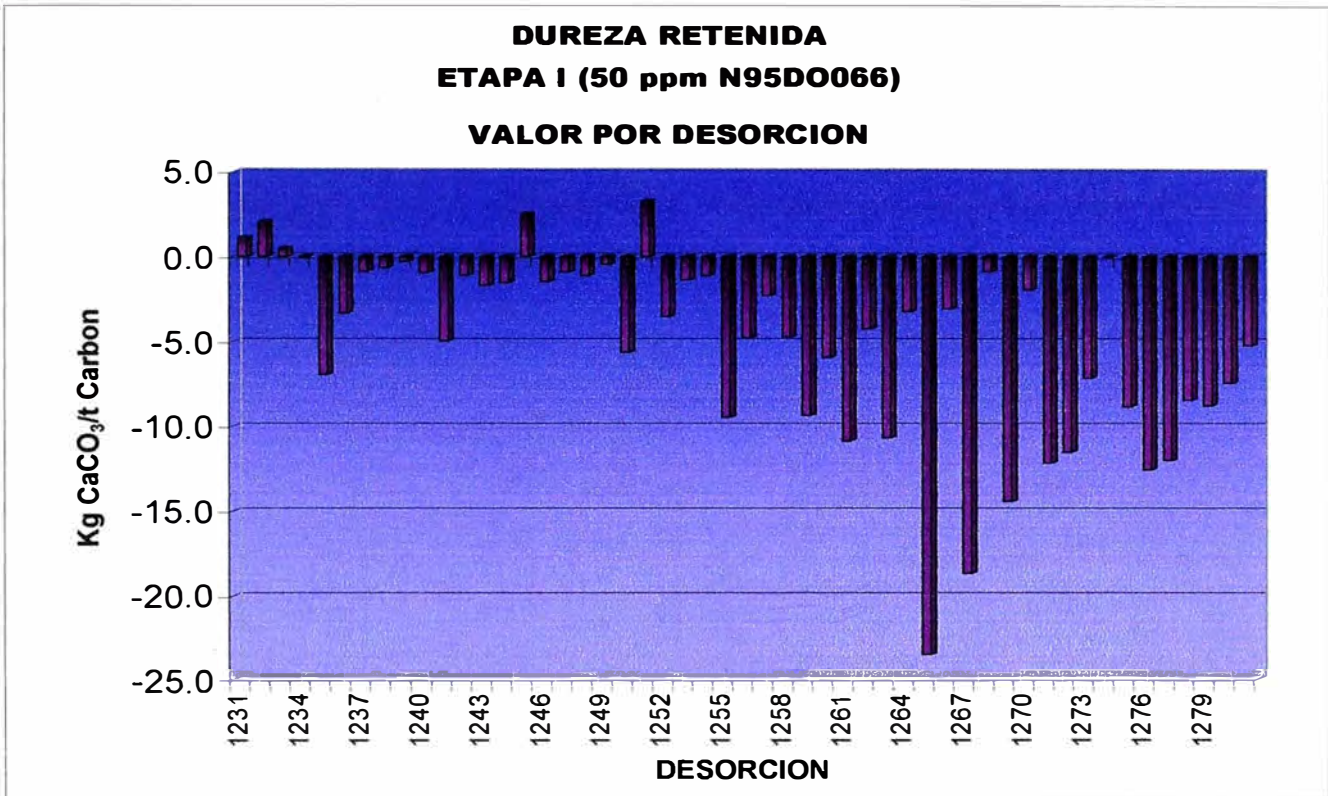
(Dureza retenida en carbón (Salida - Entrada))

DOSIS DE PRODUCTO = 50 ppm NALCO 95DO066

STRIP	1	2	2 - 1
	INGRESO k CaCO ₃ /t carbón	SALIDA k CaCO ₃ /t carbón	DIFERENCIAL k CaCO ₃ /t carbón
1256	28.3	23.5	-4.8
1257	26.7	24.4	-2.3
1258	27.9	23.2	-4.7
1259	23.2	13.8	-9.4
1260	27.5	21.6	-5.9
1261	23.3	12.4	-10.9
1262	25.3	21.0	-4.3
1263	22.4	11.8	-10.7
1264	26.7	23.5	-3.2
1265	26.7	3.3	-23.4
1266	25.2	22.1	-3.1
1267	23.3	4.6	-18.7
1268	21.4	20.5	-0.9
1269	21.8	7.4	-14.4
1270	28.2	26.3	-2.0
1271	21.4	9.2	-12.2
1272	23.5	12.0	-11.5
1273	23.3	16.1	-7.2
1274	13.2	13.2	0.0
1275	22.1	13.2	-8.8
1276	24.1	11.5	-12.6
1277	19.3	7.3	-12.0
1278	17.4	8.9	-8.5
1279	16.6	7.8	-8.8
1280	16.6	9.2	-7.4
1281	14.2	9.0	-5.2

ANEXO 9B

TABLA DE DUREZA DEPOSITADA EN CARBÓN PROCESO DE DESORCIÓN ETAPA I



ANEXO 10A

TABLA DE DUREZA DEPOSITADA EN CARBÓN PROCESO DE DESORCIÓN ETAPA II

ETAPA II.

(Dureza retenida en carbón (Salida - Entrada))

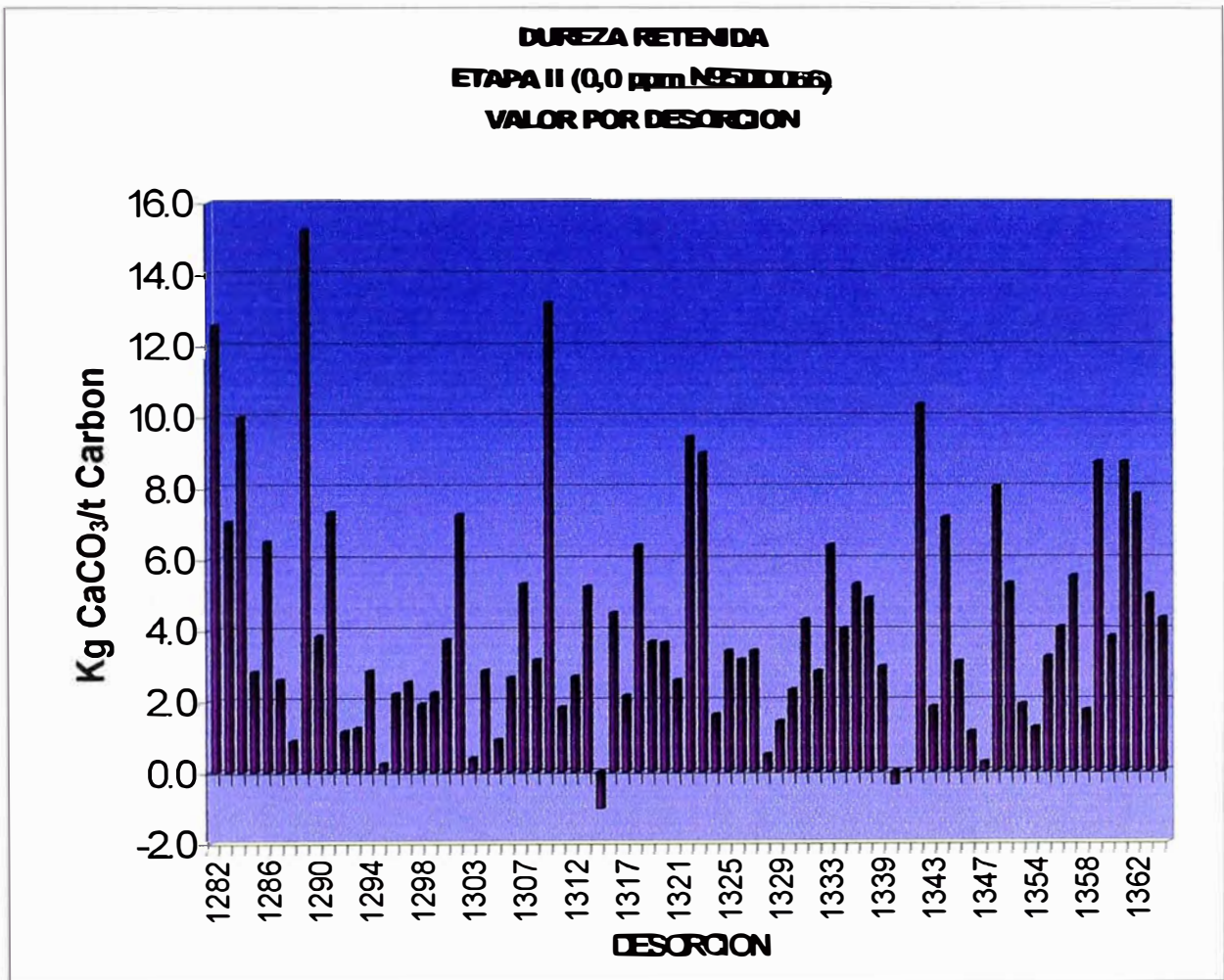
DOSIS DE PRODUCTO = 0 ppm NALCO 95D0066

STRIP	1	2	2-1
	INGRESO	SALIDA	DIFERENCIAL
	k CaCO ₃ /t	k CaCO ₃ /t	k CaCO ₃ /t
1282	15.5	28.1	12.6
1283	16.1	23.1	7.0
1284	16.4	26.3	10.0
1285	18.8	21.7	2.9
1286	14.2	20.7	6.5
1287	16.9	19.5	2.6
1288	18.4	19.3	0.9
1289	11.9	27.1	15.2
1290	12.3	16.1	3.8
1291	24.2	31.6	7.3
1292	24.6	25.8	1.2
1293	22.8	24.0	1.2
1294	20.5	23.3	2.9
1295	24.4	24.7	0.2
1296	23.1	25.3	2.2
1297	21.5	24.1	2.5
1298	15.9	17.8	1.9
1300	22.7	25.0	2.2
1301	19.1	22.8	3.7
1302	15.4	22.7	7.2
1303	20.3	20.7	0.4
1304	19.1	21.9	2.9
1305	24.6	25.5	0.9
1306	24.4	27.1	2.7
1307	16.4	21.7	5.3
1308	18.7	21.8	3.2
1309	15.5	28.8	13.2
1311	21.9	23.7	1.8
1312	21.8	24.5	2.7
1314	23.3	28.5	5.2
1315	21.8	20.7	-1.0
1316	20.6	25.1	4.5
1317	27.6	29.7	2.1
1318	21.8	28.2	6.4
1319	21.4	25.1	3.7
1320	21.8	25.4	3.6

STRIP	1	2	2-1
	INGRESO	SALIDA	DIFERENCIAL
	k CaCO ₃ /t	k CaCO ₃ /t	k CaCO ₃ /t
1321	24.0	26.6	2.6
1322	23.3	32.8	9.4
1323	20.6	29.6	9.0
1324	22.8	24.4	1.6
1325	27.5	30.9	3.4
1326	20.1	23.2	3.2
1327	28.6	32.0	3.4
1328	29.5	30.0	0.5
1329	27.8	29.3	1.4
1330	24.6	26.9	2.3
1331	23.3	27.6	4.3
3132	20.9	23.8	2.8
1333	25.7	32.1	6.4
1334	26.3	30.4	4.0
1335	25.9	31.2	5.3
1338	24.7	29.5	4.9
1339	18.2	21.2	3.0
1340	24.2	23.8	-0.4
1341	33.3	33.3	0.0
1342	18.9	29.2	10.3
1343	24.4	26.2	1.8
1344	19.5	26.6	7.2
1345	22.3	25.4	3.1
1346	25.5	26.6	1.1
1347	24.1	24.4	0.3
1351	23.7	31.7	8.0
1352	22.6	27.9	5.3
1353	32.2	34.1	1.9
1354	25.8	27.0	1.2
1355	25.1	28.3	3.2
1356	25.6	29.7	4.0
1357	25.8	31.3	5.5
1358	32.2	33.9	1.7
1359	26.3	36.0	8.7
1360	30.7	34.5	3.8
1361	24.5	33.3	8.7
1362	25.2	33.0	7.8
1363	29.1	34.0	5.0
1364	30.2	34.5	4.3

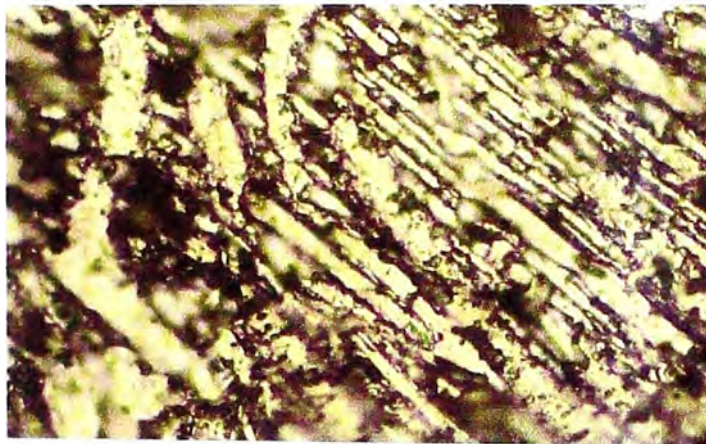
ANEXO 10B

TABLA DE DUREZA DEPOSITADA EN CARBÓN PROCESO DE DESORCIÓN ETAPA II



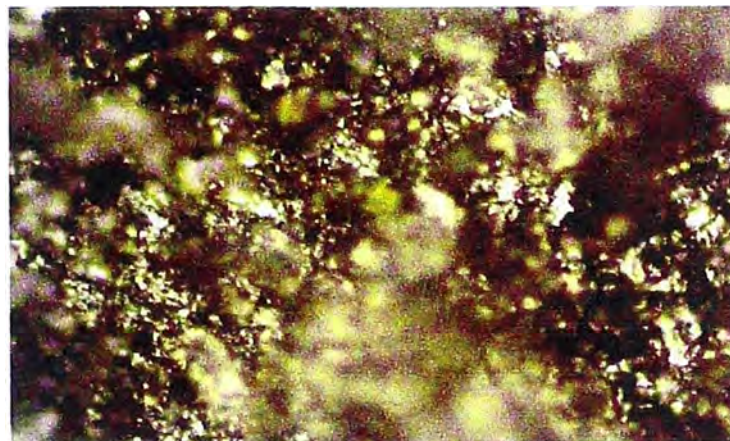
ANEXO 11

FOTOS DE CARBON ACTIVADO



200x - PRESENCIA DE SURCOS

CARBÓN ACTIVADO NUEVO – 200X



200x - POROS LIBRES

**CARBÓN ACTIVADO DESPUES DE
DESORCIÓN – 200X**

ANEXO 12

CUPONES DE MONITOREO DE INCRUSTACIONES



CUPÓN DE INCRUSTACIÓN



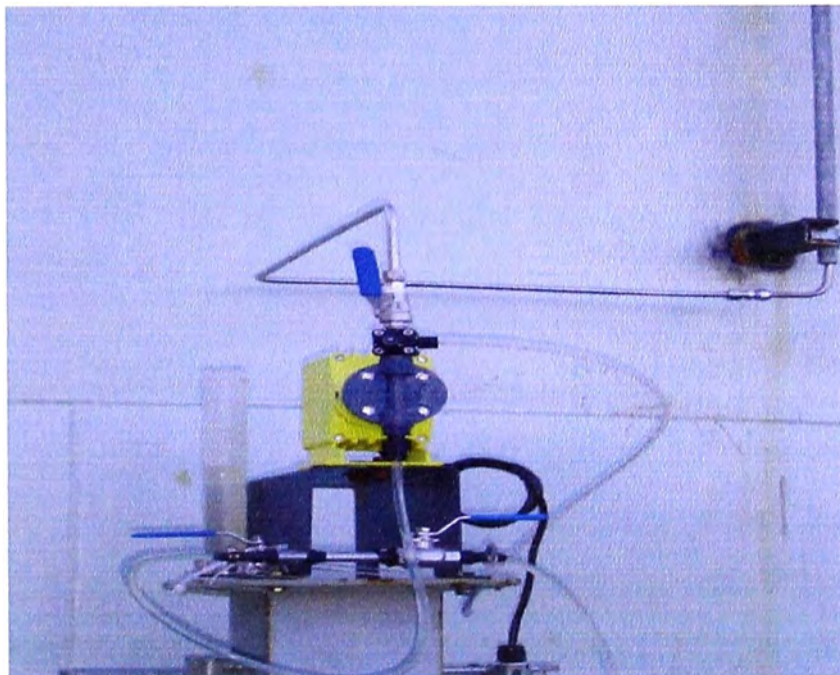
CUPÓN DE INCRUSTACIÓN INSTALADO EN
LINEA DE SOLUCIÓN A ADSORCIÓN

ANEXO 13

SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS



TANQUE DE PRODUCTO QUÍMICO



**BOMBA DOSIFICADORA Y PROBETA
PARA CONTROL DE CONSUMO**