



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

50
zej

IMPRESA DE LA UNAM
DISTRITO FEDERAL

Aplicación de un Tratamiento Avanzado en Aguas Residuales

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

RODRIGO JESUS FIGUEROA RAMIREZ

1988



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E T E M A T I C O

| <u>CAPITULO</u> | | <u>PAG.</u> |
|-----------------|---|-------------|
| I. | INTRODUCCION | 1 |
| I.1 | Justificación del Reúso de Aguas Residuales | 5 |
| II. | PROCESOS APLICABLES EN TRATAMIENTOS AVANZADOS | 10 |
| II.1 | Generalidades de los Procesos Utilizados en el Tratamiento Avanzado | 14 |
| II.2 | Reúsos de las Aguas Residuales Tratadas | 22 |
| III. | DESCRIPCION DE LOS PROCESOS AVANZADOS EN LA PLANTA PILOTO "CERRO DE LA ESTRELLA" DEL D.D.F. | 36 |
| III.1 | Espumación | 48 |
| III.2 | Tratamiento Químico | 71 |
| III.3 | Desgasificación | 107 |
| III.4 | Recarbonatación | 134 |
| III.5 | Filtración | 144 |
| III.6 | Adsorción | 174 |
| III.7 | Ozonación | 195 |
| III.8 | Osmosis Inversa | 210 |
| III.9 | Cloración | 225 |
| IV. | COMENTARIOS Y CONCLUSIONES | 243 |
| | ANEXO A | 246 |

INDICE DE CUADROS

CAPITULO II

| | | <u>PAG.</u> |
|---|--|-------------|
| 1 | Criterios Generales para la Selección de Coagulantes | 16 |
| 2 | Sectores que Utilizan las Aguas Residuales y Algunos Efectos | 23 |
| 3 | Criterios de Calidad de Agua Renovada para Diversos Usos | 257 |

CAPITULO III

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Concentraciones Medias de los Influentes de las Plantas de Tratamiento | 37 |
| 2 | Concentraciones Medias de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento | 39 |
| 3 | Esquema de los Procesos de Tratamiento | 46 |
| 4 | Esquema de Alternativas de Tratamiento | 47 |
| 5 | Resultados de Operación Espumación (A, B, C, D, E) | 54 |
| 6 | Eficiencias Medias de Remoción para las Diferentes Condiciones de Operación con Difusor de Burbuja Gruesa (Tipo Cebolla) | 59 |
| 7 | Resultados de Operación Espumación con Difusor de Burbuja Fina (A, B) | 66 |
| 8 | Eficiencias Medias de Remoción para las Diferentes Condiciones de Operación con Difusor de Burbuja Fina de Piedra Porosa Marca Degremont Pelletier | 68 |

| | <u>PAG.</u> |
|--|-------------|
| 9.1,2,3,4,5 Resumen de Resultados Analíticos de Operación Tratamiento Químico | 94 |
| 10 Resumen de Eficiencias de Remoción en Tratamiento Químico | 102 |
| 11 Resumen de Eficiencias de Remoción en Tratamiento Químico | 103 |
| 12 Parámetros Recomendables en la Desgasificación | 119 |
| 13.1,2,3,4 Resumen Resultados Medios Obtenidos | 123 |
| 14 Resumen de la Remoción en Desgasificación | |
| 15 Resumen de la Remoción en Desgasificación | 132 |
| 16 Resultados de las Pruebas de Recarbonatación | 141 |
| 17 Recomendaciones para Diferentes Tipos de Lechos Filtrantes | 151 |
| 18.A,B Corrida 1 de Filtración Pérdidas de Carga (cm) y Remoción de Turbidez (%) | 156 |
| 19.A,B Corrida 2 de Filtración Pérdidas de Carga (cm) y Remoción de Turbidez (%) para Agua Proveniente de Tratamiento Secundario | 157 |
| 20.A Corrida 3 de Filtración Pérdidas de Carga (cm) y Remoción de Turbidez (%) | 164 |
| 21.A,B,C Corrida 4 de Filtración Pérdidas de Carga (cm) y Remoción de Turbidez (%) | 169 |
| 22 Resumen de Corridas de Filtración | 172 |
| 23.A,B Resultados de las Pruebas de Carbón Activado | 189 |
| 24 Eficiencias de Remoción Promedio de Adsorción en Carbón Activado | 191 |
| 25 Resultados Preliminares de Ozonación con los Efluentes de Filtración y Adsorción | 204 |
| 26 Resultados Analíticos de Ozonación para el Efluente de Filtración | 205 |

| | <u>PAG.</u> |
|---|-------------|
| 27 Resultados Analíticos de Ozonación para el Efluente de Adsorción | 206 |
| 28 Eficiencias Promedio de Ozonación para los Efluentes de Filtración y Adsorción | 207 |
| 29.A,B Parámetros de Operación de Osmosis Inversa | 219 |
| 30 Resumen Eficiencias Medias de Remoción de Osmosis Inversa | 221 |
| 31 Aplicaciones Diversas de la Cloración | 226 |
| 32 Resultados de Operación del Proceso de Desinfección | 224 |
| 33 Resumen Eficiencias Medias de Remoción en Desinfección | 235 |

CAPITULO IV

| | |
|---|-----|
| 1 Estructura de Costos de Agua Potable por Fuentes de Abastecimiento en Pesos de 1987 | 245 |
|---|-----|

I N D I C E D E F I G U R A S

| <u>CAPITULO I</u> | | <u>PAG.</u> |
|-------------------------|--|-------------|
| 1 | Localización de la Planta Piloto | 3 |
| <u>CAPITULO II</u> | | |
| 1 | Esquema de Tratamiento en Aguas Residuales | 12 |
| <u>CAPITULO III</u> | | |
| 1 | Unidad de Espumación | 51 |
| 2 | Diagrama de Pruebas de Espumación | 52 |
| 3 | Unidad de Mezcla Rápida | 82 |
| 4 | Unidad de Floculación | 88 |
| 5 | Unidad de Clarificación | 88 |
| 6 | Diagrama de Pruebas de Tratamiento Químico | 99 |
| 7 | Diagrama de Arbol Alternativas de Operación de Desgasificación | 127 |
| 8 | Unidad de Desgasificación | 121 |
| 9 | Unidad de Recarbonatación | 139 |
| 10 | Diagrama de Pruebas para la Unidad de Recarbonatación | 142 |
| 11 | Diagrama de Pruebas de Filtración | 159 |
| 12 | Unidad de Filtración | 160 |
| 13 | Unidad de Adsorción | 193 |
| 14 | Unidad de Ozonación | 200 |

| | | <u>PAG.</u> |
|----|---|-------------|
| 15 | Unidad de Osmosis Inversa | 215 |
| 16 | Esquema de Tratamiento de Osmosis Inversa | 216 |
| 17 | Unidad de Desinfección | 236 |
| 18 | Diagrama de Pruebas de Desinfección | 237 |

INDICE DE GRAFICAS

| <u>CAPITULO III</u> | <u>PAG.</u> |
|---|-------------|
| 1 Variación de la Remoción de Detergentes para las Diferentes Condiciones de Operación (Burbuja Fina) | 60 |
| 2 Curva de Ajuste con las Ordenadas "Y" Calculada para el Parámetro rh | 63 |
| 3 Eficiencias de Remoción para las Bases de Diseño de Espumación | 64 |
| 4 Variación de la Remoción de Detergentes para Diferentes Condiciones de Operación (Burbuja Gruesa) | 69 |
| 5 Curva de Ajuste con las Ordenadas "Y" Calculada para el Parámetro (rh) | |
| 6 Eficiencias de Remoción de Espumación | |
| 7 Tipo de Sedimentación | 90 |
| 8 a,b,c Comportamiento de las Eficiencias de Remoción a Diferentes pHs. | 100 |
| 9 Eficiencias de Remoción a Diferentes Condiciones de Operación | 104 |
| 10 a,b,c Eficiencias de Remoción a Diferentes Condiciones de Operación | 105 |
| 11 Variación del Comportamiento de la Remoción del Amoniaco para Diferentes Alternativas de Operación | 128 |
| 12 Comparación de Eficiencia Medida y Eficiencia Calculada | 133 |
| 13 Variación de pH con Respecto a la Dosis de CO ₂ | 143 |
| 14 Eficiencias de Remoción de Turbidez. Corrida 1 | 161 |

PAG.

| | | |
|----|--|-----|
| 15 | Pérdidas de Carga de la Corrida 1 | 162 |
| 16 | Eficiencias de Remoción de Turbidez Corrida 2 | 161 |
| 17 | Pérdidas de Carga de la Corrida 2 | 167 |
| 18 | Eficiencias de Remoción de Turbidez Corrida 3 | 166 |
| 19 | Pérdidas de Carga de la Corrida 3 | 167 |
| 20 | Eficiencias de Remoción de Turbidez Corrida 4 | 166 |
| 21 | Pérdidas de Carga de la Corrida 4 | 173 |
| 22 | Eficiencia de Remoción de Adsorción en Carbón Activado | 192 |
| 23 | a,b,c Eficiencias de Remoción en Ozonación | 209 |
| 24 | Remoción de Parámetros en Osmosis Inversa | 222 |
| 25 | Remoción de Parámetros en Osmosis Inversa | 224 |
| 26 | Cloración al Punto de Quiebre | |
| 27 | Remoción de Parámetros Respecto a la Dosis Aplicada de Cloro | 239 |

I. INTRODUCCION

La experiencia práctica en el tratamiento avanzado de aguas residuales en nuestro país es relativamente escasa: por lo que, debido a la importancia que día a día va cobrando este rubro, ha sido necesario realizar investigaciones acordes a las características del agua residual producidas por el sector industrial, comercial, de servicios, domésticos, etc., de la gran urbe de la Ciudad de México. Siendo una preocupación, pues el sobre-explotación acuíferos del Valle de México y los altos costos de importación de agua potable de otras cuencas, confirma la necesidad de tener presente el que las aguas residuales sean un recurso valioso, el cual puede ser reutilizado, previo tratamiento, en diferentes actividades del hombre.

Por estas razones, el Departamento del Distrito Federal (D.D.F.) a través de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (D.G.C.O.H.), construyó en 1984 los Dispositivos Experimentales de Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales (DETAAR), en terrenos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Cerro de la Estrella", localizada en Iztapalapa, D. F. (Figura 1). La planta piloto utiliza el efluente del sedimentador secundario de esta planta, como "Materia Prima" del proceso terciario en cuestión.

El caudal de diseño de la planta piloto de los DETAAR es de 0.5 l/seg., contando con 9 procesos que pueden interconectarse en la secuencia que se desee, dependiendo de la calidad final requerida y las características físico-química-biológicas del agua que se trate, los procesos univariados se listan a continuación:

- Tanque de igualación
- Espumación
- Tratamiento químico
- Desgasificación
- Recarbonatación
- Filtración
- Adsorción
- Ozonación
- Osmosis inversa
- Desinfección

Este trabajo no busca ser simplemente una recopilación bibliográfica exhaustiva, sino más bien un resumen del trabajo realizado en el área de tratamiento avanzado de aguas residuales en el Distrito Federal, en las instalaciones de la D.G.C.O.H. del (D.D.F.), teniendo como finalidad aportar recomendaciones que puedan servir como antecedente a posibles trabajos posteriores.

El desarrollo del presente tema tiene como finalidad el dar un panorama general de la problemática del reúso de las aguas residuales, los requisitos de calidad de los consumidores, el reúso en las diferentes actividades del hombre y los procesos aplicables en el tratamiento avanzado.

El enfoque principal de este trabajo se centra en los criterios de selección de los procesos de tratamiento avanzado, las bases de diseño, la experimentación realizada y los resultados obtenidos para cada uno de los procesos unitarios.

Con los resultados obtenidos en la experimentación se demuestra la factibilidad de reutilizar las aguas en diferentes actividades del hombre liberando así caudales de primer uso quedando por realizar investigaciones más a fondo para detectar los efectos nocivos a largo plazo en caso de ingestión y contacto directo por el hombre. Siendo recomendable utilizar estos resultados como referencia en diferentes puntos del país donde tal vez los recursos económicos sean escasos para llevar a cabo pruebas de tratabilidad de estudios piloto, pues las aguas que genera el D. F., contienen altos contenidos de desechos industriales claro esta que es necesario ajustarse a las condiciones y necesidades de cada agua por tratar.

I.1 Justificación del Reúso de Aguas Residuales

El crecimiento demográfico, urbano e industrial ha creado problemas ecológicos que se deben afrontar y resolver, siendo necesario mantener el control sanitario del medio en que vivimos, ya que las condiciones insalubres pueden producir enfermedades y en algunos casos mortandad. Hoy en día, la Ingeniería Sanitaria y Ambiental interrelacionadas con disciplinas afines disponen de técnicas para sanear cualquier tipo de ambiente que afecte al hombre; cabe mencionar que el mejoramiento del ambiente requiere frecuentes innovaciones técnicas, programas de control, comprensión y apoyo de la comunidad.

Así podemos describir a la contaminación como la alteración desfavorable del medio que nos rodea ocasionando problemas que tienden a gobernar la dinámica de la salud, la economía y los caracteres sociales del ser humano; los desperdicios o residuos líquidos como el agua de desecho producto de la vida urbana, agrícola, industrial, doméstica, etc., que no son tratadas y dispuestas, ocasionan alteraciones físico-químico-biológicas en los cuerpos receptores, que a su vez deterioran los recursos materiales y naturales del ambiente, siendo necesario llevar a cabo estudios demográficos y urbanos para estimar en forma cualitativa y cuantitativa los problemas que puedan derivarse al incrementarse las concentraciones de contaminantes en las aguas residuales de desecho.

Para el estudio y control de la contaminación ambiental y en especial de las aguas residuales se requiere de una acción conjunta entre todas las instituciones oficiales a los diferentes niveles requeridos teniendo que planear actividades, programas, capacitación de personal, búsqueda de métodos para financiar, diseñar y operar los medios de depuración de las aguas residuales; también se deben establecer normas sobre las concentraciones de los parámetros de las aguas de desecho, para lo cual se debe disponer de información técnica adecuada que nos permita definir límites de calidad, integrar estudios para relacionar los efectos en el medio ambiente y el hombre, además para determinar medidas preventivas y de control.

Los pasos acelerados para lograr un desarrollo estimula el crecimiento de las ciudades e industrias. Así, la ubicación de la industria no sólo es importante para satisfacer las necesidades sanitarias, sino que requiere de una correcta disposición de los desechos gaseosos, líquidos y sólidos. Estos excedentes significan la adición de nuevos elementos al medio ambiente, alterando su composición; también la urbanización crea condiciones ambientales que tienden a degradar la calidad del medio, ya que se vierten residuos líquidos y sólidos en exceso.

El uso de las aguas potables produce un grave deterioro de este recurso natural creando situaciones inadecuadas para que el hombre las reutilice en la satisfacción de sus necesidades domésticas, agrícolas e industriales, generando efectos nocivos tales como:

Perturbación del medio acuático que ocasiona la proliferación de algunas especies y proliferación de otras, desarrollando organismos que puedan adaptarse al desequilibrio, al mismo tiempo aquellas que no soporten las nuevas condiciones ecológicas tienden a reducirse o desaparecer.

Por otro lado las aguas de primer uso se están convirtiendo en un elemento escaso, aunque con previo tratamiento las aguas de ríos y otros cuerpos que ya presentan contaminación se pueden utilizar en consumo humano, corriéndose el riesgo de contraer enfermedades, por lo que debe protegerse este recurso natural valioso, capaz de proveer aguas limpias para diversos usos que requieran calidad similar a la potable. Para la aplicación de procedimientos de tratabilidad a las aguas de desecho, es necesario conocer las características físico-químico-biológicas y la disposición final en usos de riego, industria, consumo humano, etc., ya que esto se refleja en los principales parámetros que se utilizan en la ingeniería sanitaria para indicar la calidad de las aguas desde el punto de vista de su polución o tratabilidad, de la generación de altos volúmenes de aguas de desecho o de la variación de las calidades dependiendo del origen, ya sea doméstico o industrial; así, los métodos de tratamiento deben ser acordes a los costos de construcción y operación del proceso.

El difícil suministro de agua potable a la población por causa del crecimiento demográfico, la carencia de ésta en el Valle de México, los altos costos de importación de otras cuencas, así como la inconveniencia de seguir explotando los acuíferos y debido a la necesidad de dar un aprovechamiento a las aguas residuales mediante un tratamiento adecuado, se construyeron

plantas de tratamiento a nivel secundario cuya capacidad instalada asciende a $4.3 \text{ m}^3/\text{seg.}$

Actualmente, debido a la necesidad de cuidar el consumo de agua potable en actividades que no requieran de esta calidad (comercios, servicios, industrias), el DDF a través de la DGCOH estructuró el **Plan Maestro de Tratamiento y Reúso** para programar las acciones necesarias para hacer de las aguas residuales una fuente complementaria de suministro para la población. El Plan Maestro de Tratamiento y Reúso del DDF (ref. 1), plantea cuatro etapas, destacando:

- 1) Generar requisitos de la calidad de las aguas que demanden tanto los usuarios como los diferentes usos, para poder detectar el grado de utilización de las aguas renovadas tomando en cuenta el potencial de aprovechamiento.
- 2) El pronóstico de la demanda de agua potable hacia el año 2000 plantea la diversificación de las aguas residuales para los siguientes usos: Servicios públicos, riego de áreas verdes, llenado de lagos recreativos, uso agrícola, comercios, servicios, recarga de acuíferos y a futuro para consumo humano.
- 3) Estructuración de metas y objetivos considerando el presupuesto necesario y disponible.

- 4) Estructuración de programas y acciones para ejercer un mejor control de las actividades a desarrollar.

Una de las políticas del DDF en el reúso de las aguas renovadas es el extender éstos de los tradicionales, siendo necesario elevar el nivel de calidad, por lo que se debe mejorar la tratabilidad de las aguas con respecto a las plantas de tratamiento a nivel secundario, teniendo que implementar tecnología avanzada considerando los cambios en las características de las aguas residuales, las restricciones de carácter sanitario y ambiental debido a que el hombre tiene contacto directo con ellas; por lo que se debe hacer atractivo el uso de las aguas renovadas requiriéndose determinar los usuarios potenciales, tanto en calidad como en cantidad. La DGGCOH en los últimos años ha realizado estudios para estimar los usos del agua potable por la población con la finalidad de ir sustituyendo ésta por aguas renovadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CAPITULO I

- 1 DDF/DGCOH Plan Maestro de Tratamiento y Reúso
México 1982

II. PROCESOS APLICABLES EN TRATAMIENTOS AVANZADOS

El Distrito Federal presenta problemas entre la disponibilidad y la demanda del agua. En la actualidad el crecimiento acelerado ha implicado la reutilización de las aguas residuales como una fuente de abastecimiento a diferentes niveles: Uso industrial, recreativo, piscícola, agrícola, recarga de acuíferos y en los últimos años para uso municipal. Es así como el reúso depende del sector que la demande, del volumen requerido y de la calidad adecuada para evitar riesgos a la salud del hombre y del medio ambiente; así también el reúso depende de los costos de operación, del tipo de agua a tratar y de la calidad deseada.

Dentro de los procesos de tratamiento se tiene un sinnúmero de ellos, cuya aplicación dependerá de las características físico-químico-biológicas de las aguas residuales; por ejemplo las aguas de desecho municipal no tienen complicaciones en su tratamiento, pues su composición se considera como 100% de origen doméstico y de comercios, por lo que para su tratamiento se utilizan procesos preliminares como rejillas, desarenadores, separadores de grasas y aceites y procesos primarios como la sedimentación primaria para remover sólidos sedimentables; tratamiento biológico para degradar materia orgánica disuelta o en suspensión mediante lodos activados, filtros rociadores, lagunas de estabilización, etc., y sedimentación secundaria para la remoción de sólidos sedimentables en suspensión, así como digestión de lodos para su disposición final, ya sea como relleno sanitario o como mejorador de suelos.

Por otro lado, las aguas de desecho industrial además de utilizar algunos de los procesos mencionados anteriormente, es necesario emplear tratamientos avanzados y otros como son homogenización, neutralización, etc., en la figura 1 se muestra un diagrama de los procesos empleados en el tratamiento de aguas residuales (Ref. 1), para obtener diferentes grados de remoción de contaminantes.

Así, para una serie de procesos, cada componente del sistema proporciona una eficiencia en la remoción de contaminantes medidos a través de parámetros de calidad del agua, los cuales se aplican para el diseño del sistema generando las alternativas de tratamiento para la disposición final de las aguas residuales tratadas y que pueden ser:

Descarga a cuerpos receptores: ríos, estuarios, lagos, embalses,
lagunas.

Disposición en el suelo: recarga de acuíferos, infiltración,
usos: industriales, municipales y a largo plazo
consumo humano.

El propósito del tratamiento avanzado es remover los contaminantes que permanecen en el agua después de que ésta ha recibido un tratamiento a nivel secundario, ya que el efluente de éste se utiliza para riego de parques, jardines y usos industriales como enfriamiento y producción de vapor; también se pretende evitar la recirculación de contaminantes como metales pesados,

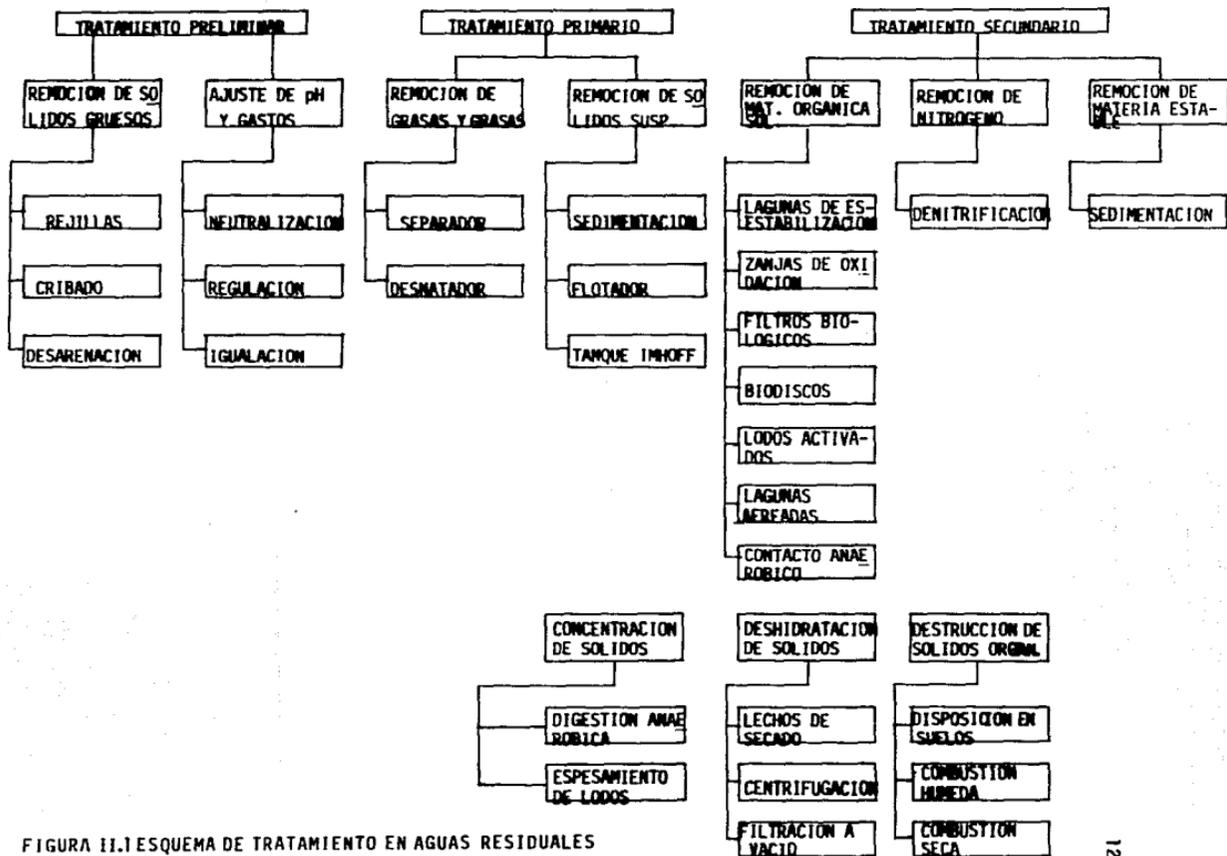


FIGURA 11.1 ESQUEMA DE TRATAMIENTO EN AGUAS RESIDUALES

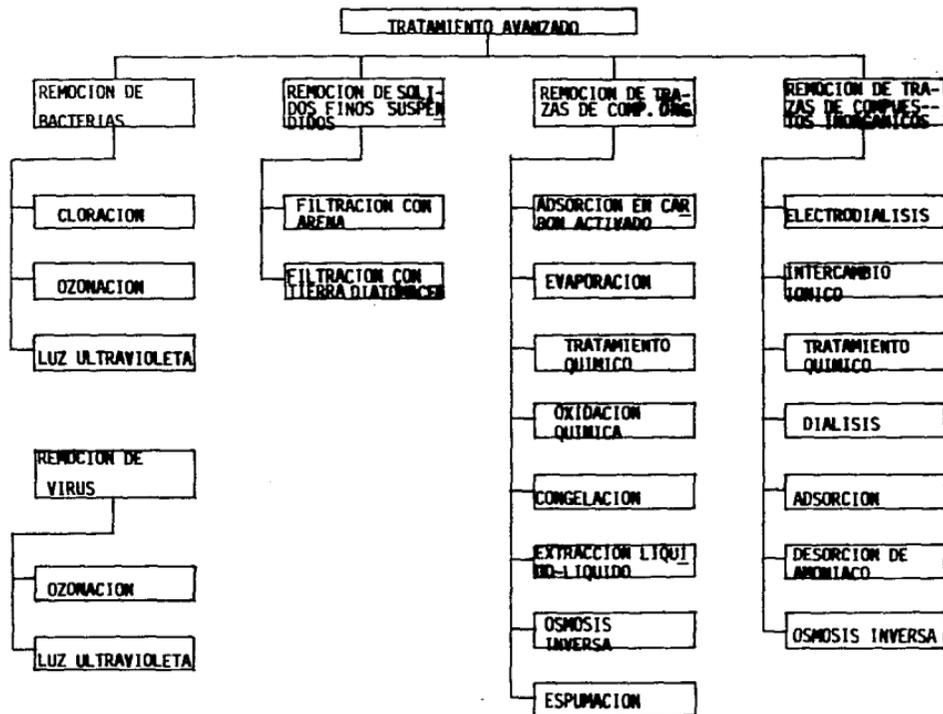


FIGURA 11.1 (CONT.) ESQUEMA DE TRATAMIENTO EN AGUAS RESIDUALES
 REF. 1 W.M ECKENFELDER INDUSTRIAL WATER POLUTION CONTROL.

compuestos orgánicos y organismos patógenos .

A continuación se presenta una lista de los contaminantes que permanecen en el agua después de recibir un tratamiento secundario (Ref. 2):

Detergentes

Nutrientes (nitrógeno-fósforo)

Compuestos que causan color, olor y turbidez

Compuestos orgánicos que demandan oxígeno

Metales pesados (fierro, plomo, manganeso)

Compuestos orgánicos dañinos a la salud

Organismos patógenos (virus, bacterias y protozoarios)

Sales inorgánicas disueltas

II.1 Generalidades de los Procesos Utilizados en el Tratamiento Avanzado.

Remoción de Detergentes

La remoción de detergentes duros se lleva a cabo mediante el proceso de espumación con aire comprimido, aunque existe la alternativa de utilizar unidades biológicas de nitrificación-desnitrificación.

Remoción de Fósforo

El fósforo se remueve parcialmente por medio del tratamiento biológico debido a que este elemento se incorpora al tejido de los microorganismos,

La remoción se lleva a cabo en el tratamiento biológico-químico, en el cual se agregan sales de fierro o aluminio en el reactor, reduciéndose también los parámetros: color, turbidez y sólidos suspendidos.

Se tiene además la remoción físico-química: en este proceso la remoción del fósforo se lleva a cabo adicionando agentes químicos coagulantes como la cal química, el sulfato de aluminio o sales de fierro, que además mejora el aspecto estético del agua, reduce la materia orgánica, los sólidos suspendidos, algunos organismos patógenos y precipita metales como el fierro, calcio, magnesio, manganeso, etc., es por esto que este último proceso se considera óptimo, el cual consta de coagulación, precipitación, y filtración rápida, como complemento para incrementar la calidad del agua; en el cuadro 1, se muestran los criterios generales para seleccionar los coagulantes a emplear.

Remoción de Nitrógeno

Proceso Biológico: Se efectúa con biomasa adherida y biomasa suspendida, en el cual se oxidan los compuestos nitrogenados presentes en el agua residual a nitratos en medios aeróbicos; posteriormente se reducen los nitratos a nitrógeno (gas) en medios anaeróbicos. Por lo que al oxidar se le conoce como nitrificación y al reducir se le conoce como desnitrificación. Este proceso se tiene actualmente en México en las plantas de tratamiento a nivel secundario, favoreciéndose el proceso a altas temperaturas.

| COAGULANTE | DOSE MG/L | T. H. | OBSERVACIONES |
|---|--------------|------------|--|
| CAL | 150-500 | 9.00-11.00 | REACCION DE FOSFORO Y COLOIDES : AGUAS CON BAJA ALCALINIDAD, CON CON FOSFATOS VARIABLES |
| ALUMBRE | 75-250 | 4.50-7.00 | REACCION DE FOSFORO Y COLOIDES AGUAS CON ALTA ALCALINIDAD, CON FOSFORO BAJO Y CONSTANTE |
| SALES DE FIERRO | 25-150 | 4.00-7.00 | REMOCION DE FOSFORO Y COLOIDES AGUAS CON ALTA ALCALINIDAD, CON FOSFORO BAJO Y CONSTANTE. DISPO- NIBILIDAD DE SALES DE FIERRO A BAJO COSTO. DESCURRIMIENTO PERMISIBLE DE FIE- RRO EN EL EFUMENTE. |
| POLIMEROS CATIONICOS | 2-5 | SIN CAMBIO | REMOCION DE COLOIDES, AYUDA DE COAGULA- CION |
| POLIMEROS ANIONICOS | 0.25-1.0 | SIN CAMBIO | AYUDA DE FLOCULACION AYUDA DE FILTRACION |
| ARCILLAS Y ALGUNAS OTRAS ARCILLAS | 3-20 | SIN CAMBIO | AYUDA EN EL CASO DE SUSPENSIONES COLOIDALES MUY FINAS |
| <p>CRITERIOS DE SELECCION DE LOS CUATRO NO. 11.1 COAGULANTE QUIMICO QUE SE UTILIZAN ACTUALMENTE EN TRATAMIENTO QUIMICO. REFERENCIA 1.</p> | | | |

Cloración al Punto de Quiebre: consiste en agregar una dosis de cloro, tal que los compuestos nitrogenados se oxiden hasta formar nitrógeno (gas), teniendo la ventaja de oxidar materia orgánica y de desinfectar el agua. Este proceso tiene la desventaja de tener un alto costo, ya que se requieren dosis elevadas de cloro y se generan compuestos orgánicos tóxicos (Trihalometanos).

Intercambio Iónico: El nitrógeno se remueve con la resina natural de intercambio (Clinoptilolita). La regeneración se realiza con salmuera (concentrado). De dicha salmuera se puede extraer el amoníaco con ácido sulfúrico, produciendo sulfato de amonio que se puede utilizar como fertilizante.

Desorción de Amoníaco: Consiste en utilizar un agente químico (cal) para elevar el pH. El nitrógeno amoniacal presente en el agua se reduce a amoníaco (gas) disipándolo a la atmósfera. La remoción del amoníaco está en función de la concentración inicial del mismo, de la temperatura y del pH. Posteriormente se tendrá que estabilizar a condiciones de pH neutro, para lo cual se debe agregar dióxido de carbono (CO_2); a esta operación se le conoce como recarbonatación del agua, la cual es costosa y eleva el contenido de sólidos suspendidos en el agua.

Remoción de Sólidos Suspendidos

Coagulación Química: Es adecuado para la remoción de sólidos, fósforo, color y turbidez. Este proceso presenta altos costos por el manejo de los lodos producidos; algunas de las características de este proceso se mencionaron anteriormente en la remoción físico-química del fósforo.

Filtración: Es efectivo para la remoción de sólidos y turbidez, consiste en pasar un flujo a través de un lecho poroso ya sea simple (arena) o dual (arena-antracita) siendo más eficiente este último, además es uno de los procesos más económicos.

Microtamices: Es un medio mecánico de filtración que no ha dado resultados comparables con la filtración de arena por la baja eficiencia obtenida.

Remoción de Compuestos Orgánicos

Ozonación: Tiene como finalidad oxidar compuestos orgánicos y metales, eliminación de olor y sabor e inactivación viral. Este proceso se utiliza como un paso final en el tratamiento de aguas, ya que se emplea ozono siendo un oxidante poderoso que no produce compuestos tóxicos a diferencia del cloro. El ozono oxida los compuestos orgánicos disueltos, facilitando su precipitación. Este proceso es más efectivo después de una filtración para remover las partículas solubilizadas oxidadas que posteriormente se filtrarán

también, por medio de carbón activado.

Remoción de Materia Orgánica Soluble

El sistema que ha demostrado ser eficiente en la tratabilidad de las aguas es la adsorción en carbón activado granular (CAG). Este se ha enfocado a remover compuestos orgánicos complejos, nutrientes como el fósforo y nitrógeno, algunos metales no solubles y parámetros físicos como color, turbiedad y sólidos suspendidos.

Existe también el carbón activado biológicamente, en el cual la biomasa permanece adherida a un medio fijo, pues la superficie irregular del carbón activado permite la fijación de organismos y la adsorción de oxígeno molecular, incrementándose la transferencia de masa a través de la película biológica y propiciándose el crecimiento de los microorganismos, los cuales van a degradar la materia orgánica, es decir, las transformaciones biológicas de los sustratos son aeróbicas o anaeróbicas dependiendo de la penetración de oxígeno y del espesor de la película adherida.

Remoción de Sales Disueltas, Sólidos Disueltos y Compuestos

Orgánicos en solución:

El contenido de sales disueltas en las aguas residuales limita las condiciones para ciertos reusos, por lo que es necesario su remoción; entre los métodos con que se cuenta se tienen:

Electrodialisis: Es un proceso electroquímico, el cual se lleva a cabo a partir de aguas salobres, mediante el rechazo de los iones a través de membranas bajo la influencia de una corriente eléctrica. En dicho proceso se remueven contaminantes orgánicos y a medida que se reduce la contaminación de iones el consumo de energía se incrementa. Este proceso requiere de pequeñas cantidades de productos químicos (generalmente ácido clorhídrico o ácido sulfúrico).

Intercambio Iónico: Principalmente se utiliza en el tratamiento de aguas de calderas y de procesos. El proceso se lleva a cabo mediante dos resinas una para aniones y otra para cationes y en algunos casos se utilizan lechos mezclados. Este proceso es costoso, por lo que se ha dejado de aplicar.

Destilación: Su utilidad se enfoca en la desalación de agua de mar. Dentro de los métodos se tiene la evaporación instantánea de múltiples etapas, y la evaporación por compresión al vapor, sin embargo en las aguas residuales se tiene la desventaja de que los compuestos orgánicos se arrastran y aparecen en el efluente.

Osmosis Inversa: Tiene la ventaja de remover tanto nitrocompuestos alifáticos, aromáticos, así como fenoles y compuestos que no se remueven con ozono o carbón activado. Este proceso se lleva a cabo cuando dos soluciones de diferente concentración de soluto se separan por una membrana semipermeable previa presurización, para así obtener una solución diluida. La aplicación de ósmosis inversa representa costos elevados por el alto consumo de energía

eléctrica, equipo especial de operación, mantenimiento y la poca durabilidad de las membranas si no está el proceso debidamente controlado.

Remoción de Organismos Patógenos

La presencia de organismos patógenos representa peligro para la salud del hombre, siendo necesaria su remoción; los métodos comunmente usados son los siguientes:

Dióxido de Cloro: En las industrias se le usa como oxidante, siendo peligroso su manejo por ser corrosivo, su preparación se hace en el sitio de aplicación a base de cloro gaseoso y clorito de sodio.

Luz Ultravioleta: Al pasar rayos de luz ultravioleta en capas delgadas de agua con características claras se lleva a cabo la eliminación de organismos patógenos y virus.

Ozonación: Este proceso como se mencionó anteriormente se utiliza generalmente como un paso final en el tratamiento de aguas, ya que es bastante efectivo como bactericida además de remover virus.

Cloración: Es uno de los métodos más usados en México para la destrucción de organismos patógenos; la desinfección con cloro tiene el inconveniente de formar compuestos cancerígenos, ya que reacciona con compuestos como el nitrógeno y la materia orgánica, produciendo entre otras sustancias los

llamados trihalometanos.

II.2 Reúso de las Aguas Residuales Tratadas

La alta demanda, la carencia y la sobre-explotación de los acuíferos para proveer de agua potable a la población, ha traído como consecuencia el reutilizar las aguas residuales tratadas para usos que no requieren de calidad similar a la potable por lo que se han tenido que desarrollar nuevas tecnologías de tratamiento, análisis de costos de tratamiento y análisis de los valores que sancionen los parámetros; permitiendo así el determinar su reúso en diferentes actividades que las demanden. En el cuadro No. 2 se enlistan algunos sectores que utilizan las aguas residuales así como algunos efectos.

Reúso del Agua en la Agricultura

La explosión demográfica ha ocasionado que se incremente la demanda de alimentos, en tanto la producción agrícola ha disminuído al reducirse las zonas de cultivo, teniendo que abrir nuevas zonas donde la disponibilidad del agua es escasa. Como opción a dichos problemas se tiene el utilizar aguas tratadas en zonas de temporal, teniendo como consecuencia alteraciones del medio ambiente y en la salud del hombre, siendo necesario definir normas y criterios para garantizar su aprovechamiento y reúso en diferentes cultivos.

| APLICACION | E F E C T O S | | E F E C T O S | |
|------------|--|--|---|--|
| | POSITIVOS | NEGATIVOS | NEGATIVOS | POSITIVOS |
| MUNICIPAL | <ul style="list-style-type: none"> Riego de parques y jardines Riego de prados mediante sistemas de distribución separados Fuente potencial para suministro de agua a nivel municipal | <ul style="list-style-type: none"> Recarga de acuíferos para reducir la sobreexplotación | <ul style="list-style-type: none"> Altas inversiones en dispositivos de tratamiento Rechazo por parte de la población | <ul style="list-style-type: none"> Optimización del recurso Aprovechamiento de los volúmenes de aguas residuales generadas Disminución de los volúmenes de descarga |
| INDUSTRIAL | <ul style="list-style-type: none"> Agua para enfriamiento Agua para alimentación de calderas Agua de proceso Agua para servicios | <ul style="list-style-type: none"> Reducción del agua subterránea de abastecimiento para industrias | <ul style="list-style-type: none"> Incremento en los costos de instalación y de operación de sistemas de tratamiento Posibles daños al equipo | <ul style="list-style-type: none"> Disminución en el consumo de agua potable Control de descargas Decremento en el costo del agua de suministro |
| AGRICOLA | <ul style="list-style-type: none"> Irrigación de ciertas tierras, cultivos, huertos, pastizales y bosques; filtración en suelos | <ul style="list-style-type: none"> Reducción de agua subterránea de abastecimiento para la agricultura | <ul style="list-style-type: none"> Disminución en el rendimiento de las cosechas en ciertos cultivos Aumento en la concentración de sales minerales y de metales tóxicos Cambios fisiológicos en plantas | <ul style="list-style-type: none"> Incorporación de nutrientes al suelo y plantas con grandes requerimientos de éstos Apertura de nuevas zonas de cultivo Reducción del uso de agua de primer uso |
| RECREATIVO | <ul style="list-style-type: none"> Formación de lagos artificiales para navegación de pequeñas embarcaciones, natación, etc. Agua de alimentación a albercas | <ul style="list-style-type: none"> Desarrollo de pesca y de aves acuáticas | <ul style="list-style-type: none"> Disminución en la diversidad de especies Habitat ideal para la proliferación de malezas acuáticas | <ul style="list-style-type: none"> Aumento en las zonas de recreo Apertura de zonas turísticas Nuevas fuentes de ingreso |
| PISCICOLAS | <ul style="list-style-type: none"> Establecimiento de nuevas estaciones piscícolas Incremento en el nivel freático de zonas potencialmente piscícolas | <ul style="list-style-type: none"> Proliferación de otras especies acuáticas Aumento de especies de consumo por el pez | <ul style="list-style-type: none"> Acumulación de sustancias tóxicas en ciertos casos Proliferación de insectos Mal sabor al pescado | <ul style="list-style-type: none"> Fuentes de alimentos Fuentes de trabajo Conservación de los recursos |
| OTROS | <ul style="list-style-type: none"> Recarga de acuíferos para el control de la intrusión salina y control de sales en el agua subterránea Agente compactante de desechos sólidos | <ul style="list-style-type: none"> Recarga de acuíferos para el control de los problemas de hundimiento del suelo Compactación del suelo | <ul style="list-style-type: none"> Posible cambio en la calidad del agua del acuífero Posible proliferación de insectos y roedores | <ul style="list-style-type: none"> Aumento substancial en los niveles freáticos Reducción en hundimientos Incremento en la explotación del recurso |

CUADRO II.2 SECTORES QUE UTILIZAN LAS AGUAS TRATADAS Y EFECTOS

Al utilizar las aguas residuales se estiman altos contenidos de contaminantes: Sales disueltas; metales pesados como fierro, manganeso, etc, así como nutrientes y organismos patógenos. Para evitar el deterioro de los suelos del medio en general, la afección agrícola y de los consumidores, se establecieron las concentraciones permisibles de los parámetros de las aguas residuales para riego (cuadro 3), de entre los cuales algunos compuestos tóxicos están en función de la estructura química y la estabilidad, pues algunos pueden biodegradarse, pero otros pueden en un momento dado adsorberse en los componentes del suelo e incorporarse al vegetal; el efecto de algunas sales contenidas en el agua depende de la lámina de riego y de la susceptibilidad del cultivo; los organismos patógenos son de cuidado pues afectan al hombre directamente por contacto y por ingestión de los vegetales.

Dentro del riego agrícola se pueden encontrar subgrupos para un mejor control como por ejemplo: Riego de forrajes, riego de cultivos industriales y riego de cultivos para consumo crudo, etc.

Por último cabe mencionar que ejercer un buen control en las aguas residuales para riego tiene como ventaja liberar caudales de primer uso, fomentar el desarrollo pecuario e incrementar el área de riego y control con un sistema de disposición de aguas residuales a bajo costo.

CUADRO II-3

CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA RENOVADA PARA DIVERSOS USOS

USOS DEL AGUA

| PARAMETRO Y/O CONTAMINANTE | POTABLE | NATACION | ACUICULTURA Y PESCA | ABREVADEROS | RINCO DE CUL- TIVOS PARA COMERCIALIZADO | RINCO DE RIQU- NAS Y VIÑAS | RINCO DE FUER- ZAS Y AREAS VERDES | LLERADO DE LA- GOS DE RIQUENO | NAVIGACION DEPORTIVA | AGUA MUNICIP- AL NO POTABLE | PRODUCCION DE VAPOR | REFRIGERACION |
|--|---------|----------|------------------------|-------------|---|-------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------|
| PISICOS | | | | | | | | | | | | |
| pH | 7 | 7 | 7.5 | 7 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 7.7 | 7.75 | 7.5 | 7.5 | 7.5 |
| Color | 5 | 15 | 15 | 15 | 60 | 60 | 60 | 37.5 | 15 | 60 | 41 | 60 |
| Turbidez | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 15 | 15 | 10 | 5 | 10 |
| MINERALES | | | | | | | | | | | | |
| Alcalinidad total (CaCO ₃) | 300 | 500 | 500 | 720 | 500 | 500 | 500 | 500 | 650 | 300 | 250 | 300 |
| Alcalinidad | 10 | 10 | 50 | 10 | 10 | 10 | 10 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Carbonatos | 300 | 500 | 450 | 720 | 500 | 500 | 500 | 500 | 650 | 300 | 250 | 300 |
| Bicarbonatos (CaCO ₃) | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 10 |
| Conductividad electrica | 1500 | 1500 | 500 | 500 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 | 5000 | 1500 | 5000 |
| Cloruros | 250 | 250 | 500 | 500 | 500 | 750 | 500 | 1000 | 1000 | 500 | 500 | 500 |
| Boro | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | MS | MS | MS |
| SOLIDOS | | | | | | | | | | | | |
| Sólidos totales | 300 | 1500 | 600 | 3000 | 1000 | 1500 | 1500 | 2000 | 2000 | 1000 | 500 | 1000 |
| Sólidos totales fijos | 400 | 1400 | 550 | 2000 | 900 | 1000 | 1000 | 1000 | 1500 | 900 | 400 | 500 |
| Sólidos totales volat. | 50 | 100 | 50 | 100 | 100 | 500 | 500 | 200 | 500 | 200 | 100 | 500 |
| Sólidos disueltos T. | 500 | 1500 | 500 | 1900 | 900 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 900 | 500 | 900 |
| Sólidos disueltos fijos | 450 | 1000 | 450 | 2320 | 820 | 900 | 900 | 500 | 800 | 720 | 400 | 400 |
| Sólidos disueltos volat. | 50 | 100 | 50 | 100 | 80 | 100 | 100 | 485 | 485 | 200 | 100 | 500 |
| Sólidos suspendidos T. | 10 | 10 | 100 | 100 | 100 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 100 | 10 | 100 |
| Sólidos suspendidos f. | 10 | 10 | 100 | 100 | 100 | 200 | 500 | 500 | 700 | 80 | 10 | 100 |
| Sólidos suspendidos V. | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 15 | 15 | 15 | 15 | 0 | 10 | 100 |
| Sólidos sedimentables | 0.1 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| R.A.S. | | | | | | | | | | | | |
| R.A.S. Soluble | MS | MS | MS | MS | MS | MS | 2.48946 | MS | MS | MS | 1.743563 | 48712 |
| R.A.S. Total | MS | MS | MS | MS | MS | MS | 2.48946 | MS | MS | MS | 1.743563 | 48712 |
| NUTRIENTES | | | | | | | | | | | | |
| Nitrógeno amoniacal | 0.5 | 2.5 | 1 | 2 | 2.5 | 5 | 5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2 | 5 |
| Nitrógeno total | 10.0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Nitratos | 25.0 | 25 | 50 | 25 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 100 | 25 | 25 |
| Fósforo total | 50.0 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |

CUADRO II.3 CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA RENOVADA PARA DIVERSOS USOS

U S O S D E L A G U A

| PARAMETRO Y/O CONTAMINANTE | POTABLE | NATACION | ACUACULTURA Y PESCA | ABREVADEROS | RIEGO DE CULTIVOS PARA COMEN- SAR EN CIUDADES | RIEGO DE HUERTAS Y VINAS | RIEGO DE PU- ERBOS AGRAS VER- DES | LLENADO DE LAGOS DE RECREO | NAVEGACION | DEPORTIVA | AGUA HUMIFI- CADA NO POTA- BLE | PRODUCCION DE VAPOR | ENFRIAMIE- NTO |
|--|---------|----------|---------------------------|-------------|---|--------------------------------|--|----------------------------------|------------|-----------|--------------------------------------|------------------------|-------------------|
| MATERIALES ALCALINOS Y ALCALINOTERREOS SOLUBLES | | | | | | | | | | | | | |
| Calcio soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | 30 | 30 | |
| Magnesio soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | 100 | NS | NS | NS | 100 | 100 | |
| Sodio soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | 50 | 100 | |
| Potasio soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | 150 | NS | NS | NS | 100 | 100 | |
| METALES ALCALINOS ALCALINOTERREOS TOTALES | | | | | | | | | | | | | |
| Calcio total | 30.0 | 100 | 100 | 100 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 30 | 30 | |
| Magnesio total | 100.0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | |
| Sodio total | 100.0 | 100 | 100 | 200 | 100 | 100 | 100 | 250 | 250 | 250 | 50 | 100 | |
| Potasio total | 100.0 | 100 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | |

(*) Simbología NS- No sancionado. Todos los valores están expresados en mg/l excepto pH (unidades): color (Unidad Pt-Co); turbidez (unidades nefelométricas); conductividad eléctrica umhos/cm; coliformes fecales y totales (millones de colonias/100 ml).

CUADRO III.3

CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA RENOVADA PARA DIVERSOS USOS
USOS DEL AGUA

| PARAMETRO Y/O CONDICIONANTE | TURBIDEZ | INDUCCION | AGRICULTURA Y PESCA | ABASTECIMIENTO | REGADIA |
|---|----------|-----------|---------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| MEZCLAS PESADAS SOLUBLES | | | | | | | | | | | | | |
| Hierro soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Manganeso soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Plomo soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Cadmio soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Mercurio soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Arsénico soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Cromo soluble | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| MEZCLAS PESADAS TOTALES | | | | | | | | | | | | | |
| Hierro total | 0.05 | .05 | .1 | .1 | .3 | .3 | .3 | .3 | .3 | .3 | .3 | .07 | .1 |
| Manganeso total | 0.05 | .05 | .1 | .1 | .05 | .05 | .05 | .1 | .1 | .1 | .1 | .1 | .5 |
| Plomo total | 0.05 | .1 | .1 | .15 | .5 | .5 | .5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | .05 | .1 |
| Cadmio total | 0.01 | .01 | .011 | .01 | .1 | .1 | .1 | .1 | .1 | .1 | .1 | .01 | .1 |
| Mercurio total | 1.42E-4 | 1.42E-04 | 1.42E-04 | 1.42E-04 | 1.42E-04 | 1.42E-04 | 1.42E-04 | 1.52E-03 | 1.52E-03 | 1.52E-03 | 8.23E-04 | 1.42E-04 | 1.52E-03 |
| Arsénico total | 2.2E-5 | 1.75E-04 | 1.75E-04 | .05 | .05 | .1 | .1 | .1 | .1 | .1 | .1 | 2.2E-05 | .1 |
| Cromo total | 0.05 | .05 | .05 | .1 | .05 | .1 | .1 | .1 | .1 | .1 | .05 | .05 | .05 |
| BIOLOGICOS | | | | | | | | | | | | | |
| Coliformos fecales | 2 E.06 | 10E.06 | 1000E.06 | 100E.06 | 10E.06 | 20E.06 | 1600E.06 | 10E.06 | 50E.06 | 20E.06 | 10E.06 | 50E.06 | 50E.06 |
| Coliformos totales | 50E.06 | 100E.06 | 16000E.06 | 1000E.06 | 200E.06 | 200E.06 | 3000E.06 | 1600E.06 | 10E.06 | 5E.06 | 2E.06 | 10E.06 | 10E.06 |
| QUIMICA ORGANICA | | | | | | | | | | | | | |
| BOD Soluble | 2.5 | 2.5 | 3 | 3 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 2.5 | 20 | 20 |
| DQD Soluble | 4.0 | 4 | 10 | 10 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 20 | 10 | 50 | 50 |
| Carbono orgánico total fijo | 2.0 | 2 | 2 | 2 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 1 | 20 | 20 |
| GRASAS Y ACEITES | | | | | | | | | | | | | |
| Grasas y aceites | 1.0 | 1 | 10 | 100 | 50 | 50 | 50 | 10 | 10 | 20 | 1 | 20 | 20 |
| SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO | | | | | | | | | | | | | |
| S.A.A.M. | 0.5 | 1 | .5 | .5 | .5 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | .5 | 5 | 5 |

(*) Simbología: NS - No mencionado. Todos los valores están expresados en mg/l excepto pH (Unidades); color (Unidades Pt-Co); turbidez (unidades nefelométricas); conductividad eléctrica (µmhos/cm); coliformos fecales y totales (millones de colonias/100 ml).

CUADRO II - 3
CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA RENOVADA PARA DIVERSOS USOS
USOS DEL AGUA

28

| PARAMETRO Y/O CONTAMINANTE | POTABLE | NATACION | ACUICULTURA Y PESCA | ABREVADEROS | RIEGO DE CULTIVOS PARA CONSUMO SIN CRUDOS | RIEGO DE HUERTAS Y VIÑAS | RIEGO DE FORRAJES Y AREAS VERDES | NAVEGACION DEPORTIVA | LLENADO DE LAGOS DE RECREO | AGUA MUNICIPAL NO POTABLE | PRODUCCION DE VAPOR | ENFRIAMIENTO |
|---|----------|----------|------------------------|-------------|--|--------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|--------------|
| HIDROCARBUROS ALIFATICOS HALOGENADOS | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 DICLOROETANO | 1.7E-03 | .087 | .087 | .087 | .087 | .54 | .54 | .54 | .054 | NS | NS | NS |
| 1.1 DICLOROTETRA | 3.3E-04 | .0185 | .0185 | .018 | .25 | .25 | .25 | NS | NS | NS | NS | NS |
| 1.1.1 TRICLOROETANO | 6E-03 | .087 | .087 | .017 | .087 | .087 | .54 | .54 | .54 | NS | NS | NS |
| CLOROFORMO | 1E-03 | .017 | .087 | .017 | .087 | .087 | .54 | .54 | .54 | NS | NS | NS |
| CLOPIFORMO | 1.9E-03 | .1 | .1 | .1 | .25 | .25 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| 1.2 DICLOROPROPANO | .087 | .244 | 14.1 | 14.1 | .244 | .25 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| 1.3 DICLOROPROPANO | .087 | .244 | 14.1 | 14.1 | .244 | .24 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| CLOURO DE METILO | 1.9E-03 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 11 | 11 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| BROMURO DE METILO | 1.9E-03 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 11 | 11 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| BROMOFORMO | 1.9E-03 | 5.25 | 5.25 | 5.26 | 11 | 11 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| DICLOROACETONENO | 1.9E-03 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 11 | 11 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| TRICLOROFLUOROMETANO | 1E-03 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 11 | 11 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| DICLOROFLUOROMETANO | 1E-03 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 11 | 11 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| CLORODIFLUOROMETANO | .014 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 11 | 11 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| TETRACLOROETANO | 8E-03 | .088 | .088 | .088 | .807 | .807 | .84 | .84 | .84 | NS | NS | NS |
| TRICLOROETANO | .027 | .807 | .807 | .807 | .807 | .807 | 4.9 | .807 | .807 | NS | NS | NS |
| CLORO DE VINILO | .02 | .02 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | 5.25 | NS | NS | NS |
| 1.2 trans DICLOROETANO | 3E-04 | 3E-04 | .0185 | .0185 | .25 | .25 | .25 | .25 | .25 | NS | NS | NS |
| TETRACLORO DE CARBONO | 1E-04 | 1E-04 | .54 | .54 | .54 | .54 | .54 | NS | NS | NS | NS | NS |
| 1.2 DICLOROETANO | 4E-03 | .069 | .069 | .1 | .1 | .069 | 3.4 | 3.4 | 3.4 | NS | NS | NS |
| 1.1.1 TRICLOROETANO | 0E-03 | .087 | 1.7E-03 | 1.7E-03 | .087 | .087 | .54 | .54 | .54 | NS | NS | NS |
| HEXACLOROETANO | .019 | .087 | .087 | .017 | .087 | .087 | .54 | .54 | .54 | NS | NS | NS |
| HEXACLOROPROPANO | 4.47E-03 | 4.5E-03 | .5 | .5 | .5 | .5 | .93 | .93 | .93 | NS | NS | NS |
| HEXACLOROCLOROETANO | 1E-03 | 2E-03 | 2E-03 | 2E-03 | 3E-03 | 5.2E-03 | 5.2E-03 | 5.2E-03 | 5.2E-03 | NS | NS | NS |
| HIDROCARBUROS AROMATICOS | | | | | | | | | | | | |
| BENZOLINOS | | | | | | | | | | | | |
| CLOROBENZENO | .02 | .02 | .02 | .04 | .03 | 3E-03 | .03 | .02 | .02 | NS | NS | NS |
| 1.2 DICLOROBENZENO | 2E-03 | .02 | .04 | .04 | .05 | .05 | .05 | .02 | .02 | NS | NS | NS |
| 1.3 DICLOROBENZENO | 2E-03 | .02 | .04 | .04 | .05 | .05 | .05 | .02 | .02 | NS | NS | NS |
| 1.4 DICLOROBENZENO | 2E-03 | .02 | .04 | .04 | .05 | .05 | .05 | .02 | .02 | NS | NS | NS |
| HIDROCARBUROS ALIFATICOS | | | | | | | | | | | | |
| BENCENO | 5.4E-03 | .4 | .4 | .4 | .4 | .4 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| TOLUENO | 14.3 | 17.5 | .424 | .424 | .424 | .424 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| ETILBENCENO | 1.4 | 1.4 | .32 | .32 | .2 | .2 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| HEXACLOROBENCENO | 7.2E-05 | 2.3E-03 | 7.4E-05 | 7.2E-05 | 7.4E-05 | 7.4E-05 | 7.4E-06 | .01 | .1 | NS | NS | NS |
| 1.2.4 TRICLOROBENCENO | 2E-03 | .03 | .02 | .04 | .05 | .06 | .06 | NS | NS | NS | NS | NS |

(*) Simbología: NS = No sancionado. Todos los valores están expresados en mg/l excepto pH (unidades); color (unidades Pt/Co); turbidez (unidades nefelométricas), conductividad eléctrica (mhos/cm); coliformes fecales y totales (millones de colonias/100 ml).

CUADRO II.3 CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA RENOVADA PARA DIVERSOS USOS

U S O S D E L A G U A

| PROYECTO Y/O CONTRATANTE | FLUJIDA | INFLUJO | ACUMULACION Y PERDA | ARRASTRES | REJES DE CIEG- VOS PARA CUBRI- R OJOS | RIGID DE BUR- TOS Y VÍAS | RIGID DE FORTI- NES Y PUNOS | IMPANACION | IMPANACION | LIMPIO DE LAGOS DE RIBERO | AGIA SUBSTANCIAL NO POTABLE | PROTECCION DE FAUNA | EMPLANTADO |
|-----------------------------------|---------|---------|------------------------|-----------|---|-----------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------|
| HIDROCARBUROS VOLA- TILIZANTES | | | | | | | | | | | | | |
| NAFTELINO | .62 | 1.02 | 1.62 | 1.62 | 1.62 | 2 | 2 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| TRICLORINA | 5.2 | 52 | 52 | 52 | 52 | 117 | 520 | NS | 520 | NS | NS | NS | NS |
| FLUORURO | .028 | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| FLUORURO | 28x04 | .054 | .054 | .054 | .054 | .054 | 3.98 | 3.98 | 3.98 | NS | NS | NS | NS |
| CRISMO | 2.88x3 | 28x03 | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| PIRIBO | 2.88x3 | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| PROPANOL | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| ANTRACENO | 2.88x3 | 28x03 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| BENZO(A) ANTRACENO | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| BENZO(K) FLUORANTENO | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| BENZO(V) FLUORANTENO | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| BENZO(I) PIRENO | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| BENZO(g,h,i) PIRITENO | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| BENZO(1,2,3,C,d) | | | | | | | | | | | | | |
| PIRIBO | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| DIBENZO(a,h)ANTRACENO | 2.88x3 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| ACENAPHTHENO | .02 | 28x03 | 38x03 | 38x03 | 38x03 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | 3.118x3 | NS | NS | NS | NS |
| ACENAPHTENO | 5x03 | .01 | .01 | .02 | .02 | .04 | .04 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| HIDROCARBUROS POLIAROMATICOS | | | | | | | | | | | | | |
| BILOCOPOLAROS | | | | | | | | | | | | | |
| 2 CLOROPINILENO | .5 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | NS | NS | NS | NS | NS | NS |

(*) Si biología NS = No sancionado. Todos los valores están expresados en mg/l excepto pH (unidades); color (unidades Pt/Co); turbidez (unidades nefelométricas), conductividad eléctrica (mhos/cm); coliformes fecales y totales (millones de colonias/100 ml).

CUADRO 11.3 CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA REMOVADA PARA DIVERSOS USOS

U S O S D E L A G U A

| PARAMETRO Y/O CONTAMINANTE | POTABLE | NATACION | ACUICULTURA Y PESCA | ABREVADEROS | RIEGO DE CULTIVOS PARA CONSUMIR CRUDOS | RIEGO DE VEREDAS Y VIÑAS | RIEGO DE FERRAJES Y AREAS VERDES | ALLENADO DE LAGOS DE RECREACION | NAVEGACION | DEPORTIVA | AGUA MUNICI- PAL NO POT. | PRODUCCION DE VAPOR | FRIGORIFEROS |
|---------------------------------------|----------|----------|------------------------|-------------|---|--------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------|-----------|-----------------------------|------------------------|--------------|
| ESTERES HALOGENADOS | | | | | | | | | | | | | |
| 2 CLOROFILVINIL ETER | .0347 | .122 | .06 | .06 | .122 | .122 | .122 | .122 | .122 | NS | NS | NS | |
| bis2 (CLOROFIL) ETER | .0377 | .122 | .06 | .06 | .122 | .122 | .122 | .122 | .122 | NS | NS | NS | |
| bis2 CLOROFENIL ETER | .06 | .122 | .06 | .06 | .122 | .122 | .122 | .122 | .122 | NS | NS | NS | |
| 4 CLOROFENILFENIL ETER | 3E-04 | .0136 | .06 | .06 | .087 | .087 | .546 | .54 | .54 | NS | NS | NS | |
| bis2 (CLOROFIL) ETER | 3E-04 | .122 | .06 | .06 | .122 | .122 | NS | NS | NS | NS | NS | NS | |
| 4 BROMOFENILFENIL ETER | 3E-04 | .0136 | 3E-03 | 3E-03 | .087 | .087 | .54 | .54 | .51 | .51 | NS | NS | |
| bis2 (CLOROISOPRO- PIL)ETER | .0347 | .122 | .06 | .06 | .122 | .122 | NS | NS | NS | NS | NS | NS | |
| NITROCOMPUESTOS ALIFATICOS | | | | | | | | | | | | | |
| N-NITRODINITRO- LORINA | 8E-04 | .161 | .161 | .161 | .161 | .32 | .505 | NS | NS | NS | NS | NS | |
| N-NITRODINITROFI- LORINA | 8E-04 | .161 | .161 | .5 | .5 | .5 | .5 | NS | NS | NS | NS | NS | |
| NITROCOMPUESTOS AROMATICOS | | | | | | | | | | | | | |
| NITROBENCENO | | | | | | | | | | | | | |
| 2,4 DINITROFENOL | 1.3E-06 | .091 | .23 | .091 | .091 | .23 | .23 | .5 | .5 | NS | NS | NS | |
| 2,6 DINITROFENOL | 1.3E-06 | .091 | .23 | .091 | .091 | .23 | .23 | .5 | .5 | NS | NS | NS | |
| ANILINA | | | | | | | | | | | | | |
| 1,2 DIFENILAMINA | 1.22E-04 | .1226 | .056 | .122 | 5E-03 | 03 | 03 | .613 | .613 | NS | NS | NS | |
| 4-NITRODIFENILA- MINA | .049 | 5.05 | .161 | .161 | | | | | | NS | NS | NS | |
| 2-NITROFENOL | .05 | .1 | .15 | .1 | .15 | .2 | .25 | NS | NS | NS | NS | NS | |
| 4-NITROFENOL | .05 | .1 | .15 | .1 | .15 | .2 | .25 | NS | NS | NS | NS | NS | |
| 2,4 DINITROFENOL | .07 | .07 | 14.3 | 14.3 | 14.3 | 14.3 | 14.3 | NS | NS | NS | NS | NS | |
| 2,6 DINITROFENOL | .07 | .0134 | .15 | .765 | 1 | 1.34 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | NS | NS | NS | |
| 3,3 DICLOROBENCI- DINA | 1.03E-06 | 2E-04 | 2E-04 | 3E-04 | 2E-03 | 2E-03 | 2E-03 | 5E-03 | 5E-03 | NS | NS | NS | |
| FENOL | | | | | | | | | | | | | |
| FENOL | .55 | .3 | .4 | .4 | .5 | 2.56 | 2.56 | 2.5 | 2.46 | NS | NS | NS | |
| 2,4 DINITROFENOL | .4 | .5 | .4 | .4 | .0 | .8 | .8 | 2.12 | 2.12 | NS | NS | NS | |

Reúso del Agua en la Industria

Una de las actividades que desarrolla el hombre requiere generalmente de grandes volúmenes de agua de primer uso como lo es la industria. en la cual se tiene una amplia gama de procesos: Enfriamiento en la rama de curtidurfa, azucarera y celulosa, etc ; como producción de vapor en calderas y usos generales, etc. ; así de acuerdo al tipo de industria se requieren características del agua y diferentes volúmenes, los cuales se pueden sustituir con aguas residuales con previo tratamiento para evitar incrustaciones minerales, corrosión de los equipos y contaminación en la rama de alimentos.

En el cuadro 3 se sancionan las concentraciones permisibles de los parámetros físicos-químicos y biológicos de las aguas residuales tratadas para diversos usos, por lo que a partir de éstos se determinará el grado de tratamiento para cada tipo de industria.

Reúso del Agua en los Municipios

La demanda de agua potable en ciudades como el D. F., se ha incrementado debido al desarrollo industrial y al crecimiento de la población, por lo que al carecer de fuentes de abastecimiento cercanas y al deterioro de sus propios acuíferos es necesario tratar las aguas de primer uso y reutilizarlas como fuente de suministro, pues cada vez más resulta ser más costoso importar agua potable a otras cuencas.

En el cuadro 3 se muestran las concentraciones permisibles de los parámetros de las aguas residuales tratadas teniendo como premisa evaluar los efectos a la salud y a la acumulación gradual de algunos contaminantes no degradables por el hombre y que le provoquen efectos letales, ya sea a corto o a largo plazo.

El llevar a cabo el reúso en los municipios requiere de grandes inversiones por los altos costos de tratamientos avanzados y de operación. Pero el tener fuentes de abastecimiento agotadas y contaminadas justifican las inversiones, aunque un factor limitante es la aceptación de la población, dependiendo del uso como riego de parques y jardines, llenado de lagos recreativos, centros de enseñanza, centros hospitalarios, terminales de autotransporte, comercios, baños públicos, lavado de autos, etc.

Reúso del Agua en la Recarga Artificial de Acuíferos

Como consecuencia de la alta demanda de agua potable para usos tanto domésticos como industriales se tiene la sobreexplotación de los mantos acuíferos con peligro de agotarse e incrementando el hundimiento de la ciudad de México y en algunos casos detectándose contaminación de los acuíferos.

Como alternativa para subsanar estos acuíferos en cuanto a calidad y cantidad se deben tomar medidas de protección en zonas con problemas hidráu-

licos, de agotamiento y/o contaminación de aguas subterráneas, siendo necesario aplicar técnicas de recarga con aguas de buena calidad, para que al irse infiltrando, depositando y degradando los contaminantes en su momento alcancen la calidad deseada y se mezclen con las aguas subterráneas; debiendo tomar en cuenta el tipo de suelo, la calidad del agua residual tratada a infiltrar, la distancia al acuífero, así como evitar contaminar acuíferos vecinos.

En el cuadro 3 se muestran las concentraciones permisibles de los parámetros a utilizar en la recarga de acuíferos.

Reúso del Agua para Fines Recreativos

La finalidad de este uso generalmente es de beneficio social, las actividades en las cuales se utiliza son: remo, pesca, llenado de lagos y natación.

El reutilizar las aguas residuales tratadas para estos fines tiene la conveniencia de rescatar volúmenes apreciables de agua potable destinados a estas actividades.

En el cuadro 3 se muestran las concentraciones permisibles de las aguas tratadas para fines recreativos dependiendo de la calidad además del grado de contacto con el hombre, pues algunos contaminantes como las grasas y aceites, los organismos patógenos y algunos otros afectan directamente la

salud humana, así como a las especies acuáticas, ya que algunas son sensibles a cualquier tipo de contaminantes.

CAPITULO II

1. Eckentelder W.W. Principles of Water Quality Management. C B I Publishing Company INC. Boston, Massachusetts, 1980.
2. Mendoza M. H. Tratamiento Avanzado, Operaciones y Procesos Unitarios, Descripción y Aplicaciones. DECFI UNAM, 1985.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

- Murguía V. E. Ingeniería Sanitaria UNAM, México 1979.
- S.A.R.H. Reúso del Agua en la Agricultura, la Industria, los Municipios y en la Recarga de Acuíferos. Etapas I, II, III y IV. DHTA/DGPOE México, D. F., 1974-1979.
- Contreras M. R. Aspectos Relevantes del Reúso del Agua en México DECFI, UNAM 1985.
- Culp, R. L. & Coauthors, Handbook of Advanced Wastewater Treatment. Van Nostrand, 1978.

III. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS AVANZADOS EN LA PLANTA PILOTO
"CERRO DE LA ESTRELLA" DEL D.D.F.

El objetivo del tratamiento avanzado es remover los contaminantes que permanecen en el agua después del tratamiento secundario, para así aprovechar las aguas residuales renovadas para diversos usos.

El D.D.F. construyó a través de la D.G.C.O.H. una planta piloto experimental de tratamiento avanzado de aguas residuales con un caudal medio de 0.5 l/seg., con la finalidad de evaluar alternativas de tratamiento y generar bases de diseño para plantas a nivel prototipo, por lo que los procesos que componen la planta piloto tienen un esquema adecuado para estudiar diferentes alternativas de tratamiento, variaciones en las condiciones de operación y sistema de medición.

Para seleccionar los procesos convenientes, en 1981, la D.G.C.O.H., realizó una caracterización de las aguas residuales que genera la ciudad de México (Ref. 1). En el cuadro III.1 se muestran las medias y desviación estandar para las aguas que llegan a las plantas Cerro de la Estrella, Cd. Deportiva y Chapultepec. Como puede observarse hay variaciones apreciables en la calidad de las aguas de desecho del D. F., por lo que el tipo de tratamiento requerido debe ser diferente.

En el cuadro III.2 se presenta la calidad de las aguas tratadas en cada planta, teniéndose variaciones apreciables en las concentraciones detectadas.

CUADRO III - I

CONCENTRACIONES MEDIAS DE LOS INFLUENTES DE LAS
PLANTAS DE TRATAMIENTO

37

| PARAMETRO | CIUDAD DEPORTIVA | | CERRO DE LA ESTRELLA | | CHAPULTEPEC | |
|---|------------------|-------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | \bar{X} | S | \bar{X} | S | \bar{X} | S |
| | 1. pH | 7.1 | 0.4 | 7.1 | 0.3 | 6.7 |
| 2. Color (U. Pt. Co.) | 65 | 48 | 61 | 45 | 47 | 18 |
| 3. Turbiedad (NTU) | 32 | 25 | 6 | 6 | 5 | 11 |
| 4. Alcalinidad Total (CaCO ₃) | 499 | 75 | 312 | 62 | 174 | 22 |
| 5. Conductividad (μ mhos/cm) | 3589 | 200 | 994 | 252 | 774 | 1410 |
| 6. Cloruros | 159 | 50 | 65 | 8 | 28 | 8 |
| 7. Hierro | 7.4 | 3.9 | 5.3 | 1.5 | 2.9 | 1.9 |
| 8. Sólidos Totales | 1231 | 378 | 963 | 385 | 631 | 256 |
| 9. Sólidos Totales Fijos | 578 | 273 | 481 | 255 | 309 | 202 |
| 10. Sólidos Totales Volátiles | 553 | 312 | 483 | 231 | 321 | 160 |
| 11. Sólidos Disueltos Totales | 861 | 139 | 995 | 121 | 399 | 111 |
| 12. Sólidos Disueltos Fijos | 392 | 197 | 333 | 148 | 210 | 123 |
| 13. Sólidos Disueltos Volátiles | 470 | 232 | 260 | 143 | 189 | 87 |
| 14. Sólidos Suspendidos Totales | 371 | 381 | 370 | 320 | 236 | 169 |
| 15. Sólidos Suspendidos Fijos | 186 | 178 | 147 | 139 | 117 | 109 |
| 16. Sólidos Suspendidos Volátiles | 185 | 233 | 223 | 220 | 121 | 94 |
| 17. Sólidos Sedimentables | 1.2 | 1.5 | 1.51 | 1.86 | 2.8 | 2.0 |
| 18. R.A.S. Soluble | 8.7 | 7.9 | 3.8 | 1.7 | 3.5 | 2.3 |
| 19. R.A.S. Total | 12.1 | 11.1 | 5.8 | 2.5 | 5.4 | 3.2 |
| 20. Nitrógeno Amoniacal | 30.8 | 8.4 | 28.1 | 10.0 | 17.1 | 11.1 |
| 21. Nitrógeno Total | 51.8 | 17.6 | 32.2 | 15.8 | 41.1 | 35.7 |
| 22. Nitratos | 3.3 | 1.6 | 6.2 | 9.0 | 20.9 | 22.6 |
| 23. Fósforo Total (PO ₄) | 9.3 | 4.1 | 7.3 | 7.2 | 5.3 | 3.4 |
| 24. Calcio Soluble | 21.5 | 16.7 | 20.3 | 8.2 | 6.3 | 3.2 |
| 25. Magnesio Soluble | 24.5 | 14.8 | 16.1 | 10.4 | 4.4 | 8.1 |
| 26. Sodio Soluble | 142.5 | 133.8 | 66.9 | 25.5 | 28.8 | 27.0 |
| 27. Potasio Soluble | 27.0 | 23.3 | 8.9 | 8.8 | 4.7 | 8.0 |
| 28. Calcio Total | 39.4 | 26.6 | 33.5 | 17.9 | 21.7 | 21.3 |
| 29. Magnesio Total | 73.8 | 73.6 | 59.2 | 65.3 | 17.5 | 38.2 |
| 30. Sodio Total | 226.2 | 71.5 | 125.1 | 44.7 | 69.2 | 37.0 |
| 31. Potasio Total | 60.4 | 42.9 | 25.3 | 18.5 | 16.2 | 15.8 |
| 32. Hierro Soluble | 0.82 | 0.73 | 0.67 | 0.49 | 0.43 | 0.63 |
| 33. Manganeseo Soluble | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.83 | 0.05 |
| 34. Plomo Soluble | 8.13 | 0.14 | 0.10 | 0.11 | 0.84 | 0.18 |
| 35. Cadmio Soluble | 0.01 | 0.02 | 5x10 ⁻³ | 5x10 ⁻³ | 9x10 ⁻³ | 14x10 ⁻³ |
| 36. Mercurio Soluble | 0.04 | 0.06 | 1x10 ⁻³ | 1x10 ⁻³ | 3x10 ⁻³ | 3x10 ⁻³ |
| 37. Arsénico Soluble | 0.05 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 9x10 ⁻³ | 9x10 ⁻³ |

CUADRO III. I
CONCENTRACIONES MEDIAS DE LOS INFLUENTES DE LAS
PLANTAS DE TRATAMIENTO

38

| PARAMETRO | CIUDAD DEPORTIVA | | CERRO DE LA ESTRELLA | | CHAPULTEPEC | |
|--|------------------|------|----------------------|------|-------------|------|
| | \bar{x} | S | \bar{x} | S | \bar{x} | S |
| 38.- Cromo Soluble | 0.19 | 0.17 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 0.03 |
| 39.- Fierro Total | 5.02 | 8.60 | 3.28 | 1.92 | 4.25 | 5.57 |
| 40.- Manganeso Total | 0.17 | 0.09 | 0.10 | 0.03 | 0.76 | 1.61 |
| 41.- Plomo Total | 0.27 | 0.29 | 0.18 | 0.15 | 0.18 | 0.21 |
| 42.- Cadmio Total | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| 43.- Mercurio Total | 0.10 | 0.12 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.01 |
| 44.- Arsénico Total | 0.12 | 0.12 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| 45.- Cromo Total | 0.52 | 0.47 | 0.13 | 0.12 | 0.06 | 0.12 |
| 46.- Colif. Fecales (mill.Col/ 100 ml) | 139 | 133 | 77 | 60 | 82 | 61 |
| 47.- Colif. Totales (mill. Col/ 100 ml) | 236 | 204 | 222 | 159 | 174 | 193 |
| 48.- DBO 5 Soluble | 249 | 126 | 188 | 68 | 103 | 50 |
| 49.- DQO Soluble | 453 | 210 | 342 | 163 | 190 | 100 |
| 50.- COT Fijo | 29.4 | 8.0 | 64 | 11 | 27 | 11 |
| 51.- Grasas y Aceites | 72 | 62 | 84 | 64 | 50 | 55 |
| 52.- SAAM | 5.8 | 1.5 | 6.9 | 2.2 | 7.0 | 2.5 |
| 53.- Conductividad/STD | 1.89 | 0.39 | 1.60 | 0.18 | 1.76 | 2.24 |
| 54.- SSV/DQO | 0.43 | 0.45 | 0.66 | 0.55 | 0.76 | 0.55 |
| 55.- SSV/DBO | 0.92 | 0.99 | 1.12 | 0.91 | 2.49 | 6.06 |
| 56.- DBO/DQO | 0.55 | 0.22 | 0.61 | 0.18 | 0.63 | 0.26 |
| 57.- COT/DQO | 0.08 | 0.06 | 0.22 | 0.09 | 0.14 | - |
| 58.- COT/DBO | 0.19 | 0.17 | 0.40 | 0.20 | 0.36 | 0.32 |
| 59.- Grasas y Aceites/COT | 2.36 | 1.66 | 1.40 | 1.24 | 2.09 | 2.65 |
| 60.- STV/DQO | 1.69 | 0.88 | 1.65 | 0.77 | 2.24 | 1.48 |
| 61.- I.C.A.R. | 6.7 | 1.7 | 5.9 | 1.7 | 2.2 | 0.5 |
| 62.- I.C.A. Ren. | 48.3 | 2.3 | 46.8 | 1.7 | 46.2 | 3.3 |

Referencia: Evaluación de Sistemas Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales, U. de D., D.G.C.O.H., Departamento del Distrito Federal (Laboratorios ABC Química, Investigación y Análisis, S. A.), Anexo B, 1981.

CUADRO III - 2

CONCENTRACIONES MEDIAS DE LOS EFLUENTES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

39

| PARAMETRO | CIUDAD DEPORTIVA | | CERRO DE LA ESTRELLA | | CHAPULTEPEC | |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | \bar{x} | s | \bar{x} | s | \bar{x} | s |
| 1.- pH | 7.0 | 0.3 | 7.2 | 0.3 | 6.9 | 0.6 |
| 2.- Color (U. Pt. Co.) | 54 | 3.3 | 41 | 30 | 22 | 18 |
| 3.- Turbiedad (UTN) | 11 | 10 | 9 | C | 2 | 2 |
| 4.- Alcalinidad Total (CaCO ₃) | 421 | 106 | 274 | 61 | 138 | 45 |
| 5.- Conductividad (µmhos/cm) | 1395 | 251 | 914 | 84 | 949 | 2262 |
| 6.- Cloruros | 150 | 39 | 69 | 12 | 3 | 23 |
| 7.- Boro | 7.0 | 3.1 | 4.9 | 1.6 | 2.5 | 3.2 |
| 8.- Sólidos Totales | 1080 | 352 | 837 | 268 | 593 | 332 |
| 9.- Sólidos Totales Fijos | 496 | 274 | 446 | 198 | 258 | 139 |
| 10.- Sólidos Totales Volátiles | 584 | 264 | 391 | 164 | 335 | 265 |
| 11.- Sólidos Disueltos Totales | 765 | 184 | 578 | 126 | 353 | 126 |
| 12.- Sólidos Disueltos Fijos | 351 | 176 | 326 | 149 | 188 | 108 |
| 13.- Sólidos Disueltos Volátiles | 414 | 234 | 252 | 133 | 165 | 97 |
| 14.- Sólidos Suspendedos Totales | 311 | 323 | 259 | 249 | 240 | 254 |
| 15.- Sólidos Suspendedos Fijos | 170 | 193 | 119 | 125 | 71 | 81 |
| 16.- Sólidos Suspendedos Volát. | 141 | 157 | 140 | 155 | 169 | 205 |
| 17.- Sólidos Sedimentables | 0.22 | 0.30 | 1.51 | 1.86 | 1.07 | 1.34 |
| 18.- R.A.S. Soluble | 7.5 | 2.8 | 4.5 | 1.4 | 2.9 | 2.3 |
| 19.- R.A.S. Total | 9.9 | 2.7 | 5.6 | 1.6 | 5.3 | 4.2 |
| 20.- Nitrógeno Amoniacal | 23.8 | 10.6 | 17.5 | 5.8 | 9.6 | 11.7 |
| 21.- Nitrógeno Total | 31.4 | 10.2 | 28.1 | 7.3 | 19.4 | 7.1 |
| 22.- Nitratos | 2.4 | 2.0 | 28.6 | 98.3 | 12.1 | 13.8 |
| 23.- Fósforo Total (PO ₄) | 6.4 | 3.6 | 7.1 | 5.6 | 4.5 | 1.9 |
| 24.- Calcio Soluble | 17.4 | 17.7 | 19.3 | 15.3 | 8.5 | 6.1 |
| 25.- Magnesio Soluble | 21.9 | 13.3 | 16.6 | 9.7 | 2.9 | 2.0 |
| 26.- Sodio Soluble | 107 | 32 | 65 | 19 | 24 | 19 |
| 27.- Potasio Soluble | 31.2 | 37.2 | 6.6 | 2.9 | 3.2 | 3.3 |
| 28.- Calcio Total | 25.4 | 17.0 | 30.7 | 15.8 | 14.6 | 11.9 |
| 29.- Magnesio Total | 62.5 | 73.2 | 45.7 | 53.3 | 10.0 | 5.0 |
| 30.- Sodio Total | 213 | 62 | 115 | 39 | 64 | 52 |
| 31.- Potasio Total | 39.5 | 21.0 | 26.2 | 20.3 | 11.6 | 8.9 |
| 32.- Hierro Soluble | 0.48 | 0.75 | 0.49 | 0.58 | 0.58 | 2.00 |
| 33.- Manganeso Soluble | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.20 | 0.90 |
| 34.- Plomo Soluble | 0.11 | 0.08 | 0.04 | 0.08 | 0.04 | 0.15 |
| 35.- Cadmio Soluble | 1.5x10 ⁻³ | 2.1x10 ⁻³ | 1.0x10 ⁻³ | 1.2x10 ⁻³ | 5.1x10 ⁻³ | 9.2x10 ⁻³ |
| 36.- Mercurio Soluble | 1.6x10 ⁻³ | 0.8x10 ⁻³ | 1.7x10 ⁻³ | 1.2x10 ⁻³ | 2.7x10 ⁻³ | 1.6x10 ⁻³ |
| 37.- Arsenico Soluble | 0.014 | 0.011 | 0.021 | 0.016 | 0.007 | 0.007 |
| 38.- Cromo Soluble | 0.080 | C.153 | 0.039 | 0.061 | 0.019 | 0.060 |
| 39.- Hierro Total | 2.70 | 5.05 | 2.81 | 3.76 | 1.74 | 1.83 |
| 40.- Manganeso Total | 0.11 | 0.04 | 0.09 | 0.06 | 0.60 | 1.37 |
| 41.- Plomo Total | 0.23 | 0.12 | 0.09 | 0.11 | 0.75 | 0.18 |

CUADRO III- 2 (Com.)

CONCENTRACIONES MEDIAS DE LOS EFLUENTES DE LAS
PLANTAS DE TRATAMIENTO

40

| PARAMETRO | CIUDAD DEPORTIVA | | CERRO DE LA ESTRELLA | | CHAPULTEPEC | |
|---|--|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------|
| | \bar{x} | S | \bar{x} | S | \bar{x} | S |
| 41.- Calcio Total | 3.6×10^{-3} | 5.2×10^{-3} | 2.0×10^{-3} | 2.2×10^{-3} | 0.022 | 0.046 |
| 43.- Mercurio Total | 0.013 | 0.026 | 0.006 | 0.009 | 0.006 | 0.006 |
| 44.- Arsénico Total | 0.020 | 0.045 | 0.065 | 0.094 | 0.019 | 0.024 |
| 45.- Cromo Total | 0.143 | 0.215 | 0.052 | 0.121 | 0.050 | 0.140 |
| 46.- Colif.Fecales (mill col./ 100 ml) | 85 | 100 | 87 | 68 | 58 | 52 |
| 47.- Colif.Totales (mill col./ 100 ml) | 182 | 211 | 174 | 151 | 137 | 154 |
| 48.- DPO 5 Soluble | 72 | 74 | 67 | 37 | 46 | 24 |
| 49.- DQO Soluble | 188 | 140 | 171 | 96 | 99 | 50 |
| 50.- COT Fijo | 18.9 | 6.9 | 20.2 | 7.1 | 21.2 | 20.1 |
| 51.- Grasas y Aceites | 38 | 31 | 30 | 36 | 44 | 47 |
| 52.- SAAM | 6.1 | 2.9 | 5.9 | 2.2 | 5.2 | 2.8 |
| 53.- Conductividad/STP | 1.89 | 0.33 | 1.65 | 0.35 | 2.41 | 4.67 |
| 54.- SEV/DQO | 0.82 | 0.81 | 1.37 | 1.55 | 2.40 | 4.75 |
| 56.- SEV/DBO | 2.49 | 2.82 | 2.37 | 3.12 | 9.10 | 22.58 |
| 56.- DBO/DQO | 0.40 | 0.17 | 0.46 | 0.19 | 0.50 | 0.22 |
| 57.- COT/DQO | 0.17 | 0.17 | 0.15 | 0.08 | 0.27 | 0.29 |
| 58.- COT/DBO | 0.41 | 0.26 | 0.41 | 0.29 | 2.71 | 10.88 |
| 59.- Grasas y Aceites/COT | 2.48 | 2.71 | 1.69 | 2.02 | 2.79 | 3.12 |
| 60.- STV/DQO | 4.92 | 3.70 | 3.24 | 2.16 | 4.65 | 6.10 |
| 61.- I.C.A.R. | 7.0 | 2.1 | 5.8 | 2.7 | 2.8 | 1.4 |
| 62.- I.C.A. Ren. | 45.2 | 4.1 | 46.8 | 2.5 | 44.6 | 3.8 |
| Referencia: | <u>Evaluación de Sistemas Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales</u> , U. de D., D.G.C.O.H., Departamento del Distrito Federal (Laboratorio ABC Química, Investigación y Análisis, S. A.), Anexo B, 1981. | | | | | |

Estas variaciones influyeron en la decisión de dar flexibilidad en la operación y experimentar en primera instancia en la planta "Cerro de la Estrella"; también cabe mencionar que, con base a los contaminantes que permanecen en el agua después de un tratamiento secundario, se seleccionaron los criterios para el diseño de las unidades que componen la planta piloto tomando en cuenta la secuencia de los procesos de una planta de tratamiento avanzado para remover los contaminantes, de los cuales se hace una descripción:

Como puede observarse los detergentes son poco removidos en los procesos biológicos, presentándose en los efluentes del tratamiento secundario en forma de espumas que afectan la calidad del agua, interfieren en el proceso biológico, en procesos de intercambio de gases naturales y artificiales, además dañan suelos agrícolas. Por estas razones se fijó como una de las metas la remoción de detergentes con unidades de espumación.

Otro contaminante que se presenta en los efluentes del tratamiento secundario es el nitrógeno orgánico y amoniacal; no se remueve en forma apreciable en las plantas a nivel secundario, siendo uno de los contaminantes que ocasiona mayores problemas por su toxicidad a formas superiores de vida acuática, por sus efectos de eutroficación y por su demanda de oxígeno y cloro; de ésta forma, se requiere conocer la naturaleza y magnitud del NTK, la concentración de la D.Q.O., el C.O.T. y la concentración de nitratos. Para la remoción del nitrógeno, se presenta la opción de torres desgasificadoras para remoción de amoniaco en el lado básico a partir de aire mediante

torres empacadas.

La remoción está en función de la concentración del nitrógeno y del pH (mayor a 10 unidades), siendo necesario elevarlo antes de este proceso y posteriormente disminuirlo recarbonatando con bioxido de carbono (CO_2).

Remoción de Fósforo, Sólidos Suspendidos y Color

La remoción de fósforo es importante ya que es un nutriente, por lo que fomenta la aparición de algas en los cuerpos receptores; los sólidos suspendidos y el color dan aspecto antiestético al agua e interfieren en procesos de purificación limitando el reúso en la industria y en los usos municipales.

El proceso más viable es la floculación y precipitación por medios químicos, seguidas de filtración.

Las variantes para estos procesos son:

Mezcla rápida-floculación-sedimentación-filtros rápidos por lo que se deberá evaluar la necesidad de incluir todas las unidades descritas, así como otras alternativas.

Remoción de Compuestos Orgánicos, Nutrientes, Metales no Solubles y Materiales Refractarios

Uno de los procesos que ha dado buenos resultados es el carbón activado granular (CAG) para la remoción de compuestos orgánicos complejos, color, turbiedad, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y metales no solubilizados.

El tratamiento con CAG se lleva a cabo percolando un líquido a través de un lecho fijo de adsorción, el cual debe tener un tamaño de partícula adecuado y la capacidad relativa de adsorción.

La unidad de adsorción debe ubicarse después del filtrado y antes de ósmosis inversa. Por otro lado también puede usarse ozono, ya que posee un gran número de aplicaciones (oxidación de hierro y manganeso, como micro-floculante, para el control de olores y sabores, compuestos orgánicos).

Inactivación Viral y Desinfección

La acción del ozono causa la transformación química de los compuestos orgánicos, haciéndolos más fáciles de biodegradar. La aplicación del ozono es efectivo antes de la filtración para remover las sustancias producidas por la oxidación.

El ozono es menos tóxico que el cloro, aunque en algunos casos reacciona con plaguicidas (malathion y parathion) produciendo compuestos que pueden

afectar el metabolismo humano.

Remoción de Sales Disueltas

Osmosis inversa es el proceso más efectivo en cuanto a la remoción de iones de aguas salinas y de compuestos orgánicos en solución, los cuales exceden los límites recomendables para su uso final, ya que éstas presentan efectos incrustantes y su tratamiento implica costos elevados, debido al alto consumo de energía, operación y mantenimiento, como por los aditamentos especiales y las membranas de diversos materiales.

Remoción de Organismos Patógenos

Las bacterias y virus representan problemas para la salud pública, limitando el reúso de las aguas residuales, ya sea en la agricultura, industria y otros usos, por lo que es necesario incluir el proceso de desinfección con cloro y en un momento dado la ozonación, la cual daría buenos resultados.

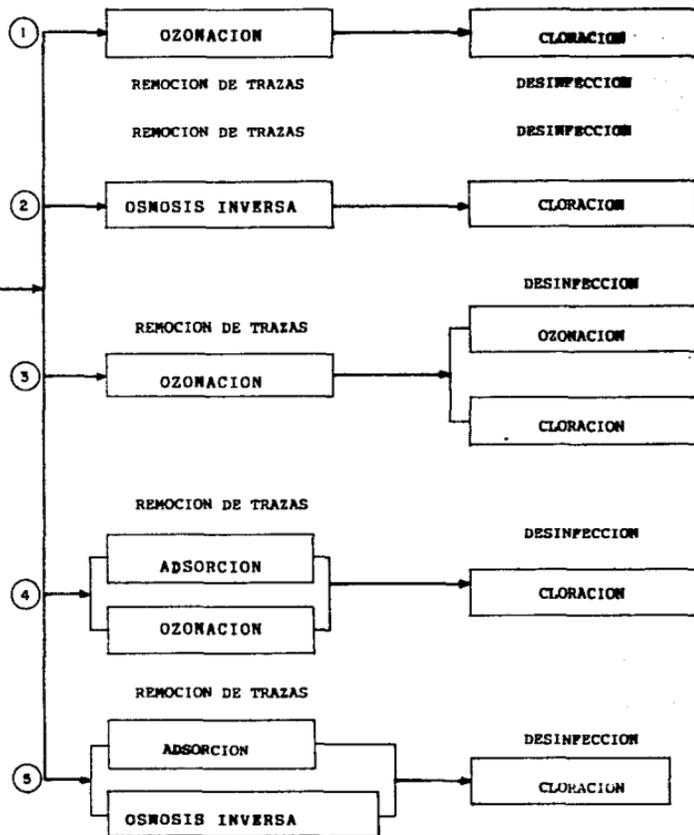
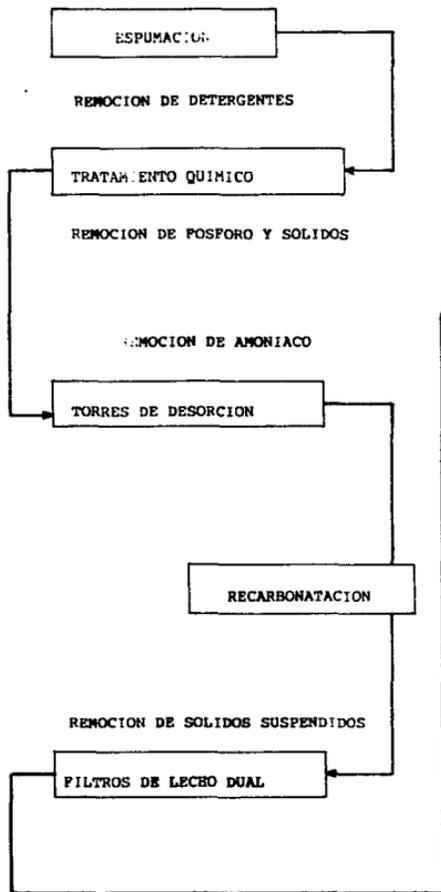
En base a la amplia gama de contaminantes, se seleccionaron los procesos unitarios que componen la planta piloto y su secuencia para la operación inicial:

- Espumación
- Tratamiento químico

- Desorción de amoniaco
- Recarbonatación
- Filtración
- Ozonación
- Adsorción en carbón activado
- Ósmosis inversa
- Desinfección

En el cuadro No. III-3 se muestran los objetivos y efectos de los procesos y en el cuadro No. III-4 se observa el esquema de tratabilidad con 5 alternativas, las cuales están sujetas al nivel de calidad de agua requerida. Como se puede apreciar, los primeros cinco procesos unitarios son comunes; en la alternativa 1, la remoción de trazas orgánicas se logra por medio de oxidación con ozono, seguida de desinfección con cloro; la segunda opción remueve las trazas orgánicas e inorgánicas con ósmosis inversa y desinfección con cloro. La tercera alternativa remueve con carbón activado y desinfección, trazas orgánicas con una primera etapa ozonando y posteriormente desinfectando con cloro para protección de la red; la cuarta alternativa es similar a la tercera, pero con la variante de que en ésta, el ozono actúa como oxidante de trazas orgánicas. Por último, la quinta alternativa emplea carbón activado y ósmosis inversa para control de sales disueltas y cloro para la desinfección.

| <u>P R O C E S O</u> | <u>O B J E T I V O</u> | <u>E F E C T O S O C A S I O N A D O S P O R E L C O N T A M I N A N T E</u> |
|---|--|--|
| ESPUMACION | REMOCION DE DETERGENTES | FORMACION DE ESPUMAS QUE INTERFIEREN EN EL INTERCAMBIO NATURAL DE GASES CON LA ATMOSFERA CON EL AGUA, DANAN LOS SUELOS, ETC. |
| TRATAMIENTO FISICO-QUIMICO | REMOCION DE FOSFORO, TURBIDEZ COLOR Y SOLIDOS SUSPENDIDOS | APARICION DE ALGAS, ASPECTO ANTIESTETICO, LIMITAN EL REUSO EN INDUSTRIAS |
| DESGASIFICACION-RECARBONATACION | REMOCION DE AMONIACO ESTABILIZACION QUIMICA DEL AGUA | TOXICIDAD EN ESPECIES ACUATICAS, EFECTOS EUTROFICANTES, DEMANDA OXIGENO Y CLORO EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO |
| FILTRACION | REMOCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS Y TURBIDEZ | DAN ASPECTO ANTIESTETICO DEL AGUA |
| ADSORCION OZONACION OSMOSIS INVERSA | REMOCION DE COLOR REAL Y TRAZAS ORGANICAS | PRODUCEN CORROSION, INCRUSTACION, OLORES, DAN SABOR AL AGUA, ETC. |
| OSMOSIS INVERSA | REMOCION DE SOLIDOS DISUELTOS | PRODUCEN INCRUSTACION Y CORROSION |
| OZONACION CLORACION | DESINFECCION DE ORGANISMOS PATOGENOS, VIRUS Y BACTERIAS | AFECTAN LA SALUD PUBLICA, PRODUCIENDO INFECCIONES GASTROINTESTINALES PRODUCEN EFECTOS MUTAGENICOS EN ORGANISMOS VIVOS |
| ESPESAMIENTO DE LODOS | REDUCCION DE LOS LODOS SEDIMENTADOS EN EL TRATAMIENTO FISICO-QUIMICO | SE AUMENTA LA CONTAMINACION EN CUERPOS RECEPTORES, DISMINUYE DUREZA AL AGUA |
| DESCARBONATACION | REDUCCION DEL BIOXIDO DE CARBONO QUE SE FORMA EN OSMOSIS INVERSA | |



III.1 Espumación

El uso de detergentes duros en México como el "ABS" se detectan mediante la técnica analítica "Sustancias Activas al Azul de Metileno" (S.A.A.M.). Las altas concentraciones de detergentes en las plantas a nivel secundario dan aspecto antiestético al agua y crea problemas en los cuerpos receptores, además de reducir la eficiencia de los procesos biológicos. En la actualidad los países desarrollados han sustituido los detergentes duros por detergentes blandos, los cuales son biodegradables, teniendo como consecuencia que la literatura técnica para éste proceso sea escasa.

En México se siguen empleando los detergentes duros, siendo de gran utilidad desarrollar criterios de diseño de unidades de espumación para fines futuros, pues es difícil que en un momento dado México sustituya a los detergentes duros por cuestiones económicas o de otra índole. Por éstos motivos es necesario poner mayor énfasis en este estudio.

La unidad de espumación en el tratamiento avanzado tiene como objetivo eliminar los detergentes provenientes de las descargas domésticas e industriales. Asociados a los detergentes se tienen cantidades apreciables de fosfatos que contribuyen a contaminar las aguas residuales.

También mediante la espumación se reducen cantidades pequeñas de materia orgánica (D.O.D). El proceso consiste en la inyección de aire mediante

difusión (ya sea burbuja gruesa o fina). Para burbujear el agua y eliminar las espumas aprovechando la presión de inyección de aire para arrastrarlas al exterior.

De estudios experimentales (Ref. 3) se han obtenido para relaciones aire/agua de 7.00, eficiencias del 50 al 70% y una reducción en la D.Q.O. del 15 al 30%.

Por referencias bibliográficas, se establecieron las bases de diseño para la unidad de espumación, considerando un caudal medio de 0.5 l/seg., y una relación aire/agua de 7.0, quedando:

Tiempo de retención = 8.66 min
Caudal de aire = 3.5 l/seg.
Altura de agua = 2.0 m
Diámetro de la columna=40.6 cm

Descripción de la Unidad de Espumación

La unidad consta de una columna circular de 40.6 cm de diámetro y una altura de 2.5 m. La alimentación del agua se realiza por la parte superior sumergida en el nivel estático del agua; la inyección del aire, por la parte inferior con un difusor para garantizar un tamaño adecuado de la burbuja; el agua tratada sale por la parte lateral del fondo de la columna; la eliminación de los detergentes espumados se lleva a cabo por la parte superior de

la columna al reducirse la sección.

Para la inyección del aire se tiene un regulador de presión, un filtro para evitar contaminar las aguas con aceite proveniente del aire del compresor y un rotámetro para la medición del caudal de aire. En la figura III.1 se muestra un esquema de la unidad y sus detalles principales.

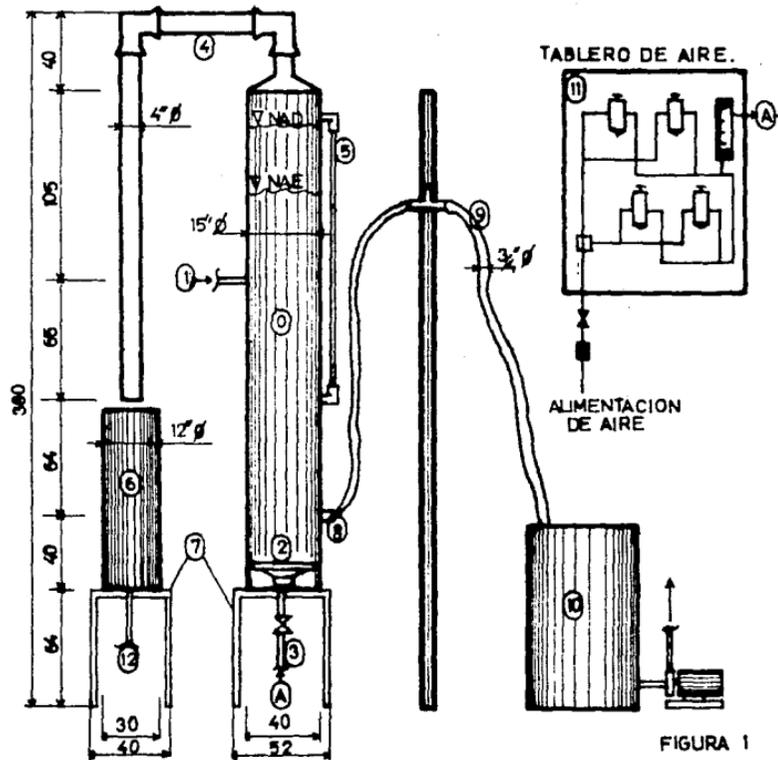
Parámetros de Control de Proceso

Los parámetros que controlan el proceso de espumación son: la eficiencia de remoción de detergentes (S.A.A.M), la relación aire/agua, el tiempo de retención; en forma indirecta la altura de columna de agua y el tamaño de burbuja.

Para optimizar la unidad de espumación se llevaron a cabo una serie de pruebas, en las cuales se investigaron un amplio margen en los parámetros que controlan el proceso para su optimización como lo muestra el diagrama de árbol de la figura III.2.A., el cual presenta 15 alternativas de tratabilidad con varias repeticiones con difusor de burbuja gruesa tipo cebolla.

En la figura III.2.B. se presentan las alternativas estudiadas con difusor de burbuja fina Mca. Degremont Pelletier. con 3 alternativas y dos diferentes alturas de columna de agua 1.20 m y 1.50 m dichas condiciones se eligieron en menor cantidad de parámetros, ya que se tomaron como base los resultados anteriores.

UNIDAD DE ESPUMACION



NOMENCLATURA:

- 0.- COLUMNA DE ESPUMACION.
 - 1.- INFLUENTE
 - 2.- DIFUSOR DE AIRE
 - 3.- ALIMENTACION DE AIRE.
 - 4.- DESCARGA DE AIRE Y ESPUMAS.
 - 5.- INDICADOR DE NIVEL.
 - 6.- COLECTOR Y APAGADO DE ESPUMAS.
 - 7.- ESTRUCTURA DE SOPORTE.
 - 8.- EFLUENTE.
 - 9.- SIFON PARA DAR ALTURA A LA COLUMNA.
 - 10.- UNIDAD DE TRANSFERENCIA.
 - 11.- SISTEMA DE FILTROS PARA ELIMINAR GRASAS.
 - 12.- SALIDA DE ESPUMAS APAGADAS.
- NAD: NIVEL DE AGUAS DINAMICAS.
 NAE: NIVEL DE AGUAS ESTATICAS.

ESCALA: 1:25
 ACOT: cm

FIGURA 1

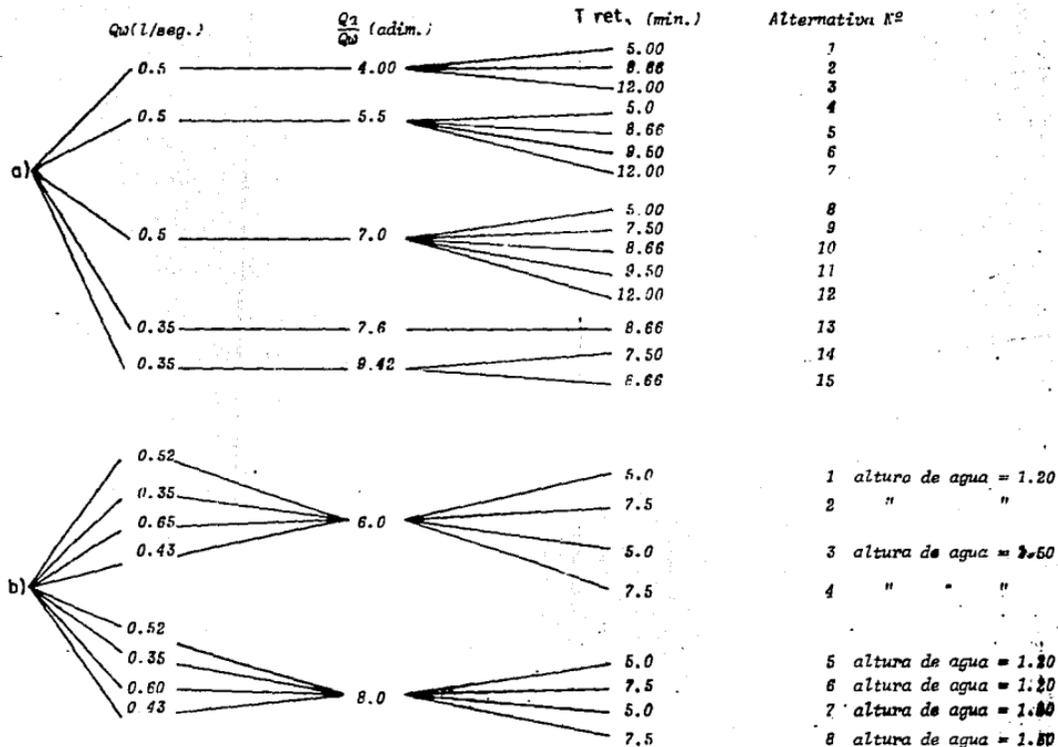


FIGURA III - 2 DIAGRAMA DE PRUEBAS DE ESPUMACION.

a) DIFUSOR DE BURBUJA GRUESA

b) DIFUSOR DE BURBUJA FINA.

Experimentación con Difusor de Burbuja Gruesa

En los cuadros III.5: A, B, C, D, E. se presentan los resultados de la operación en cuanto a caudal de agua, relación aire/agua, caudal de aire, tiempo de retención, altura de columna de agua, incremento de la altura de agua al inyectar aire y presión de inyección de aire. Para cada alternativa se calculó la media aritmética y su desviación estandar en la concentración de detergentes a la entrada y a la salida del tratamiento; por último se calcularon las eficiencias medias de remoción.

De los resultados obtenidos se infiere que para las relaciones aire/agua de 4.0 y 5.5, las remociones son bajas aún incrementando los tiempos de retención.

En el cuadro III.6 se presenta un resumen y en la gráfica III.1 se pueden observar las variaciones de remoción para cada condición. Cabe mencionar que para una relación aire/agua de 7.00 y un tiempo de retención de 8.66 min, la eficiencia es del 42%, y únicamente se incrementa un 9% aproximadamente al aumentar el tiempo de retención a 12 min: también si se mantiene constante el tiempo de retención (8.66 min) y se incrementa la relación aire/agua en un 8%, a 9.42 min la eficiencia se va linealizando. Pese a los resultados obtenidos, las eficiencias se encuentran muy por debajo de las recomendadas en la bibliografía.

| PARAMETROS DE OPERACION | | | | | | | | CONCENTRACION | | 54 |
|-------------------------|----------------|-------------|----------------|--------------|-----------|--------------|--------------------------------|---------------|----------|-------|
| Qw l/seg | Qa/Qw adim. | Qa l/seg | T.RET. min. | hcolem m. | Δ h m. | htotal m. | presión kg/cm. ² | INFL. | EFLUENTE | n (%) |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | 4X1 II | 4.89 | 4.28 | 12.5 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 3.23 | 1.84 | 43.03 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 3.23 | 1.66 | 48.60 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 3.23 | 2.18 | 32.50 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 2.62 | 2.47 | 5.72 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 4.12 | 3.54 | 14.07 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 3.62 | 4.19 | 15.74 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 2.95 | 2.23 | 24.40 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 3.17 | 2.21 | 30.28 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 2.95 | 1.53 | 48.13 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 3.21 | 1.92 | 40.18 |
| 0.50 | 4.00 | 2.0 | 5.0 | 1.15 | 0.12 | 1.27 | | 2.80 | 2.38 | 15. |
| | | | | | | | | 3.335 | 2.535 | 33.98 |
| | | | | | | | | 0.597 | 0.815 | - |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | | 4.89 | 2.89 | 40.89 |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | | 3.88 | 2.43 | 37.37 |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 3.88 | 2.79 | 28.09 | |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 2.62 | 1.51 | 42.36 | |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 4.12 | 1.77 | 57.03 | |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 3.62 | 2.32 | 35.91 | |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 4.20 | 3.36 | 20. | |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 4.31 | 2.20 | 48.95 | |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 1.30 | 1.28 | 1.53 | |
| 0.5 | 4.00 | 2.0 | 8.66 | 2.00 | 0.11 | 2.11 | 3.20 | 1.72 | 46.25 | |
| | | | | | | | 3.60 | 2.23 | 38.05 | |
| | | | | | | | 0.96 | 0.63 | - | |
| 0.35 | 4.00 | 2.0 | 12.0 | 1.94 | 0.10 | 2.04 | 3.88 | 2.86 | 26.28 | |
| 0.35 | 4.00 | 2.0 | 12.0 | 1.94 | 0.10 | 2.04 | 2.62 | 1.49 | 43.12 | |
| 0.35 | 4.00 | 2.0 | 12.0 | 1.94 | 0.10 | 2.04 | 4.12 | 1.92 | 53.39 | |
| 0.35 | 4.00 | 2.0 | 12.0 | 1.94 | 0.10 | 2.04 | 3.62 | 2.69 | 25.69 | |
| 0.35 | 4.00 | 2.0 | 12.0 | 1.94 | 0.10 | 2.04 | 3.95 | 2.49 | 36.96 | |
| 0.35 | 4.00 | 2.0 | 12.0 | 1.94 | 0.10 | 2.04 | 4.89 | 2.75 | 43.76 | |
| | | | | | | | 3.84 | 2.36 | 38.54 | |
| | | | | | | | 0.67 | 0.496 | - | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 4.89 | 3.07 | 37.21 | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 2.62 | 2.45 | 6.48 | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 4.12 | 2.88 | 30.09 | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 3.62 | 2.99 | 17.40 | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 3.17 | 3.16 | 0.31 | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 2.64 | 1.84 | 30.30 | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 2.42 | 1.90 | 21.48 | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 5.0 | 1.15 | 0.18 | 1.33 | 2.12 | 2.0 | 5.66 | |
| | | | | | | | 3.2 | 2.53 | 20.93 | |
| | | | | | | | 0.88 | 0.522 | - | |

CUADRO III. 5. A. RESULTADOS DE OPERACION ESPUMACION

| PARAMETROS DE OPERACION | | | | | | | | CONCENTRACION | | n(%) |
|-------------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------|--------------|---------------------------------|---------------|----------|--------|
| Q w l/seg. | Qo/Qw adim. | Qo l/seg. | T.MET min. | hcolumn. m. | Δh m | htotal m. | presion kg/cm ² . | INFL. | EFLUENTE | |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 4.89 | 2.83 | 42.12 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 3.23 | 2.01 | 37.77 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 3.23 | 2.56 | 20.74 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 3.23 | 2.18 | 32.50 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 3.23 | 1.60 | 50.46 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 3.88 | 2.84 | 26.80 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 2.62 | 1.77 | 32.44 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 4.12 | 2.06 | 50. |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 3.62 | 3.04 | 16.02 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 2.95 | 1.40 | 52.54 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 2.95 | 1.81 | 38.64 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 3.43 | 2.36 | 31.19 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 4.0 | 2.25 | 43.75 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 1.84 | 1.24 | 32.60 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 2.08 | 1.84 | 11.53 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 2.48 | 1.96 | 20.96 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 8.66 | 2.00 | 0.15 | 2.15 | | 1.60 | 0.88 | 45. |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 3.14 | 2.03 | 35.35 |
| | | | | | | | $\sigma =$ | 0.826 | 0.566 | - |
| 0.35 | 5.5 | 1.92 | 12.0 | 1.94 | 0.15 | 2.09 | | 4.89 | 2.60 | 46.83 |
| 0.35 | 5.5 | 1.92 | 12.0 | 1.94 | 0.15 | 2.09 | | 3.88 | 2.23 | 5.74 |
| 0.35 | 5.5 | 1.92 | 12.0 | 1.94 | 0.15 | 2.09 | | 2.62 | 1.62 | 6.18 |
| 0.35 | 5.5 | 1.92 | 12.0 | 1.94 | 0.15 | 2.09 | | 4.12 | 1.64 | 3.98 |
| 0.35 | 5.5 | 1.92 | 12.0 | 1.94 | 0.15 | 2.09 | | 3.62 | 2.91 | 80.38 |
| 0.35 | 5.5 | 1.92 | 12.0 | 1.94 | 0.15 | 2.09 | | 2.55 | 2.34 | 91.76 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 3.61 | 2.22 | 38.50 |
| | | | | | | | $\sigma =$ | 0.82 | 0.47 | - |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 4.09 | 2.75 | 56.23 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 2.62 | 2.58 | 48.47 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 4.12 | 1.90 | 46.11 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 3.62 | 3.58 | 98.89 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 3.17 | 1.81 | 57.09 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 2.82 | 1.62 | 57.44 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 2.80 | 2.66 | 95. |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 1.70 | 1.64 | 96.47 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 0.77 | 0.55 | 71.42 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 0.77 | 0.95 | 123.37 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 0.60 | 0.86 | 143.33 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 0.60 | 1.05 | 175. |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 2.82 | 1.83 | 64.89 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 1.62 | 0.87 | 53.70 |
| 0.5 | 7.0 | 3.5 | 5.0 | 1.15 | 0.22 | 1.37 | | 0.77 | 0.56 | 72.72 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 2.25 | 1.68 | 25.33 |
| | | | | | | | $\sigma =$ | 1.34 | 0.87 | - |

CUADRO III. 5. B RESULTADOS DE OPERACION ESPUMACION

| PARAMETROS DE OPERACION | | | | | | | | CONCENTRACION | | 56 |
|-------------------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------|---------------|-------------------------------|---------------|----------|-------|
| Qw l/seg. | Qo/Qw adim. | Qa l/seg. | T.NET. min. | hcolumn. m. | Δh m. | h total m. | presión kg/cm ² | INFL. | EFLUENTE | n(%) |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 9.5 | 2.19 | 0.15 | 2.34 | | 1.72 | 1.56 | 9.30 |
| 0.5 | 5.5 | 2.75 | 9.5 | 2.19 | 0.15 | 2.34 | | 1.92 | 1.28 | 37.50 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ $\bar{v} =$ | 1.95 | 1.36 | 38.25 |
| | | | | | | | | 0.23 | 0.16 | - |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.68 | 1.48 | 16.66 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.78 | 1.48 | 16.85 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.88 | 1.48 | 25.53 |
| 0.5 | 7 | 3.5 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 2.01 | 1.51 | 24.87 |
| 0.5 | 7 | 3.5 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | - | - | - |
| 0.5 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | - | - | - |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | - | - | - |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 3.04 | 2.28 | 25.0 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 3.04 | 2.50 | 17.7 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 2.46 | 2.02 | 38.35 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 2.46 | 2.16 | 47.94 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | - | - | - |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 2.98 | 2.08 | 30.20 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 2.88 | 2.16 | 25.0 |
| 0.35 | 7 | 2.45 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.80 | 1.30 | 27.77 |
| 0.5 | 7 | 7.42 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.80 | 1.82 | 43.33 |
| 0.5 | 7 | 7.42 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | - | - | - |
| 0.5 | 7 | 3.5 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.87 | 1.54 | 17.64 |
| 0.5 | 7 | 3.5 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.87 | 1.28 | 31.55 |
| 0.5 | 7 | 3.5 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.87 | 1.12 | 40.10 |
| 0.5 | 7 | 3.5 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 1.87 | 1.48 | 28.85 |
| 0.5 | 7 | 3.5 | 7.5 | 1.21 | 0.20 | 1.41 | | 2.01 | 1.68 | 38.34 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ $\bar{v} =$ | 2.19 | 1.65 | 24.66 |
| | | | | | | | | 0.49 | 0.43 | - |

CUADRO III. 5. C RESULTADOS DE OPERACION ESPUMACION

| PARAMETROS DE OPERACION | | | | | | | | CONCENTRACION | | 57 |
|-------------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|-----------|---------------|---------------------------------|---------------|----------|-------|
| Qw l/seg. | Qa/Qw adim. | Qa l/seg. | T.RET. min. | hcolumn m. | Δ h m. | h total m. | presion kg/cm ² . | INFL. | EFLUENTE | n (%) |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 4.49 | 2.10 | 53.22 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 2.88 | 1.77 | 6.14 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 1.60 | 1.48 | 9.25 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 3.44 | 2.12 | 6.16 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 1.32 | 0.52 | 3.99 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 2.37 | 2.03 | 8.56 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 0.60 | 0.58 | 9.66 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 0.60 | 0.58 | 9.66 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 4.89 | 2.59 | 5.29 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 2.62 | 1.71 | 6.52 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 4.12 | 1.86 | 4.51 |
| 0.50 | 7.00 | 3.5 | 8.66 | 2.00 | 0.20 | 2.20 | | 3.62 | 1.46 | 4.03 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 2.71 | 1.57 | 42.06 |
| | | | | | | | $\sigma =$ | 1.40 | 0.65 | - |
| 0.5 | 7.00 | 3.5 | 9.5 | 2.18 | 0.15 | 2.33 | | 1.68 | 1.32 | 7.85 |
| 0.5 | 7.00 | 3.5 | 9.5 | 2.18 | 0.15 | 2.33 | | 1.92 | 1.04 | 5.41 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 1.80 | 1.18 | 34.44 |
| | | | | | | | $\sigma =$ | 0.12 | 0.14 | - |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 3.23 | 1.77 | 5.47 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 3.23 | 2.56 | 7.92 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 3.88 | 1.77 | 4.56 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 2.62 | 1.94 | 7.40 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 4.12 | 1.10 | 2.66 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 3.62 | 2.07 | 5.71 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 2.95 | 1.55 | 5.25 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 2.95 | 0.99 | 3.35 |
| 0.35 | 7.0 | 2.45 | 12.00 | 1.94 | 0.22 | 2.16 | | 2.56 | 1.99 | 7.77 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 2.34 | 1.75 | 45.99 |
| | | | | | | | $\sigma =$ | 0.51 | 0.46 | - |

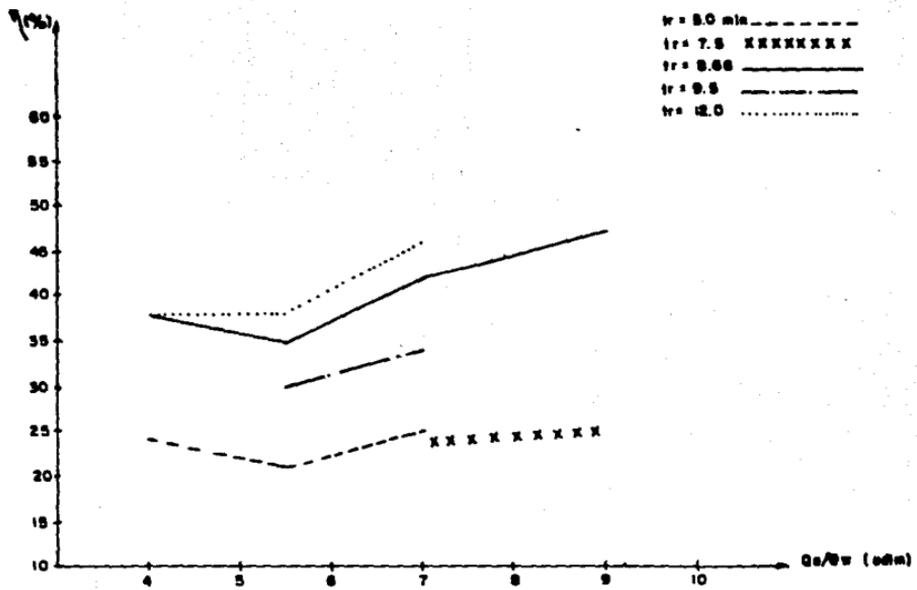
CUADRO III. 5.D RESULTADOS DE OPERACION ESPUMACION

| PARAMETROS DE OPERACION | | | | | | | | CONCENTRACION | | 58 |
|-------------------------|----------------|--------------|----------------|---------------|-----------|---------------|-------------------------------|---------------|----------|-------|
| Qw l/seg. | Qo/Qw adim. | Qo l/seg. | T.RET. min. | hcolumn m. | A h m. | h total m. | presión kg/cm ² | INFL. | EFLUENTE | n (%) |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 1.90 | 1.60 | 15.15 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 1.84 | 1.50 | 18.50 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 1.84 | 1.46 | 20.65 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 1.53 | 1.30 | 9.80 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 1.53 | 1.31 | 14.38 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 6.90 | 1.40 | 79.71 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 6.90 | 1.22 | 82.32 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 3.33 | 1.85 | 44.44 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 2.51 | 1.38 | 45.01 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 4.59 | 2.64 | 42.48 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 1.94 | 1.16 | 40.20 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 2.22 | 1.54 | 30.63 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 2.22 | 1.51 | 31.98 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 2.20 | 1.38 | 37.27 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 2.20 | 1.58 | 28.18 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 2.20 | 1.58 | 28.18 |
| 0.5 | 7.6 | 3.8 | 8.66 | 2.00 | 0.25 | 2.25 | | 1.98 | 1.46 | 26.26 |
| | | | | | | | $\sqrt{x} =$ | 2.78 | 1.57 | 43.52 |
| | | | | | | | $y =$ | 1.61 | 0.35 | - |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 8.66 | 1.40 | 0.30 | 1.70 | | 1.71 | 0.98 | 42.69 |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 8.66 | 1.40 | 0.30 | 1.70 | | 1.86 | 1.05 | 43.54 |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 8.66 | 1.40 | 0.30 | 1.70 | | 1.86 | 0.90 | 51.61 |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 8.66 | 1.40 | 0.30 | 1.70 | | 1.86 | 0.96 | 48.38 |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 8.66 | 1.40 | 0.30 | 1.70 | | 1.86 | - | - |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 8.66 | 1.40 | 0.30 | 1.70 | | 1.83 | 0.97 | 46.99 |
| | | | | | | | $\sqrt{x} =$ | 0.05 | 0.05 | - |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 7.5 | 1.20 | 0.33 | 1.53 | | 2.58 | 1.39 | 70.0 |
| 0.35 | 9.42 | 3.3 | 7.5 | 1.20 | 0.33 | 1.53 | | 2.63 | 1.446 | 45.0 |
| | | | | | | | $\sqrt{x} =$ | 2.60 | 1.418 | 45.5 |
| | | | | | | | $y =$ | 0.02 | 0.20 | - |

CUADRO III. 5. E. RESULTADOS DE OPERACION ESPUMACION

| Qw (1/seg) | Qa (1/seg) | Qa/Qw (Adim.) | hc.w. (m) | Tret. (min.) | S. Inf. (mg/l) | A. M. Efl. (mg/l) | Efic. % | r h (m) | $\frac{CO-C}{C}$ (adim.) | adim. Yc | Ef. calc. % |
|---------------|---------------|------------------|--------------|-----------------|-------------------|----------------------|------------|------------|-----------------------------|-------------|----------------|
| 0.5 | 2.0 | 4.00 | 1.15 | 5.00 | 3.33 | 2.53 | 23.98 | 4.6 | 0.316 | 0.328 | 24.70 |
| 0.5 | 2.0 | 4.00 | 2.00 | 8.66 | 3.60 | 2.23 | 38.05 | 8.0 | 0.614 | 0.432 | 30.20 |
| 0.35 | 1.40 | 4.00 | 1.93 | 12.00 | 3.84 | 2.36 | 38.54 | 7.72 | 0.627 | 0.422 | 29.70 |
| 0.5 | 2.75 | 5.50 | 1.15 | 5.00 | 3.2 | 2.53 | 20.93 | 6.32 | 0.264 | 0.377 | 27.40 |
| 0.5 | 2.75 | 5.50 | 2.00 | 8.66 | 3.14 | 2.03 | 35.35 | 11.00 | 0.547 | 0.551 | 35.50 |
| 0.5 | 2.75 | 5.50 | 2.19 | 9.50 | 1.95 | 1.36 | 30.25 | 12.04 | 0.434 | 0.599 | 37.50 |
| 0.35 | 1.92 | 5.50 | 1.93 | 12.0 | 3.61 | 2.22 | 38.50 | 10.61 | 0.626 | 0.534 | 34.80 |
| 0.5 | 3.5 | 7.00 | 1.15 | 5.0 | 2.25 | 1.68 | 25.33 | 8.05 | 0.339 | 0.434 | 30.3 |
| 0.42 | 3.5 | 7.00 | 1.44 | 7.5 | 2.19 | 1.65 | 24.55 | 10.08 | 0.327 | 0.511 | 33.8 |
| 0.5 | 3.5 | 7.00 | 2.00 | 8.66 | 2.71 | 1.57 | 42.06 | 14.00 | 0.726 | 0.702 | 41.2 |
| 0.5 | 3.5 | 7.00 | 2.19 | 9.50 | 1.80 | 1.18 | 34.44 | 15.33 | 0.525 | 0.782 | 43.9 |
| 0.35 | 2.45 | 7.00 | 1.93 | 12.00 | 3.24 | 1.75 | 45.99 | 13.51 | 0.851 | 0.658 | 39.7 |
| 0.5 | 3.8 | 7.60 | 2.00 | 8.66 | 2.78 | 1.57 | 43.52 | 15.2 | 0.771 | 0.774 | 43.6 |
| 0.35 | 3.3 | 9.42 | 1.21 | 7.50 | 2.60 | 1.418 | 45.50 | 11.40 | 0.833 | 0.57 | 36.0 |
| 0.35 | 3.5 | 9.42 | 1.40 | 8.66 | 1.83 | 0.97 | 47.00 | 13.19 | 0.886 | 0.658 | 39.7 |

CUADRO III.6 EFICIENCIAS MEDIAS DE REMOCION PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION CON DIFUSOR DE BURBUJA GRUESA (TIPO CEBOLLA).



GRAFICA III: VARIACIONES DE LA REMOCION DE DETERGENTES PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION (BURBUJA FINA)

Para observar el comportamiento del proceso, con los resultados obtenidos se determinó la ecuación que mejor representa al fenómeno, utilizándose para ello métodos analíticos (Ref. 4).

En el anexo "A" cuadro 1 se presentan los parámetros calculados, así como el desarrollo del análisis de los coeficientes de correlación, siendo de 0.681 para una curva de tipo exponencial; posteriormente se calcularon los valores de las constantes "a" (0.226) y "b" (0.081), por lo que la ecuación que mejor describe al proceso de espumación es:

$$y = A \exp. (bx)$$

Sustituyendo $y = 0.226 \exp (0.081 x)$

Donde:

x= Parámetro que influye en el proceso de espumación

x= rh en (m.)

r= Relación aire/agua (adimensional)

h= Altura de columna de agua en (m)

y= F (adim.) función que involucra la remoción de detergentes

$$F = \frac{C_0 - C}{C}$$

C₀= concentración de S.A.A.M. en el influente

C= concentración de S.A.A.M. en el efluente

Una vez obtenida la curva de ajuste, se determinó F_{calc} o Y_c y la eficiencia de remoción calculada con la expresión:

$$F = \frac{C_0 - C}{C}$$

$$F = \frac{E}{1 - E_f}$$

De donde: $Zf = \frac{F}{1 - E_f} (100)$

Para confirmar la dependencia entre las variables aplicadas a la curva de ajuste (exponencial) se procedió a realizar un análisis de variancia (anexo "A" cuadros 2 y 3).

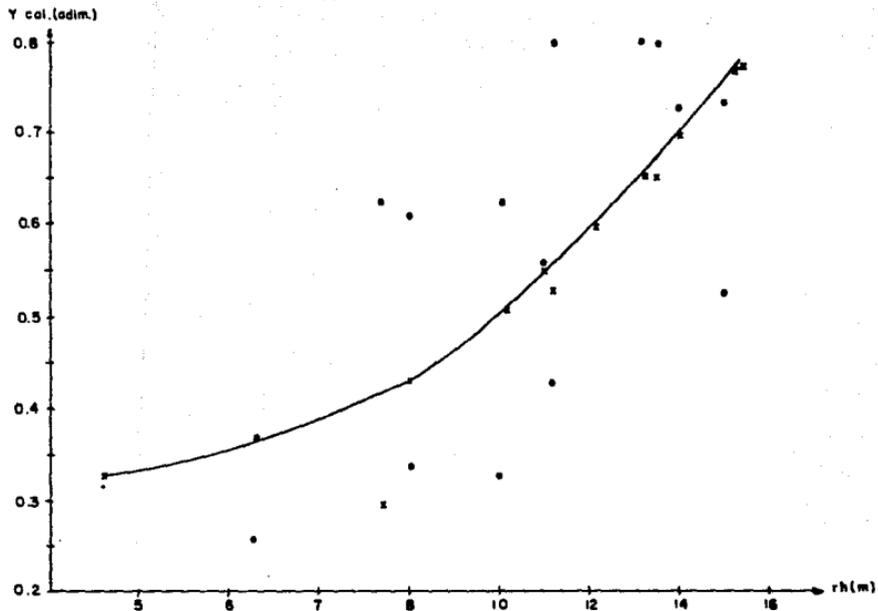
En el cuadro 3 se desarrolla la tabla ANOVA, en la cual se calcula el valor de F_c y se realiza una prueba de hipótesis con un nivel de significancia del 5%, es decir un error de 5%, siendo la hipótesis nula que existe dependencia entre las variables analizadas y la hipótesis alternativa que no existe dicha dependencia.

$$H_0: b = 0$$

$$H_1: b \neq 0$$

Aceptándose la hipótesis nula, por lo que sí hay dependencia

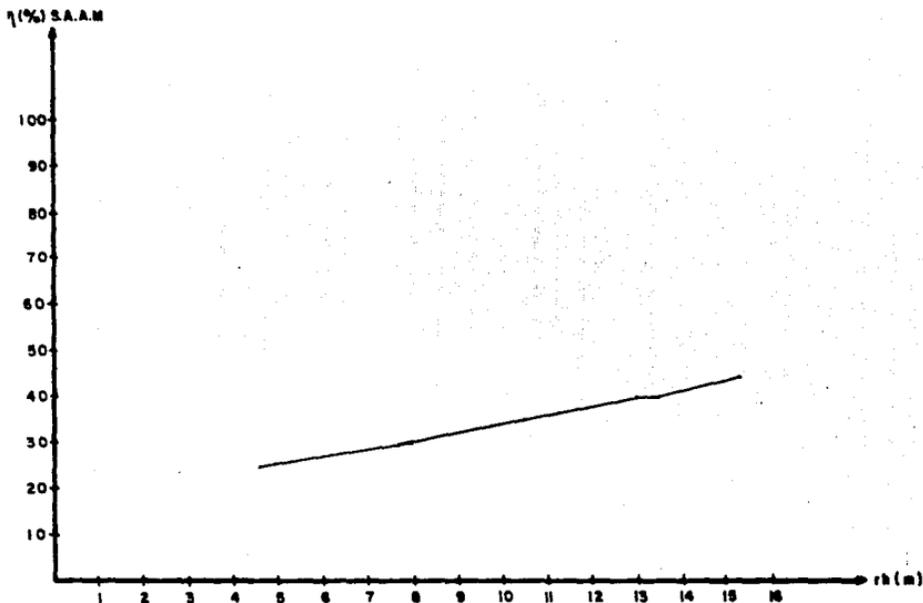
Finalmente, en la gráfica III.2 se muestra la curva de ajuste con las ordenadas "Y" calculadas y el parámetro del proceso (τ_h). Los puntos dispuestos representan las ordenadas "Y" obtenidas experimentalmente. Ya en la



GRAFICA III.2 CURVA DE AJUSTE CON LAS ORDENADAS "Y" CALCULADA PARA EL PARAMETRO rh.

NOTA: LOS PUNTOS DISPERSOS REPRESENTAN LAS ORDENADAS "Y" OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE.

**GRAFICA III. 3 EFICIENCIAS DE REMOCION PARA LAS BASES DE
DISEÑO DE ESPUMACION CON DIFUSOR DE BURBUJA
GRUESA**



gráfica III.3 se presentan las eficiencias de remoción para las bases de diseño de espumación.

Experimentación con difusor de burbuja fina

De acuerdo a los resultados obtenidos con el difusor de burbuja gruesa, se eligió un rango menor para experimentar reduciendo el tamaño de burbuja. En el cuadro III.7.A, B se resumen los resultados para dos relaciones de aire/agua (6 y 8); así como para dos tiempos de retención 5 y 7.5; y dos alturas de agua 1.20 y 1.50 m.

En dichos cuadros se calcularon las concentraciones medias y desviación estándar de detergentes para la entrada y salida del proceso y en la gráfica III.4 se muestran las variaciones obtenidas. La eficiencia máxima obtenida fue de 24.36% para la relación de 8.00 y $h = 1.50$ m.; como se puede ver es muy baja. En el cuadro III.8 se presenta un resumen de las eficiencias de remoción para diferentes condiciones y en el anexo "A" cuadro 4, se realizó un ajuste de curva resultando exponencial cuyas constantes resultaron "A" (0.0026) y "b" (0.457) por lo que:

$$Y = 0.0026 \text{ Exp } (0.457 x)$$

El significado de las variables se describió para el difusor de burbuja gruesa.

| PARAMETROS DE OPERACION | | | | | | | | CONCENTRACION | | 66 |
|-------------------------|----------------|-------------|--------------|---------------|-----------|---------------|--------------------------------|---------------|----------|-------|
| Q w l/seg | Qa/Qw adim. | Qo l/seg | T.RET min | h colum m. | Δ h m. | h total m. | presión kg/cm. ² | INFL. | EFLUENTE | n (%) |
| 0.52 | 6 | 3.12 | 5.0 | 1.20 | 0.10 | 1.30 | | 2.06 | 1.87 | 9.22 |
| 0.52 | 6 | 3.12 | 5.0 | 1.20 | 0.10 | 1.30 | | 2.06 | 1.87 | 9.22 |
| 0.52 | 6 | 3.12 | 5.0 | 1.20 | 0.10 | 1.30 | | 2.06 | 1.87 | 6.79 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 2.06 | 1.82 | 8.45 |
| | | | | | | | $\sqrt{\bar{v}} =$ | 0.0 | 1.89 | - |
| 0.35 | 6 | 2.10 | 7.5 | 1.20 | 0.10 | 1.30 | | 2.51 | 0.820 | 1.19 |
| 0.35 | 6 | 2.10 | 7.5 | 1.20 | 0.10 | 1.30 | | 2.51 | 2.48 | 0.0 |
| 0.35 | 6 | 2.10 | 7.5 | 1.20 | 0.10 | 1.30 | | 2.51 | 2.51 | 8.36 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 2.51 | 2.30 | 3.18 |
| | | | | | | | $\sqrt{\bar{v}} =$ | 0.0 | 2.43 | - |
| | | | | | | | | | 0.092 | |
| 0.60 | 6 | 3.60 | 5.0 | 1.50 | 0.13 | 1.63 | | 2.06 | 1.54 | 25.24 |
| 0.60 | 6 | 3.60 | 5.0 | 1.50 | 0.13 | 1.63 | | 2.06 | 1.60 | 18.44 |
| 0.60 | 6 | 3.60 | 5.0 | 1.50 | 0.13 | 1.63 | | 2.06 | 1.64 | 20.38 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 2.06 | 1.62 | 21.36 |
| | | | | | | | $\sqrt{\bar{v}} =$ | 0.0 | 0.058 | - |
| 0.43 | 6 | 2.58 | 7.5 | 1.50 | 0.13 | 1.63 | | 2.06 | 1.64 | 28.39 |
| 0.43 | 6 | 2.58 | 7.5 | 1.50 | 0.13 | 1.63 | | 2.06 | 2.00 | 13.59 |
| 0.43 | 6 | 2.58 | 7.5 | 1.50 | 0.13 | 1.63 | | 2.06 | 1.97 | 4.37 |
| | | | | | | | $\bar{x} =$ | 2.06 | 1.87 | 9.22 |
| | | | | | | | $\sqrt{\bar{v}} =$ | 0.0 | 0.14 | |

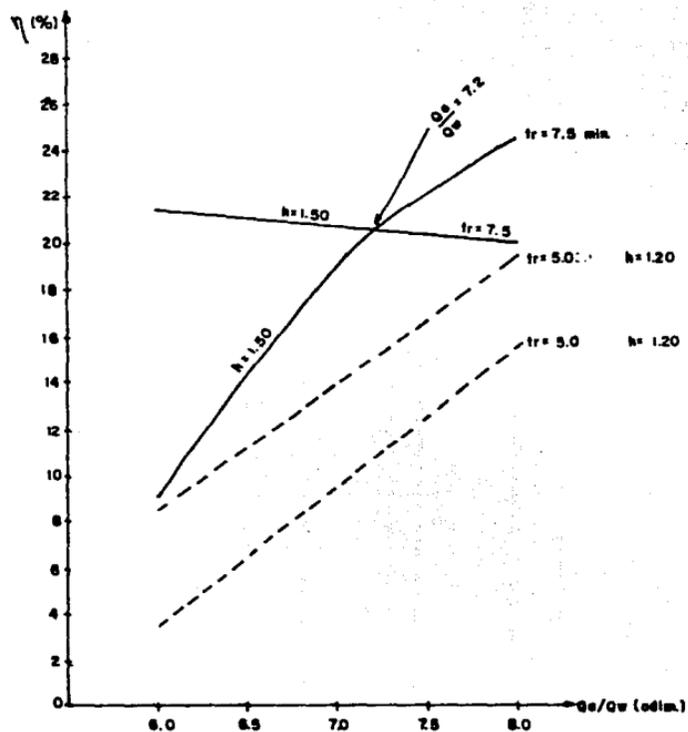
CUADRO III. 7. A RESULTADOS DE OPERACION ESPUMACION.DIFUSOR DE BURBUJA FIN A

| PARAMETROS DE OPERACION | | | | | | | | CONCENTRACION | | n (%) |
|--------------------------|---|--------------------------|------------------|--------------------------|----------|--------------------------|--|---------------|----------|-------|
| Q _W l/seg. | Q _a /Q _w adim. | Q _a l/seg. | T.M.E.T. min. | h _{cohem} m. | Δh m. | h _{total} m. | presión ₂ kg/cm ² . | INFL. | EFLUENTE | |
| 0.52 | 8 | 4.12 | 5.0 | 1.20 | 0.14 | 1.34 | | 2.48 | 2.18 | 12.09 |
| 0.52 | 8 | 4.12 | 5.0 | 1.20 | 0.14 | 1.34 | | 2.48 | 1.90 | 23.38 |
| 0.52 | 8 | 4.12 | 5.0 | 1.20 | 0.14 | 1.34 | | 2.48 | 1.90 | 23.38 |
| | | | | | | | √X = | 2.48 | 1.99 | 19.76 |
| | | | | | | | = | 0.0 | 0.131 | - |
| 0.35 | 8 | 2.8 | 7.5 | 1.20 | 0.14 | 1.34 | | 2.34 | 1.80 | 23.07 |
| 0.35 | 8 | 2.8 | 7.5 | 1.20 | 0.14 | 1.34 | | 2.34 | 1.77 | 24.35 |
| 0.35 | 8 | 2.8 | 7.5 | 1.20 | 0.14 | 1.34 | | 2.34 | 2.35 | - |
| | | | | | | | √X = | 2.34 | 1.97 | 15.81 |
| | | | | | | | = | 0.0 | 0.23 | - |
| 0.60 | 8 | 4.80 | 5.00 | 1.50 | 0.17 | 1.67 | | 2.00 | 1.57 | 21.5 |
| 0.60 | 8 | 4.80 | 5.00 | 1.50 | 0.17 | 1.67 | | 2.00 | 1.97 | 1.5 |
| 0.60 | 8 | 4.80 | 5.00 | 1.50 | 0.17 | 1.67 | | 2.00 | 1.26 | 37.0 |
| | | | | | | | √X = | 2.00 | 1.60 | 20.0 |
| | | | | | | | = | 0.00 | 0.25 | - |
| 0.43 | 8 | 3.44 | 7.50 | 1.50 | 0.17 | 1.67 | | 2.34 | 1.83 | 21.79 |
| 0.43 | 8 | 3.44 | 7.50 | 1.50 | 0.17 | 1.67 | | 2.34 | 1.66 | 29.05 |
| 0.43 | 8 | 3.44 | 7.50 | 1.50 | 0.17 | 1.67 | | 2.34 | 1.83 | 21.79 |
| | | | | | | | √X = | 2.34 | 1.77 | 24.36 |
| | | | | | | | = | 0.00 | 0.07 | - |

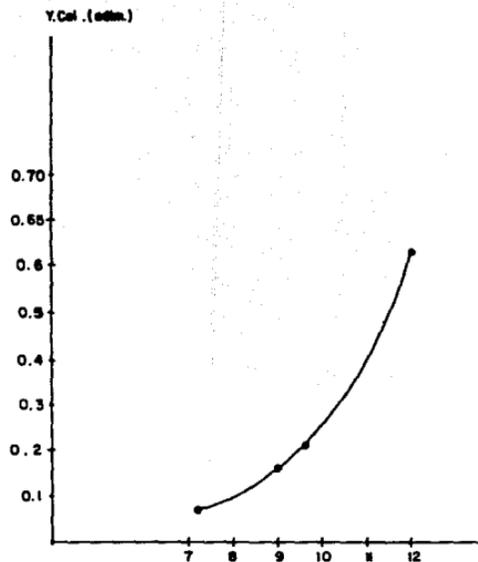
CUADRO III. 7. B. RESULTADOS DE OPERACION ESPUMACION DE BURBUJA FINA.

| Q_w (l/seg) | Q_a (l/seg) | Q_a/Q_w (Adim.) | hc.w. (m) | Tret. (min.) | S. A. Inf. | A. M. Efl. | Efic. % | r h (m) | $\frac{CO-C}{C}$ | Y_c adim. | Ef. calc. % |
|------------------|------------------|----------------------|--------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------------|----------------|----------------|
| 0.52 | 3.12 | 6.00 | 1.20 | 5.00 | 2.06 | 1.89 | 8.45 | 7.2 | 0.09 | 0.07 | 6.50 |
| 0.65 | 3.90 | 6.00 | 1.50 | 5.00 | 2.06 | 1.62 | 21.36 | 9.0 | 0.27 | 0.16 | 13.71 |
| 0.35 | 2.10 | 6.00 | 1.20 | 7.5 | 2.51 | 2.43 | 3.18 | 7.2 | 0.033 | 0.07 | 6.50 |
| 0.43 | 2.58 | 6.00 | 1.50 | 7.5 | 2.06 | 1.87 | 9.22 | 9.00 | 0.102 | 0.16 | 13.71 |
| 0.52 | 4.16 | 8.00 | 1.20 | 5.0 | 2.48 | 1.99 | 19.76 | 9.6 | 0.246 | 0.21 | 17.29 |
| 0.60 | 4.8 | 8.00 | 1.50 | 5.0 | 2.00 | 1.60 | 20.0 | 12.0 | 0.25 | 0.63 | 36.5 |
| 0.35 | 2.80 | 8.00 | 1.20 | 7.5 | 2.34 | 1.97 | 15.81 | 9.6 | 0.188 | 0.21 | 17.29 |
| 0.43 | 3.44 | 8.00 | 1.50 | 7.5 | 2.34 | 1.77 | 24.36 | 12.0 | 0.322 | 0.63 | 36.5 |

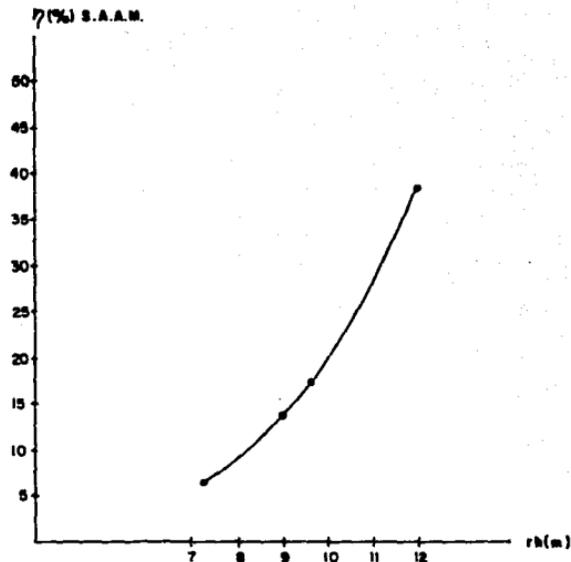
CUADRO III.8 EFICIENCIAS MEDIAS DE REMOCION PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION CON DIFUSOR DE BURBUJA FINA DE PIEDRA POROSA MCA. DEGREMONT PELLETIER.



GRAFICA. III.4. VARIACION DE LA REMOCION DE DETERGENTES PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION (BURBUJA GRUESA)



GRAFICA III.5 CURVA DE AJUSTE CON LAS ORDENADA "Y" CALCULADA PARA EL PARAMETRO (rh)



GRAFICA III.6 EFICIENCIA DE REMOCION PARA LAS BASES DE DISEÑO DE ESPUMACION CON DIFUSOR DE BUBUJA GRUESA

Finalmente se confirmó la dependencia entre las variables aplicadas a la curva de ajuste realizando un análisis de varianza (anexo "A" cuadro no. 5 y 6).

En el cuadro 6, se calculó la tabla ANOVA, en la cual se realizó una prueba de Hipótesis con un error del 5%; tomando la hipótesis nula de la dependencia de las variables analizadas contra la hipótesis alternativa de independencia de las variables.

$$H_0: b = 0$$

$$H_1: b \neq 0$$

Aceptándose la hipótesis nula, por lo que sí hay dependencia

En las gráficas III.5; III.6 se muestra la curva de ajuste y las eficiencias de remoción para las bases de diseño de espumación.

III.2 Tratamiento Químico

Las aguas residuales son una fuente de aportación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo que en cantidades excesivas provoca efectos en los cuerpos receptores (lagos, ríos, estanques, etc.) como es el crecimiento de plantas acuáticas y el de contribuir a la eutroficación, que en la mayoría de los casos limitan el aprovechamiento de los recursos afectados. El tratamiento avanzado se utiliza para remover contaminantes que se encuentran presentes en las aguas residuales como partículas disueltas coloidales o suspen-

didias dependiendo del tamaño de la partícula; pues algunas son muy pequeñas no siendo posible sedimentarlas, por lo que surge la alternativa de aglutinar y separarlas por gravedad.

El tratamiento químico consta de tres etapas para la remoción de contaminantes:

- 1) **Coagulación.** Consiste en la adición de un agente químico a una dispersión coloidal, la cual resulta de desestabilizar las partículas disminuyendo la carga eléctrica de las partículas coloidales y formando hidroxidos complejos, es decir aquí se utilizan fuerzas electrostáticas o interiónicas.
- 2) **Floculación.** Implica la absorción y la formación de enlaces partícula-partícula formando así conglomerados (flóculos), los cuales entrapan los contaminantes formando complejos insolubles precipitándolos en la solución y separándolos por gravedad (sedimentación, flotación o filtración).
- 3) **Clarificación.** Es un proceso en el cual se separan y precipitan los flóculos del agua mediante sedimentadores. Finalmente al producto del precipitado se le dispone, ya sea para su tratamiento o como relleno sanitario.

Uno de los objetivos principales del tratamiento químico es disminuir los compuestos de fósforo, determinar dosis mínimas de productos químicos, establecer las condiciones de operación de máxima economía, obtener la mayor eficiencia de remoción de fosfatos ($P-PO_4$); de sólidos suspendidos (S.S.T.); materia orgánica como (D.Q.O.) sol.; de turbiedad, color y algunos metales pesados como el hierro y el manganeso.

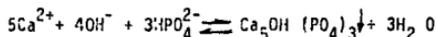
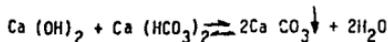
La remoción del fósforo como nutriente es una importante operación. El fósforo se encuentra en tres formas: ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico.

La amplia gama de reactivos químicos a usar depende de la economía y de su efectividad; los más empleados son: cloruro ferrico ($FeCl_3$); cal química (CaO); alumbre ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$) o sulfato de aluminio; combinaciones de hierro (Fe^{3+}) - cal (CaO); sulfato de aluminio (Al^{3+}) - ($Al(CaO)$); polímeros catiónicos y aniónicos, algunos no iónicos, arcillas y otras ayudas. En el capítulo II cuadro 1 se presenta la aplicabilidad de los coagulantes químicos y sus criterios de selección. A continuación se desarrollan algunas reacciones llevadas a cabo con los coagulantes (Ref. 5).

Coagulación con Cal

La cal reacciona con la alcalinidad de bicarbonatos, o compuestos ortofosfóricos para formar los precipitados insolubles de carbonato de calcio o

hidroxiapatita como se muestra en las ecuaciones siguientes:



De donde:

Una molécula de hidróxido de calcio reacciona con una molécula de bicarbonato de sodio dando lugar a la formación de dos moléculas de carbonato de calcio, que se precipita, más dos moléculas de agua, esto es en el caso de carbonatos; si se tratan fosfatos; reaccionan cinco moléculas de ion calcio con cuatro moléculas de ion oxhidrilo y tres moléculas de ion fósforo ácido, produciendo una molécula de hidroxifostato de calcio, que se precipita, más tres moléculas de agua.

El fosfato de calcio o hidroxiapatita es un precipitado cristalino de composición variable.

La relación calcio: fósforo varía en relación de 1:3 a 2:0, la cual resulta de substituir los iones hidrógeno y calcio de la superficie y dentro de la estructura cristalina. Los polifosfatos se remueven en presencia de ortofosfatos.

El fósforo también se absorbe en la superficie de las partículas de carbonato de calcio.

La solubilidad del fosfato de calcio baja al incrementar el pH (potencial hidrógeno) incrementándose así la remoción.

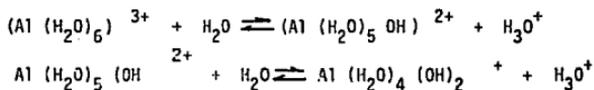
La dosis de cal para alcanzar una remoción de fosfatos dada o turbidez está en función de la alcalinidad del agua.

A un pH de 9.5, la mayoría del fósforo se precipita como hidroxiapatita, esto se acompaña por alta turbidez que es común con precipitados de calcio y por partículas coloidales dispersas de compuestos de calcio.

A un pH mayor de 9.5, los compuestos de magnesio tienden a producir un efluente altamente clarificado, el hidróxido de magnesio que se forma es de naturaleza gelatinosa y dificulta su disposición final, la presencia de magnesio afecta la calidad del efluente y el manejo del lodo específico.

Coagulación con Compuestos de Aluminio

Los iones aluminio entran en una serie de reacciones hidrolíticas con el agua para formar especies multivalentemente cargadas. Estas especies tienen un rango de compuesto positivo a bajo pH, negativos a alto pH a continuación se muestran las ecuaciones consecutivas siguientes:



El ión complejo hexaacuualuminato reacciona con una molécula de agua, dando lugar a una reacción reversible, formándose el ión pentahidroxialuminato, complejo también y un ión hidronio. En una segunda reacción, el ión pentahidroxialuminato se vuelve a combinar en otra reacción reversible con una molécula de agua para formar el ión tetradihidroxialuminato y un ión hidronio, llevándose a cabo la reacción en medio ácido.

Los fosfatos se remueven por acomplejamiento con aluminio o por absorción sobre flóculos de hidróxido de aluminio.

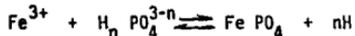
Si las reacciones de hidrólisis no se efectúan, se puede requerir aproximadamente de 0.87 kg de aluminio por kg de fósforo removido. Actualmente la relación es utilizada de 2 ó 3 kg de aluminio requerido por cada kg de fósforo removido.

El sulfato de aluminio es la sal más común usada para la coagulación de las aguas residuales.

Coagulación con Hierro

Al igual que para el aluminio las sales de hierro, particularmente el cloruro férrico, presenta reacciones similares utilizándose aproximadamente 1.8 kg de hierro por cada kg de fósforo removido, mas aproximadamente 10 mg/l de hierro, para formación de hidróxido.

La ecuación de la reacción es la siguiente:



El ión férrico reacciona con el ácido fosfórico (sustituido n veces) para formar reversiblemente el fosfato férrico y el número de moléculas de hidrógeno correspondiente a la cantidad de sustituciones en el ácido, el tratamiento químico consta de tres procesos unitarios coagulación, floculación y sedimentación, los cuales se preceden uno del otro:

Mezcla Rápida:

Es un proceso unitario en el cual al agregar agentes químicos al agua se reducen las fuerzas que mantienen separadas las partículas en suspensión, por lo cual se desestabilizan las partículas suspendidas y la precipitación de las disueltas siendo importante balancear la rapidez de dispersión y los tiempos de contacto de los agentes químicos con las partículas del agua, pues un mal mezclado propicia zonas pobres y pH irregulares.

Los tipos de mezcladores existentes son dos: hidráulicos y mecánicos. Los hidráulicos pueden ser de un resalto hidráulico en un Parshall, en un canal con sección reducida y en un vertedor; algunas consideraciones de diseño para tener un mezclado rápido eficiente son: que el régimen de flujo sea turbulento, para el cual se puede medir por el número de Froude considerándose entre 4.5 y 9.0; el tiempo de mezclado sea menor de 1 seg., la potencia disipada en el cambio de régimen sea de 3.5 a 7.0 h.p. por cada $m^3/\text{seg.}$, de capacidad y finalmente el gradiente de velocidad sea de 300 a 1 500 seg.^{-1} (Ref. 6).

La agitación mecánica se lleva a cabo con paletas tipo propela, con paletas planas y con propelas insertadas en un conducto cerrado como en una tubería. Los parámetros que rigen el mezclado son el número de Reynolds, el cual debe tener un flujo turbulento con un valor mayor a 100,000 unidades; el tiempo de contacto de los reactivos con el seno del líquido de 30 a 120 seg., y que el gradiente de velocidad se encuentra entre 300 y 1 500 seg.^{-1} (Ref. 7) en el mezclado rápido el gradiente de velocidad es una medida directa de la velocidad de coalición entre partículas y resultado del movimiento del fluido en una disipación de energía provocada por la velocidad de la partícula y la fuerza de atracción.

Algunas otras consideraciones de diseño son el evitar esfuerzos cortantes que formen vórtices los cuales reducen el efecto de la coagulación para esto es necesario colocar deflectores en tanques circulares; en los tanques

rectangulares los vértices funcionan como deflectores. También es recomendable que la colocación de la flecha sea vertical, que el impulsor se coloque a un diámetro de la misma del fondo del tanque y que su diámetro propiamente no exceda 1/3 el diámetro del tanque de mezclado (Ref. 7).

Criterios de Diseño

En la unidad de mezcla rápida se seleccionaron tres tiempos de mezclado o de retención hidráulica 30, 60 y 120 seg., que para un caudal de 0.5 l/seg., el volúmen es 15, 30 y 60 litros respectivamente; el gradiente de velocidad se seleccionó de 300 a 1 500 seg.^{-1} ; además se consideraron las condiciones extremas de temperatura de 12 y 27° C en las aguas renovadas de las plantas de tratamiento del DDF.

Para favorecer al mezclado se requiere tener un flujo turbulento caracterizado por el número de Reynolds, el cual debe ser mayor a 100 000 unidades y de lo cual se tiene:

$$NRe = \frac{D^2 n P}{M}$$

D = Diámetro del impulsor (m)

n = Revoluciones por segundo

P = Densidad del fluido (kg-m^3)

M = Viscosidad dinámica kg/m-seg.

∴ la velocidad en la flecha del impulsor es:

$$n = \frac{N Re M}{D^2 P} = \frac{100,000 M}{D^2 P}$$

La potencia requerida en el seno del líquido es:

$$P = \frac{K}{gc} \rho n^3 D^5$$

P = Potencia (kg/m -seg.); (h.p.)

gc = Gravedad específica m/seg²

K = Constante del tipo de impulsor

K = 1 Ref. 7

El gradiente de velocidad debe encontrarse entre 300 y 1 500 seg⁻¹

$$G = \sqrt{\frac{P}{MV}}$$

G = Gradiente de velocidad en seg⁻¹

V = Volúmen del recipiente (m³)

Descripción de la Unidad de Mezcla Rápida

La unidad de mezcla rápida esta constituida por tres recipientes de 15, 30 y 60 litros, cada uno con su flecha y su impulsor tipo propela de 9, 11 y 14 cm este impulsor genera corrientes axiales incorporando rápidamente los productos químicos al agua, recomendándose para líquidos de baja viscosidad como las aguas residuales (Ref. 8).

Cuenta con un motor eléctrico de 1/4 H. P. y un control de velocidad para evaluar las condiciones de operación más adecuadas; la inyección de los reactivos se lleva a cabo en línea. En la figura 3 se muestra la unidad de mezcla-rápida.

Floculación:

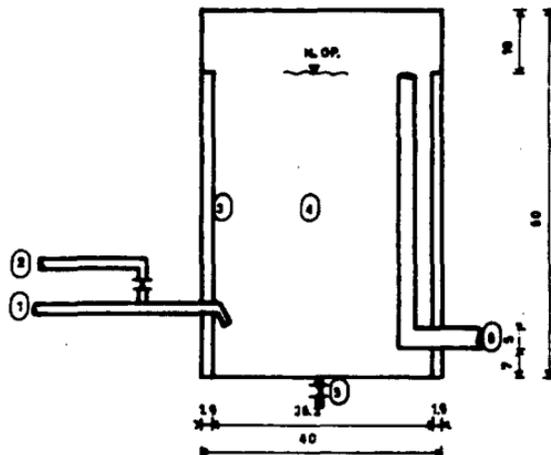
Después de la coagulación le sigue la floculación que consiste en la aglomeración de las partículas inducida por su movimiento relativo es decir ya dispersados los coagulantes es necesario aglutinarlos mediante una agitación lenta, ya que esto induce al crecimiento de las partículas con peso específico superior al del agua y es aquí donde se compactan los flocs que se formaron produciendo una concentración volumétrica baja.

Los movimientos producidos entre las moléculas se debe a su energía térmica, llamada movimiento browniano y al movimiento del agua inducido por energía hidráulica o mecánica.

Dentro de los floculadores generalmente se dividen en dos: hidráulicos y mecánicos.

Los floculadores hidráulicos son dispositivos que utilizan la energía hidráulica disipada por el flujo del agua a través de un conducto como un

UNIDAD DE MEZCLA RAPIDA.



NOMENCLATURA.

- 1-IMPULSOTE.
- 2-INYECCION DE REACTIVOS.
- 3-DEFLECTOR.
- 4-TUBO DE FIBRA DE VIDRIO.
- 5-PLUGA DE Lodos.
- 6-IMPULSOTE.
- 7-MOTOR DE AGITACION.
- 8-PALETA CON PROPELA TIPO TURBINA.

ACOT. mm.
3/8 ESCALA.

FIGURA 3

canal o un tanque y se agrupan en floculadores de pantalla de flujo horizontal o de flujo vertical en el primero el cual circula con un movimiento de vaiven, y en los segundos, la corriente circula en flujo ascendente y descendente; existen otros tipos como los helicoidales en los cuales la energía hidráulica es generada para usar movimiento helicoidal inducido por su ingreso tangencial en la cámara de floculación. Los parámetros de diseño para los floculadores hidráulicos se resúmen en:

Pérdida de carga:

$$H = \frac{(n + 1) V_1^2 + n V_2^2}{2 g}$$

g = Gravedad específica m/seg²

H = Pérdida de carga en m.

n = Número de pantallas

V₁ = Velocidad entre las pantallas (m/seg.)

V₂ = Velocidad en los pasajes (m/seg.)

Ya con las pérdidas de carga se calcula el gradiente de velocidad:

$$G = \frac{\gamma}{H} \frac{QH}{V} ; \text{ pero } T = \frac{Vol}{Q}$$

$$\therefore G = \frac{\gamma}{M} \frac{H}{T}$$

G = Gradiente de velocidad (seg⁻¹)

γ = Peso específico del agua (kg/m³)

H = Viscosidad dinámica

H = Perdida de carga (M)

T = Tiempo de retención (min.)

Vol = Volúmen (m³)

Q = Caudal (m³/min.)

Algunas consideraciones de diseño son:

- La velocidad sea igual a 0.40 m/seg., aguas arriba del floculador
- La velocidad sea igual a 0.15 m/seg., a la salida del floculador
- La distancia de la primera pantalla sea igual a 1.5 veces el espaciamiento entre pantallas. Aquí la velocidad debe estar entre 0.30 y 0.10 m/seg.

Por último el tiempo de retención hidráulico esté entre 20 y 40 min., (Ref. 6).

Floculadores Mecánicos:

A diferencia de los hidráulicos estos utilizan energía externa, que provoca movimiento vertical y horizontal mediante una potencia aplicada al agua por una paleta de área "A" desplazándose a una velocidad "v" con respecto a una distancia "r" de su eje y por una unidad de volumen del tanque de floculación "V", y por una fuerza que se interpone de arrastre " C_d ".

Los parámetros de diseño se describen en la siguiente sección, ya que la unidad de floculación de la planta piloto es de un floculador mecánico.

Criterios de Diseño

Los criterios de diseño para la unidad de floculación se basaron en los ámbitos de operación como lo es para el gradiente de velocidad (20 a 100 seg^{-1}) (Ref. 7); el tiempo de retención total (20 a 30 min) (Ref. 7); el número de compartimientos o cámaras sea cuando menos de tres, evitar cortos circuitos etc., las características de la unidad son;

| | |
|------------------------------------|--|
| Tiempo de retención | T = 24 min. |
| Gradientes de velocidad por cámara | 60, 40 y 20 seg^{-1} decrecientes |
| Tipo de flujo | Piston |

Cálculo de las Variables

Potencia requerida

P = Potencia ($\text{gm-Cm}^2/\text{seg}^3$)

P = DV

D = Fuerza de arrastre ($\text{gm-Cm}/\text{seg}^2$)

La velocidad de las paletas es:

V = Velocidad de las paletas M/seg

r = Radio de giro de las paletas M

$$V = \frac{3}{4} 2\pi r w$$

W = velocidad angular (r.p.s.)

La fuerza de arrastre es:

$$D = C_d \rho A V^2 / 2$$

C_d = Coef. adim. de arrastre función del número de Reynolds. La rugosidad y forma de las paletas.

A = Area de paletas cm^2

Coefficiente de arrastre

$$C_d = \frac{1}{N Re} + \frac{1}{\sqrt{N Re}} + 0.34 \quad N Re = \text{Número de Reynolds (ADIM)}$$

$N Re < 2000$ para flujo laminar

$$C_d = 1.5 \quad (\text{Ref. 9})$$

Sustituyendo en la ecuación de la potencia

$$P = C_d \rho A V^2 / 2 \quad (V)$$

$$P = C_d \rho A V^3 / 2 = \frac{1}{2} C_d \rho A \left(\frac{3}{4} 2 \pi r w \right)^3 = 52.301 C_d \rho A (r.w)^3$$

La velocidad angular es:

$$W = \frac{n}{60}$$

n = r.p.s.

W = Velocidad angular (r.p.m.)

$$\therefore P = 0.000242 C_d \rho A \left(\frac{r \cdot \text{rpm}}{60}\right)^3$$

El gradiente de velocidad es:

$$G = \sqrt{\frac{P}{M V}} \quad \begin{array}{l} G = \text{Gradiente (seg}^{-1}\text{)} \\ V = \text{Volumen (cm}^3\text{)} \end{array}$$

$$G = \left[\frac{52.301 C_d \rho A (r \cdot \text{rpm})^3}{M V} \right]^{0.5}$$

$$G = 0.01556 (C_d \rho A (r \cdot \text{rpm})^3 / VM)^{0.5} \quad (\text{seg}^{-1})$$

Descripción de la Unidad de Floculación

La unidad de floculación tiene un volumen de 0.24 m^3 en tres cámaras cuyo tiempo de retención es de 24 min., para un caudal de 0.5 l/seg. Los gradientes de velocidad van en forma decreciente (60, 40 y 20 seg^{-1}) en promedio para evitar el rompimiento de los flocs formados y aglutinados. Debiéndose buscar una variación de un 20 al 40% entre compartimientos. La agitación se lleva a cabo mediante un sistema mecánico de engranes para reducir la velocidad angular en cada cámara. En la figura 4 se muestra la unidad de floculación.

UNIDAD DE FLOCULACION Y CLARIFICACION

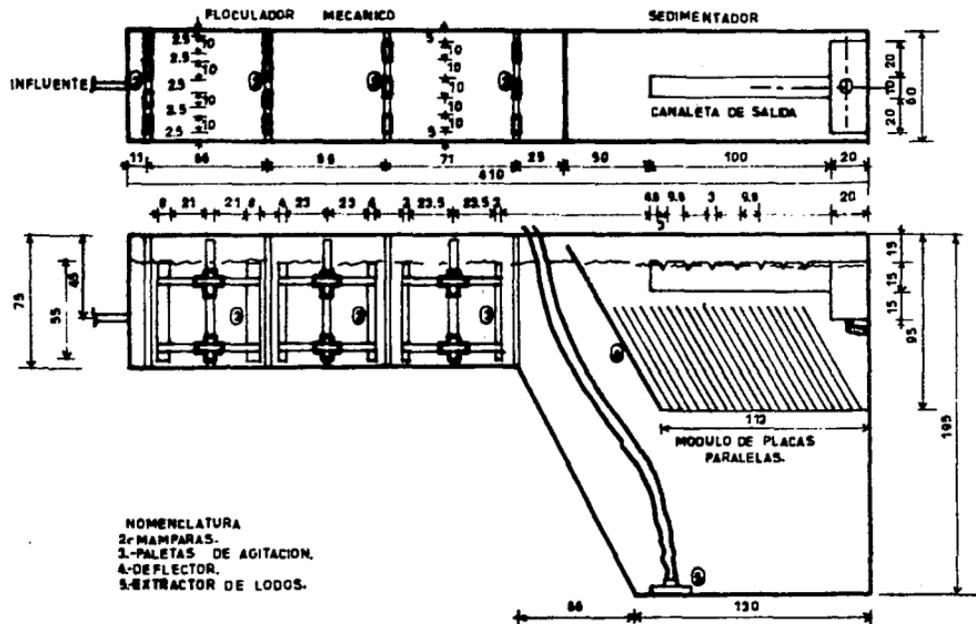


FIGURA 4 Y 5

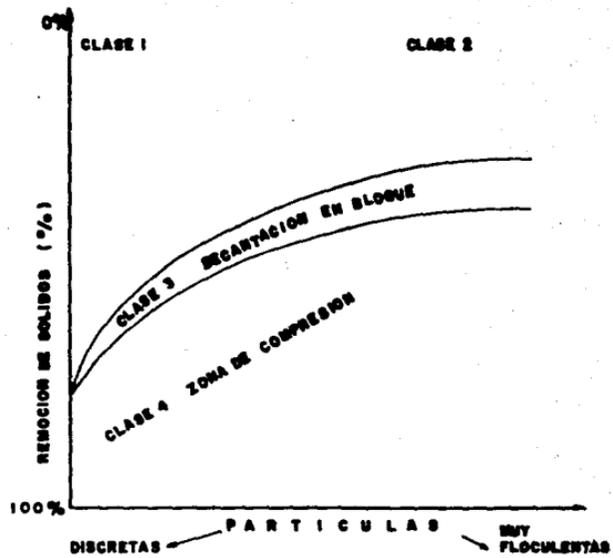
ACOT:CP
 ESCALA: 1:25

Clarificación

Las aguas residuales contienen partículas sólidas y coloidales en suspensión, de las cuales algunas son inestables, debidas a su tamaño, densidad y características.

Algunas partículas se someten a fuerzas gravitacionales y sedimentan fácilmente, otras se someten a fuerzas electrostáticas y microhidrodinámicas, las cuales son estables, otras son termodinámicamente inestables pero con pequeña velocidad de agregación respecto a la suspensión y por lo tanto pueden flocularse o coagularse. La separación por sedimentación gravitacional es una técnica efectiva que depende de varios factores: la concentración de la suspensión las características de las partículas. Fitch (1958) agrupa la sedimentación en cuatro clases: Clase 1 - Decantación de una suspensión diluida de partículas con poca tendencia de coagulación. Clase 2 - Decantación de una suspensión diluida de partículas floculentas. Clase 3 - Decantación en bloque o por zona manteniendo las partículas fijas entre unas y otras, por lo cual la sedimentación es en masa, Clase 4 - Compresión de partículas en contacto unas con otras manteniendo una estructura de masa compacta que ejerce compresión en las capas inferiores. En la gráfica 7 se muestra un esquema de los tipos de sedimentación (Ref. 10).

La clarificación es la operación unitaria, en la cual se utiliza la fuerza de gravedad para separar las partículas con peso específico superior



GRAFICA III.7 TIPOS DE SEDIMENTACION

al del agua. La clarificación se lleva a cabo por flotación, gravedad de baja y alta velocidad mediante la cual se precipitan los flocúlos formados en la coagulación-floculación. En nuestro caso tenemos la sedimentación por zona pues ocurre en suspensiones más concentradas como son la coagulación y el área superficial de diseño requerido para un tanque de sedimentación que deba manejar flujo continuo, se determina por las características de cementación y espesamiento de la suspensión. Talmagne y Fitch (1955) presentan una gráfica para estimar los factores.

Así a partir de la velocidad inicial de decantación de la interfase se puede calcular el área como:

$$A = Q/v_s ;$$

$$A = \text{Area en m}^2$$

$$Q = \text{Caudal en m}^3/\text{seg.}$$

$$v_s = \text{Velocidad de sedimentación para la decantación frenada m/seg.}$$

Y la carga superficial para la clarificación debe ser menor que la velocidad de decantación de la suspensión. La área máxima requerida se determina con la concentración crítica siendo está la base del diseño (Eckenfelder y Hilbinger (1957).

Algunos factores que influyen en la eficiencia de la sedimentación son: corrientes inducidas por la inercia del fluido de alimentación, gradientes de velocidad y temperatura; así la pérdida de sólidos puede provenir de

un arrastre del fondo o de la carga en vertedor pues al excederse tiende a arrastrar sólidos sedimentados. Otro factor que hay que cuidar es la estructura de entrada para distribuir uniformemente la suspensión de alimentación para evitar turbulencia y la estructura de salida para evitar cortos circuitos o resuspensión de lodos.

El clarificador se diseñó para manejar una c.h.s. de $49.70 \text{ l/m}^2\text{-min.}$, e incrementar la tasa a $6.313 \text{ l/m}^2 - \text{min.}$, mediante placas paralelas a 60° con una separación de 5 cm. además se le instaló un sifón para la extracción de lodos. El efluente del clarificador se lleva a cabo mediante 16 vertedores triangulares, cuya carga en vertedor es de $50.0 \text{ l/m} - \text{min.}$

Programa de Pruebas

Dado que el objetivo es optimizar la dosis de coagulante (cal química) para evaluar la remoción de fosfatos, color, D.Q.O., S.S.T. y turbidez. Además que se busca obtener un ámbito de pH 10 a 11 unidades para la remoción de nitrógeno amoniacal en la unidad de desgasificación. Se procedió a realizar una serie de pruebas de jarras para conocer las dosis de coagulante.

De los resultados obtenidos se eligió el rango de dosificación de 300 a 500 mg/l de cal química. En el mezclado rápido el

tiempo de retención óptimo resultó de 2 min., con un gradiente de velocidad de 500 a 2 455 seg^{-1} ; para la floculación los gradientes a experimentar resultaron de 76, 53, 16; 60, 40, 20 y 46, 32, 13 seg^{-1} en tres cámaras cada una con un tiempo de retención de 8 min cada una es decir un tiempo de retención de 24 min. en total; ya para la clarificación se conservaron las condiciones de diseño de la planta piloto tiempo de retención de 40.6 min y carga hidráulica superficial de $6.3131/\text{m}^2 - \text{min}$. En la figura no. 6 se muestra el diagrama de pruebas de operación para 12 alternativas. Ya en los cuadros nos. III.9.1 al III.9.5 se presentan los resultados analíticos medios en el influente y efluente con sus condiciones específicas. En el cuadro no. III.10 se resume de forma general las eficiencias de remoción de color, turbidez, fosfatos, D.Q.O sol., S.S.T., alcalinidad total y dureza total para cada condición de operación y para rangos específicos de pH.

En la gráfica no. III.8.a se observa que después de un pH de 10.7 las curvas se hacen asintóticas; concluyéndose que el gradiente óptimo es de 860 seg^{-1} para mezcla rápida a un pH de 10.4 unidades para una remoción de fosfatos del 93%. Le sigue el gradiente de velocidad de mezcla rápida de 621 seg^{-1} para la remoción de fosfatos del 81%. En la gráfica III.8.b la remoción más alta para un pH de 10.4 unidades es del 66% en cuanto a color para el gradiente de 860 seg^{-1} ; siguiéndole el de 621 seg^{-1} con una remoción de color del 40%; en la gráfica III.8.c. se muestra la variación en la remoción de materia orgánica medida como D.Q.O.sol. que para un pH de 10.4 la remoción más alta es del 45% para el gradiente de 682 seg^{-1} ; como se puede observar los resultados son muy variables, ya que si se remueve mayor cantidad

| PARAMETROS DE OPERACION | DDBS CAL (ppm) | PARAMETROS DE CALIDAD | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|-----------------------|-------|----------|------|-------|------|----------|-------|---------------|------|----------|------|------------|-------|-------------|------|-------|
| | | pH | | TURBIDEZ | | COLOR | | FOSFATOS | | D.O.O. SOLUB. | | S. S. T. | | ALC. TOTAL | | DUREZA TOT. | | |
| | | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | |
| MEZCLA RAPIDA N= 600 r.p.m. G= 602 seg ⁻¹ Tret.= 2.0 min FLOCULACION (3 CAMARAS) G _{1,2,3} = 76,53,16 seg ⁻¹ Tret. 1,2,3= 8 W _{1,2,3} = 14,14,7 r.p.m. | X | 350 | 8.10 | 10.25 | 2.90 | 13.0 | 75 | 45 | 11.72 | 4.50 | 64 | 40 | 14 | - | 209 | 266 | 187 | 255 |
| | | 300 | 8.04 | 10.40 | 3.90 | 8.0 | 75 | 60 | 14.34 | 3.17 | 63 | 24 | 25 | 50 | 207 | 282 | 207 | 253 |
| | X | 350 | 8.07 | 10.36 | 3.40 | 10.5 | 75 | 52.5 | 13.83 | 3.83 | 63.5 | 26 | 12.5 | 50 | 208 | 274 | 197 | 254 |
| | | 350 | 8.09 | 10.30 | 3.90 | 7.0 | 75 | 60 | 14.34 | 5.54 | 63 | 20 | 49 | 21 | 207 | 273 | 207 | 228 |
| | X | 350 | 8.03 | 10.00 | 3.40 | 8.0 | 75 | 60 | 11.70 | 2.70 | 72 | - | 24 | 18 | 200 | 225 | 201 | 210 |
| | | 350 | 8.04 | 10.76 | 3.65 | 7.5 | 75 | 60 | 11.00 | 4.12 | 67.5 | 20 | 36.5 | 20 | 203 | 249 | 204 | 219 |
| | X | 450 | 8.13 | 11.03 | 1.90 | 4.50 | 40 | 45 | 9.27 | 1.21 | 20 | 20 | - | - | 215 | 215 | 233 | 266 |
| | | 350 | 8.22 | 11.11 | 3.40 | 7.40 | 105 | 60 | 16.52 | 4.46 | 40 | 40 | 14 | 32 | 202 | 207 | 500 | 401 |
| | X | 350 | 8.01 | 11.35 | 3.40 | 7.00 | 75 | 60 | 11.70 | 2.65 | 72 | - | 24 | - | 200 | 220 | 201 | 225 |
| | | 303 | 8.12 | 11.16 | 2.77 | 6.37 | 60 | 55 | 12.51 | 2.17 | 66 | 40 | 19 | 12 | 232 | 247 | 314 | 257 |
| X | 350 | 8.24 | 11.00 | 2.60 | 5.10 | 105 | - | 11.05 | 1.15 | 48 | - | 22 | - | 202 | 252 | 310 | 446 | |
| | 450 | 8.30 | 11.42 | 1.60 | 3.70 | 60 | 30 | 9.62 | 1.70 | 55 | 52 | 24 | 20 | 205 | 205 | 309 | 244 | |
| X | 350 | 8.26 | 11.00 | 2.60 | 5.70 | 105 | 75 | 11.05 | 1.62 | 60 | 40 | 13 | - | 202 | 220 | 310 | 562 | |
| | 303 | 8.26 | 11.64 | 2.24 | 4.83 | 90 | 52 | 10.97 | 1.4 | 54 | 35.5 | 19.66 | 20 | 256 | 229 | 376 | 417 | |
| MEZCLA RAPIDA N= 700 r.p.m. G= 860 seg ⁻¹ Tret.= 2.0 min FLOCULACION (3 CAMARAS) G _{1,2,3} = 76,53,16 seg ⁻¹ Tret. 1,2,3= 8,8,8 min. W _{1,2,3} = 14,14,7 r.p.m. | X | 350 | 8.06 | 10.47 | 5.5 | 15.20 | 70 | 50 | 16.67 | 1.19 | 45 | 37 | - | - | 250 | 240 | - | - |
| | | 350 | 8.06 | 10.47 | 5.5 | 15.20 | 70 | 50 | 16.67 | 1.19 | 45 | 37 | - | - | 250 | 240 | - | - |
| | X | 350 | 9.10 | 10.05 | 3.5 | 10.0 | 60 | 30 | 16.61 | 1.20 | 44 | 46 | 22 | 18 | 240 | 206 | 166 | - |
| | | 400 | 8.07 | 10.00 | 5.0 | 10.5 | 75 | 80 | 19.00 | 2.28 | - | - | 16 | 21 | 155 | 160 | 130 | 186 |
| | X | 350 | 8.7 | 10.00 | 3.5 | 8.5 | 40 | 30 | 21.21 | 1.22 | 55 | 45 | 20 | 24 | 250 | 230 | - | - |
| | | 400 | 8.00 | 10.79 | 3.5 | 10.5 | 65 | 45 | 12.41 | 1.47 | 46 | 20 | - | - | 273 | 282 | - | - |
| | X | 400 | 7.47 | 10.00 | 3.5 | 3.5 | 70 | 40 | 9.40 | 1.19 | - | - | - | - | 165 | 155 | 150 | 131 |
| | | 400 | 8.00 | 10.03 | 4.0 | 5.5 | 70 | 50 | 12.96 | 1.37 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | X | 303 | 8.24 | 10.74 | 3.83 | 9.42 | 63.3 | 45.0 | 15.00 | 1.47 | 40.3 | 37 | 19.3 | 21 | 219.0 | 200 | 2154 | 150.5 |
| | | 400 | 8.19 | 11.05 | 8.5 | 6.5 | 70 | 40 | 12.63 | 0.52 | - | - | - | - | 256 | 236 | - | - |
| X | 450 | 8.32 | 11.00 | 4.5 | 10.0 | 150 | 50 | 16.00 | 1.20 | - | - | - | - | 240 | 217 | 142 | 76 | |
| | 400 | 8.16 | 11.46 | 3.5 | 2.5 | 75 | 45 | 9.60 | 0.18 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| X | 417 | 8.22 | 11.20 | 4.5 | 6.3 | 90.3 | 45 | 12.77 | 0.66 | - | - | - | - | 252 | 236.5 | 142 | 76 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

CUADRO III. 9.1 RESUMEN DE RESULTADOS ANALITICOS DE OPERACION TRATAMIENTO QUIMICO

| PARAMETROS DE OPERACION | DOSIS CAL (MG/L) | PARAMETROS DE CALIDAD | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------|-------|----------|-------|-------|------|----------|------|-------|-----------|------|------|--------|-------|-----------------|-------|
| | | PH | | TURBIDEZ | | COLOR | | FOSFATOS | | | D.O.G.B.O | | | S.S.T. | | CALC. TONDRIZAY | |
| | | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E |
| MEZCLA RAPIDA Tret.=2.0 min. W= 750 r.p.m. G= 950 seg -1 | 300 | 8.05 | 10.25 | 6.50 | 10.00 | 105 | 75 | 13.73 | 4.50 | - | - | - | - | 237 | 303 | 204 | 249 |
| | 350 | 8.04 | 10.30 | 7.00 | 6.00 | 105 | 45 | 11.85 | 3.90 | 45 | 41 | - | - | 165 | 219 | 209 | 220 |
| | \bar{x} | 8.045 | 10.3 | 6.75 | 6.00 | 105 | 60 | 12.8 | 4.24 | 45 | 41 | - | - | 201 | 261 | 282 | 285 |
| | 350 | 7.93 | 10.53 | 10.00 | 3.30 | 165 | 60 | 14.74 | 1.75 | - | - | - | - | 182 | 192 | 197 | 193 |
| | 350 | 7.96 | 10.64 | 5.50 | 0.00 | 75 | 75 | 13.8 | 2.80 | 45 | 40 | - | - | 214 | 246 | 203 | 216 |
| | 300 | 7.87 | 10.72 | 5.50 | 5.50 | 40 | 30 | 11.00 | 1.50 | 31 | - | - | - | 160 | 178.2 | 203 | 208 |
| | 350 | 7.89 | 10.70 | 7.00 | 0.00 | 90 | 39 | 16.09 | 2.29 | - | 43 | 36 | 28 | - | - | 207 | 212 |
| | 350 | 7.98 | 10.70 | 4.00 | 5.00 | 100 | 60 | 14.47 | 3.00 | 59 | 39 | 37 | 39 | - | - | 209 | 213 |
| | 400 | 8.11 | 10.77 | 4.50 | 0.00 | 60 | 30 | 14.96 | 0.90 | - | - | - | - | 176 | 157 | - | - |
| | 400 | 7.90 | 10.70 | 0.50 | 0.00 | 105 | 60 | 13.83 | 0.81 | 43 | 31 | 27 | 31 | 181 | 171 | 197 | 199 |
| FLOCULACION (3 CAMARAS) Tret. 1,2,3=8,8,8 min. W1,2,3= 14,14,7 r.p.m. G1,2,3= 76,53,16 seg-1 | 350 | 8.19 | 10.70 | 8.00 | 0.00 | 100 | 75 | 15.20 | 3.00 | 46 | 40 | - | - | 240 | 260 | 209 | 210 |
| | 350 | 8.03 | 10.60 | 5.50 | 0.00 | 100 | 75 | 12.36 | 3.36 | - | - | - | - | 156 | 196 | - | - |
| | 400 | 7.55 | 10.60 | 6.00 | 0.00 | 75 | 60 | 13.06 | 2.57 | 127 | 49 | 19 | - | 163 | 174 | - | - |
| | \bar{x} | 8.00 | 10.6 | 6.00 | 0.00 | 100 | 75 | 13.06 | 2.57 | 127 | 49 | 19 | - | 163 | 174 | - | - |
| CLARIFICACION Tret.= 40.6 min. | 360 | 7.94 | 10.74 | 7.40 | 11.00 | 77.5 | 56 | 14.80 | 2.20 | 58.5 | 540+3 | 32.6 | 22.6 | 184 | 197 | 203 | 207.3 |
| | 400 | 8.04 | 11.04 | 3.50 | 5.50 | 60 | 30 | 17.60 | 0.98 | 51 | - | - | - | 196 | 186 | 203 | - |
| | 450 | 8.27 | 11.00 | 15.50 | 6.50 | 105 | 75 | 11.22 | 1.71 | 47 | 32 | 27 | - | 171 | 186 | 200 | 190 |
| | 400 | 7.96 | 11.27 | 7.50 | 5.50 | 105 | 60 | 14.16 | 1.13 | 54 | 30 | 28 | 19 | 263 | 173 | 197 | 216 |
| | 450 | 8.14 | 11.00 | 7.00 | 0.00 | 75 | 60 | 14.93 | 1.53 | - | - | - | - | 163 | 206 | 216 | 187 |
| | 450 | 8.02 | 11.42 | 9.50 | 0.00 | 60 | 30 | 11.19 | 0.15 | 55 | 41 | 32 | 34 | 170 | 197 | 203 | 207 |
| | \bar{x} | 8.09 | 11.20 | 7.90 | 7.70 | 81 | 51 | 13.82 | 1.10 | 51.75 | 34.3 | 29 | 26.5 | 172.5 | 189.6 | 204 | 200 |
| MEZCLA RAPIDA Tret.= 2.0 min. W = 750 r.p.m. G = 950 seg-1 | 350 | 7.9 | 10.20 | 2.40 | 9.70 | 105 | 60 | 10.90 | 1.17 | 44 | 24 | 29 | 35 | 259 | 291 | 232 | 218 |
| | 350 | 8.1 | 10.35 | 2.30 | 12.00 | 75 | 60 | 15.90 | 2.60 | 56 | 40 | 27 | 33 | 254 | 268 | 219 | 205 |
| | 350 | 8.0 | 10.30 | 2.35 | 10.85 | 90 | 60 | 13.20 | 2.60 | 50 | 32 | 28 | 34 | 256.5 | 279.5 | 225.5 | 211.5 |
| | 450 | 8.36 | 10.65 | 2.50 | 13.00 | 75 | 60 | - | - | - | - | - | - | 256 | 205 | 337 | 237 |
| | 450 | 8.5 | 10.71 | 2.50 | 5.20 | 75 | 40 | 8.93 | 1.91 | 40 | 28 | - | - | 256 | 550 | 223 | 266 |
| | 450 | 8.43 | 10.68 | 2.50 | 9.10 | 75 | 50 | 8.93 | 1.91 | 40 | 28 | - | - | 256 | 177 | 280 | 252 |
| | 350 | 7.98 | 11.20 | 2.80 | 13.0 | 75 | 75 | 9.50 | 3.60 | 32 | 36 | 38 | 58 | 188 | 235 | 178 | 215 |
| | 350 | 7.93 | 11.32 | 2.20 | 10.0 | 45 | 75 | 11.70 | 2.87 | 28 | 24 | 17 | 19 | 259 | 230 | 202 | 218 |
| | 350 | 8.20 | 11.40 | 1.70 | 7.0 | 75 | 75 | 14.30 | 1.22 | 40 | 36 | 27 | 31 | 273 | 353 | 198 | 242 |
| | 350 | 8.37 | 11.85 | 4.50 | 5.50 | 105 | 45 | 9.70 | 0.95 | 34 | 30 | 32 | 37 | 147 | 282 | 202 | 225 |
| \bar{x} | 350 | 8.12 | 11.34 | 2.80 | 8.23 | 75 | 67.5 | 11.30 | 3.23 | 33.33 | 32 | 28 | 36 | 217 | 275 | 195 | 225 |
| FLOCULACION Tret.1,2,3=8,8,8 min. W1,2,3=14,14,7 r.p.m. G1,2,3=76,53,16 seg-1 | 350 | 8.12 | 11.34 | 2.80 | 8.23 | 75 | 67.5 | 11.30 | 3.23 | 33.33 | 32 | 28 | 36 | 217 | 275 | 195 | 225 |

CUADRO III.9.2 RESUMEN DE RESULTADOS ANALITICOS DE OPERACION TRATAMIENTO QUIMICO

| PARAMETROS DE OPERACION. | DOSIS CAL. mg/l | PARAMETROS DE CALIDAD | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|-----------------------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|------|--------|------|-------|-----|------------|-----|-------------|-----|
| | | PH | | TURBIDEZ | | COLOR | | FOSFATOS | | DQOSOL | | S S T | | ALCAL TOT. | | DUREZA TOT. | |
| | | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E |
| CLARIFICACION Tret.= 40.6 min. C.H.S.= 6.3 l/m ² -min. C.V.= 50 l/m-min NOTA: DATOS DE 1985 | 450 | 8.17 | 11.55 | 1.30 | 7.80 | 75 | 30 | 8.93 | 1.29 | 40 | 56 | - | - | 256 | 215 | 223 | 280 |
| | 350 | 7.95 | 11.70 | 3.30 | 1.60 | 75 | 30 | 7.53 | 0.80 | 56 | 56 | 18 | 13 | 192 | 218 | 491 | 491 |
| | 450 | 8.30 | 11.71 | 1.60 | 2.00 | 75 | 30 | 12.96 | 2.70 | 48 | 24 | 21 | 16 | 323 | 219 | 497 | 289 |
| | 450 | 8.23 | 12.25 | 3.40 | 2.10 | 75 | 15 | 8.55 | 0.55 | 16 | -- | 23 | - | 133 | 266 | 202 | 318 |
| | 450 | 8.24 | 12.41 | 3.40 | 1.20 | 75 | 15 | 8.55 | 0.54 | 36 | -- | 16 | - | 133 | 292 | 202 | 341 |
| | 430 | 8.18 | 11.92 | 2.6 | 2.94 | 75 | 18 | 9.30 | 1.18 | 44 | 45.3 | 19 | 14 | 207 | 242 | 323 | 344 |
| MEZCLA RAPIDA Tret.= 2.0 min. W= 546 r.p.m. G= 621 seg -1 FLOCULACION Tret.1,2,3= 8,8,8 min. W1,2,3= 14,14,7 r.p.m. G1,2,3= 76753,16 seg -1 CLARIFICACION Tret.= 40.6 min. C.H.S.= 6.3 l/m ² -min. C.V.= 50 l/m-min. | 300 | 7.60 | 10.00 | 15.00 | 16.00 | 75 | 40 | 11.50 | 3.9 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 300 | 7.60 | 10.00 | 15.00 | 16.00 | 75 | 40 | 11.9 | 3.7 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 300 | 7.7 | 10.57 | 6.00 | 14.50 | 60 | 40 | 9.5 | 1.30 | 60 | 25 | - | - | 320 | 222 | 420 | 318 |
| | 400 | 7.8 | 10.61 | 15.0 | 11.00 | 70 | 45 | 8.5 | 1.3 | 46 | 23 | 19 | 14 | 260 | 220 | 315 | 280 |
| | 300 | 7.4 | 10.74 | 6.00 | 10.00 | 65 | 42 | 11.00 | 1.5 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 333 | 7.6 | 10.64 | 9.00 | 11.83 | 67 | 42 | 9.93 | 1.37 | 53 | 24 | 19 | 14 | 290 | 221 | 367 | 299 |
| | 300 | 7.98 | 11.08 | 6.00 | 8.00 | 75 | 45 | 12.5 | 0.9 | 48 | 42 | 21 | 15 | - | - | - | - |
| | 400 | 7.97 | 11.14 | 8.00 | 14.00 | 60 | 45 | 10.54 | 1.31 | 42 | 28 | 19 | 14 | 380 | 432 | 265 | 262 |
| | 400 | 8.3 | 11.40 | 7.00 | 12.50 | 60 | 40 | 9.5 | 1.3 | 36 | 32 | - | - | 330 | 285 | 268 | 252 |
| | 367 | 7.98 | 11.21 | 7.00 | 11.50 | 65 | 43 | 10.80 | 1.17 | 42 | 34 | 20 | 14 | 355 | 358 | 266 | 257 |
| | 400 | 8.2 | 11.59 | 7.50 | 10.00 | 40 | 37 | 10.54 | 3.68 | - | - | - | - | 246 | 235 | - | - |
| | 400 | 8.5 | 11.62 | 7.50 | 16.50 | 40 | 30 | 11.5 | 1.6 | 28 | 15 | 18 | 14 | 230 | 218 | 450 | 470 |
| | 400 | 8.3 | 11.70 | 17.00 | 17.00 | 60 | 35 | 12.78 | 1.6 | 24 | 32 | 20 | 15 | 190 | 207 | 360 | 290 |
| | 400 | 8.24 | 11.89 | 6.00 | 10.00 | 45 | 30 | 10.7 | 0.90 | 32 | 27 | 22 | 18 | 260 | 225 | 270 | 260 |
| 400 | 8.36 | 11.92 | 6.00 | 7.00 | 60 | 50 | 8.7 | 0.55 | 42 | 28 | 17 | 15 | - | - | 302 | 298 | |
| 500 | 8.50 | 12.00 | 6.00 | 7.00 | 75 | 30 | 9.2 | 0.6 | - | - | 21 | 19 | - | - | - | - | |
| 400 | 8.51 | 12.11 | 6.00 | 8.00 | 60 | 25 | 9.6 | 0.4 | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| 414 | 8.37 | 11.84 | 8.00 | 11.93 | 54 | 34 | 10.43 | 1.33 | 31 | 25 | 20 | 16 | 231 | 221 | 345 | 262 | |
| MEZCLA RAPIDA Tret.= 2.0 min. W= 740 r.p.m. G= 1085 seg -1 FLOCULACION Y CLARIFICACION | 350 | 7.97 | 10.90 | 10.50 | 10.00 | 70 | 45 | 8.5 | 3.0 | 44 | 20 | 16 | 15 | 315 | 279 | 315 | 313 |
| | 350 | 7.97 | 10.90 | 10.50 | 10.00 | 70 | 45 | 8.5 | 3.0 | 44 | 20 | 16 | 15 | 315 | 279 | 315 | 313 |

CUADRO III 93 RESUMEN DE RESULTADOS ANALITICOS DE OPERACION TRAT. QUIMICO.

| PARAMETROS DE OPERACION | COESIS CAL mg/l | PARAMETROS DE CALIDAD | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|-----------------------|------|----------|------|-------|----|----------|-------|-----------|------|----------|-----|-------------|-------|-------------|-----|-----|
| | | PH | | TURBIDEZ | | COLOR | | FOSFATOS | | D.Q.O.SOL | | S. S. T. | | ALCAL. TOT. | | DUREZA TOT. | | |
| | | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | |
| MEZCLA RAPIDA Tret.= 2.0 min. W = 1673 r.p.m. G = 2455 seg -1 FLOCULACION Y CLARIFICACION | x̄ | 300 | 8.28 | 11.28 | 8.00 | 11.70 | - | - | 15.1 | 1.7 | 40 | 22 | 19 | 25 | - | - | - | - |
| | | 300 | 8.26 | 11.28 | 8.00 | 11.70 | - | - | 15.1 | 1.7 | 40 | 22 | 19 | 25 | - | - | - | - |
| | | 500 | 8.53 | 11.53 | 7.00 | 18.00 | 40 | 15 | 9.71 | 0.47 | 30 | 26 | 9 | 25 | 190 | 223 | 360 | 369 |
| | | 400 | 8.19 | 11.56 | 7.00 | 12.00 | 75 | 30 | 8.17 | 1.3 | 40 | 20 | 16 | 27 | 276 | 215 | 350 | 320 |
| | | 400 | 8.05 | 11.62 | 7.00 | 15.00 | 75 | 35 | 11.20 | 2.7 | 36 | 30 | 26 | 17 | 204 | 190 | 310 | 278 |
| | | 400 | 8.24 | 11.64 | 7.00 | 10.00 | - | - | 9.14 | 0.37 | - | - | - | - | 216 | 212 | - | - |
| | | 400 | 8.26 | 11.60 | 7.00 | 11.50 | 45 | 25 | 12.7 | 0.62 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | x̄ | 420 | 8.25 | 11.60 | 7.00 | 13.3 | 59 | 26 | 10.18 | 1.09 | 35 | 25 | 17 | 23 | 221 | 210 | 340 | 322 |
| MEZCLA RAPIDA Tret.= 2.0 min; W = 600 r.p.m. G= 682 seg-1 FLOCULACION Tret1,2,3=8,8,8, min. W1,2,3=10,10,5 r.p.m.G1,2,3=46,32,13 CLARIFICACION | x̄ | 450 | 7.98 | 11.13 | 2.50 | 6.90 | 75 | 45 | 8.93 | 1.60 | 38 | 27 | 18 | 37 | 217 | 233 | 320 | 330 |
| | | 450 | 8.05 | 11.08 | 2.50 | 4.10 | 75 | 45 | 8.93 | 1.86 | 40 | 52 | 14 | 30 | 256 | 215 | 380 | 316 |
| | | 450 | 8.01 | 11.30 | 2.50 | 5.50 | 75 | 45 | 8.93 | 1.73 | 39 | 39 | 16 | 33 | 236 | 224 | 350 | 323 |
| | | 450 | 8.23 | 11.64 | 1.60 | 4.30 | 60 | 30 | 9.62 | 1.69 | 36.0 | 32 | 9.0 | - | 205 | 192 | 309 | 327 |
| | | 350 | 8.25 | 11.68 | 1.60 | 4.10 | 60 | 30 | 10.07 | 1.31 | 36 | 56 | 14 | 50 | 282 | 163 | 398 | 753 |
| | | 350 | 8.17 | 11.71 | 1.60 | 4.80 | 75 | 30 | 12.96 | 0.99 | 36.0 | 24 | 8 | 69 | 223 | 202 | 497 | 488 |
| | | 383 | 8.28 | 11.68 | 1.60 | 4.4 | 65 | 30 | 10.88 | 1.34 | 36 | 31 | 10 | 59 | 237 | 186 | 401 | 523 |
| MEZCLA RAPIDA Tret.= 2.0 min W= 750 r.p.m. G= 950 seg-1 FLOCULACION Tret.1,2,3=8,8,8 min. W1,2,3= 10,10,5 r.p.m. G1,2,3= 46,32,13 seg-1 | x̄ | 350 | 8.23 | 10.90 | 3.0 | 8.8 | 75 | 60 | 9.03 | 2.37 | 52 | 51 | 9.0 | 36 | 204 | 261 | 347 | 337 |
| | | 350 | 8.23 | 10.90 | 3.0 | 8.8 | 75 | 60 | 9.03 | 2.37 | 52 | 51 | 9.0 | 36 | 204 | 261 | 347 | 337 |
| | x̄ | 350 | 8.11 | 11.28 | 2.2 | 12.0 | 45 | 45 | 11.70 | 2.5 | 28 | 24 | 18 | 15 | 259 | 212 | 202 | 218 |
| | | 350 | 8.15 | 11.31 | 4.4 | 9.4 | 75 | 45 | 11.90 | 2.1 | 42 | 24 | 19 | 46 | 216 | 244 | 225 | 195 |
| | | 350 | 7.93 | 11.32 | 4.4 | 7.8 | 75 | 45 | 11.90 | 3.90 | 42 | 24 | - | 52 | 216 | 226 | 225 | 195 |
| | | 350 | 8.05 | 11.35 | 1.6 | 4.2 | 60 | 30 | 10.07 | 1.46 | 32 | 28 | 26 | 84 | 202 | 190 | 212 | 226 |
| | | 350 | 8.06 | 11.31 | 3.15 | 8.35 | 64 | 41 | 11.39 | 2.49 | 36 | 25 | 21 | 49 | 223 | 218 | 216 | 208 |
| | | 350 | 8.19 | 11.55 | 2.2 | 9.0 | 45 | 45 | 11.7 | 2.3 | 28 | 16 | 19 | 69 | 259 | 254 | 202 | 235 |
| | | 350 | 8.52 | 11.86 | 2.8 | 5.9 | 75 | 30 | 7.84 | 0.95 | 24 | 36 | 25 | 23 | 218 | 230 | 548 | 521 |
| | | 350 | 8.36 | 11.70 | 2.5 | 7.45 | 60 | 37.5 | 9.77 | 1.63 | 26 | 26 | 22 | 46 | 238.5 | 242 | 375 | 378 |

CUADRO III 9.4 RESUMEN DE RESULTADOS ANALITICOS DE OPERACION TRAT QUIMICO

| PARAMETROS DE OPERACION | | DOSIS CAL mg/L | PARAMETROS DE CALIDAD | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-------------------|-----------------------|-------|----------|-----|-------|-------|----------|----|------------|----|---------|-----|-------------|-----|-------------|---|
| | | | PH | | TURBIDEZ | | COLOR | | FOSFATOS | | D.O.G. SOL | | S. S. T | | ALCAL. TOT. | | DUREZA TOT. | |
| | | | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E | I | E |
| MEZCLA RAPIDA: W= 475 r.p.m. G= 493 seg ⁻¹ W= 613 r.p.m. G= 697 seg ⁻¹ Tret.=2.0 min. X̄ = W= 808 r.p.m. G= 1060 seg ⁻¹ W= 1022 r.p.m. G= 1500 seg ⁻¹ | 500 | 8.3 | 11.79 | 10.00 | 20.00 | 60 | 20 | 9.14 | 0.97 | 35 | 40 | 14 | 18 | 204 | 198 | 340 | 318 | |
| | 300 | 8.17 | 10.02 | 13.00 | 17.00 | 70 | 50 | 10.5 | 3.8 | 48 | 50 | 18 | 26 | 216 | 212 | 300 | 288 | |
| | 500 | 8.29 | 11.39 | 8.00 | 22.90 | 45 | 30 | 11.1 | 3.6 | 42 | 30 | 25 | 20 | | | | | |
| | 300 | 8.25 | 11.00 | 10.33 | 22.90 | 50 | 33 | 10.24 | 2.79 | 42 | 40 | 19 | 21 | 210 | 205 | 320 | 303 | |
| | 300 | 7.9 | 10.81 | 9.00 | 20.00 | 105 | 70 | 7.06 | 0.8 | 29 | 15 | 14 | 13 | 215 | 230 | 220 | 190 | |
| | 500 | 8.18 | 11.83 | 8.00 | 7.00 | 75 | 45 | 10.05 | 2.6 | 31 | 27 | 16 | 21 | 202 | 198 | 215 | 224 | |
| FLOCULACION Tret. 1,2,3= 8,8,8 min. W 1,2,3 = 12,12,6 r.p.m. G 1,2,3 = 60,40,20 seg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CLARIFICACION Tret.= 40.6 min. C.H.S.= 6.31 l/m ³ -min. C.V. = 50 l/m ³ -min. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

CLASIFICACION - RAPIDA

W=546 r.p.m.
G=621 seg^{-1}
Tret.=2.0 min.
W=600 r.p.m.
G=682 seg^{-1}
Tr=2.0 min.
W=700 r.p.m.
G=860 seg^{-1}
Tret.=2.0
W=740 r.p.m.
G=1085 seg^{-1}
Tret.=2.0 min.
W=750 r.p.m.
G=950 seg^{-1}
Tret.=2.0 min.
W=1673
G=2455
Tret.=2.0 min.

Q=30l/min.

W=600 r.p.m.
G=682 seg^{-1}
Tret.=2.0 min.
W=750 r.p.m.
G=950 seg^{-1}
Tret.=2.0 min.

W=475 r.p.m.
G=493 seg^{-1}
W=613 r.p.m.
G=697 seg^{-1}
W=808 r.p.m.
G=1060 seg^{-1}
W=1022 r.p.m.
G=1500 seg^{-1}

FLOCULACION

W₁=14; W₂=14; W₃=7 r.p.m.
G₁=76; G₂=53; G₃=16 seg^{-1}
Tr₂=8; Tr₂=8; Tr₃=8 min.

W₁=10; W₂=10; W₃=5 r.p.m.
G₁=46; G₂=32; G₃=13 seg^{-1}
Tr₁=8; Tr₂=8; Tr₃=8 min.

W₁=12; W₂=12; W₃=6 r.p.m.
G₁=60; G₂=40; G₃=20 seg^{-1}
Tr₁=8; Tr₂=8; Tr₃=8 min.

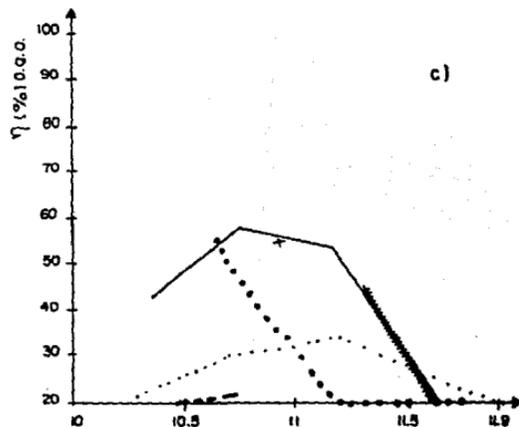
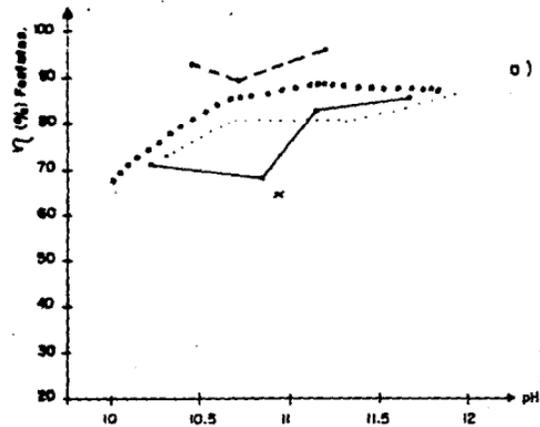
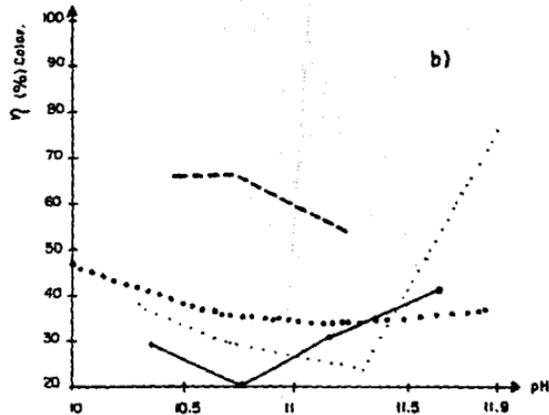
CLARIFICACION

C.H.S.= 6.31 $1/m^2\text{-min.}$
Tret. = 40.6 min.
C.V. = 50 $1/m\text{-min.}$

C.H.S.= 6.31 $1/m^2\text{-min.}$
Tret. = 40.6 min.
C.V. = 50 $1/m^2\text{-min.}$

C.H.S.= 6.31 $1/m^2\text{-min.}$
Tret. = 40.6 min.
C.V. = 50 $1/m\text{-min.}$

FIGURA 6. DIAGRAMA DE PRUEBAS DE TRATAMIENTO-QUIMICO



NOMENCLATURA /GRADIENTE

| | |
|-----------|------|
| — | 682 |
| - - - | 840 |
| | 930 |
| - · - · - | 621 |
| x x x x | 1085 |
| - · - · - | 2455 |

GRAFICA III. 8

COMPORTAMIENTO DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCION A DIFERENTES pH's.

de materia orgánica se tendrá que trabajar en un ámbito mayor de pH con el inconveniente de consumir mayor dosis de reactivos y por ende el incrementar la turbiedad y los sólidos suspendidos del efluente.

En cuanto a la turbiedad (cuadro no. III.10), las concentraciones son mayores en más de un 100%; para la alcalinidad y dureza únicamente se midieron para control no siendo significativas las variaciones. El análisis anterior se realizó para las condiciones de gradiente de velocidad de floculación de 76, 53, 16 seg^{-1} y se considera como óptimo el gradiente de mezcla rápida de 682 a 950 seg^{-1} . con estos resultados se redujo en la floculación la energía es decir a 46, 32, 13 seg^{-1} , con los resultados obtenidos (cuadro no. III.11 y gráfica no. III.9.) la remoción de D.Q.O. es del 14%, los sólidos se incrementan del 100 al 490%. Aunque la remoción de fosfatos es aceptable, 81 a 88%, el color 40 a 54% y la turbidez se incrementa del 120 al 175%; en el mismo cuadro III.11 se presenta el resumen al variar el gradiente de velocidad de floculación a 60, 40, 20 seg^{-1} ; con las condiciones de mezcla rápida de 493, 697, 1060 y 1500 seg^{-1} en la gráfica III.10.a, b, c se observa que el gradiente óptimo de mezcla rápida al variar las condiciones de floculación resulta de 1060 seg^{-1} ; con una remoción del 90% de fosfatos, 48% de D.Q.O., 7% de sólidos suspendidos y 33% de color aunque se incrementa la turbiedad del efluente en un 11% y la alcalinidad y dureza se mantienen con pequeñas variaciones.

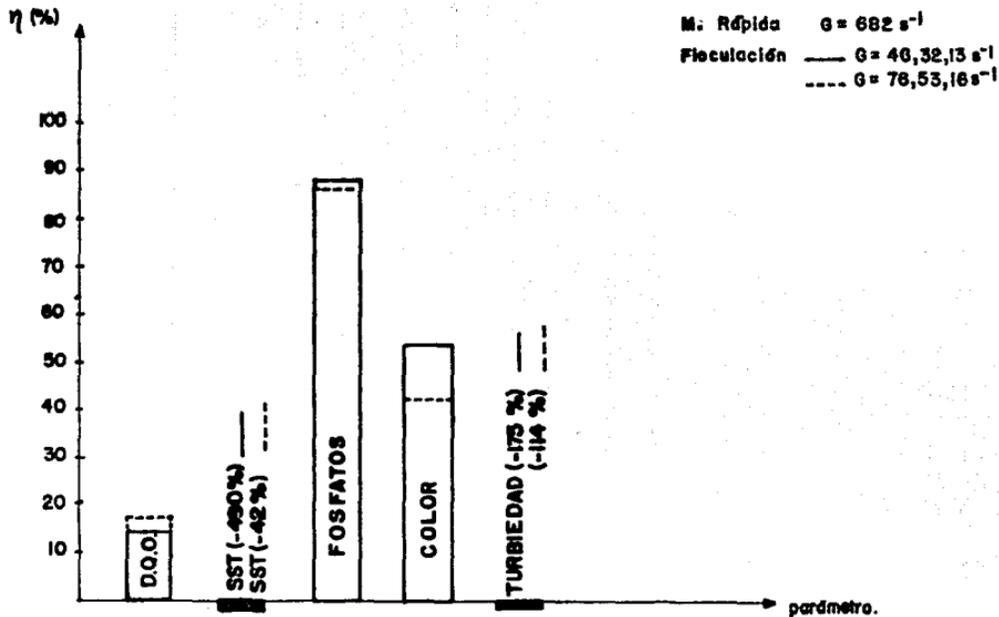
| PARAMETROS DE OPERACION D.C.B.I.S. | CAL mg/l | PARAMETROS DE CALIDAD | | | | | | | | |
|--|-------------|-----------------------|------|---------------|-------|---------|-------------|---------|-----------------|-----------------|
| | | RANGO X pH | | TURBIDE pH | COLOR | FORMATO | D.Q.O. mg/l | S. S.T. | ALCAL. TOTAL | DUREZA TOTAL |
| M. RAPIDA: w=600 rpm G= 682 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | 350 | 10-10.5 | 10.8 | -2.9 | 30 | 71 | 43 | -156 | -32 | -29 |
| | 350 | 10.5-11 | 10.7 | -109 | 20 | 69 | 58 | 45 | -18 | -7 |
| | 383 | 11-11.5 | 11.1 | -137 | 31 | 83 | 54 | -68 | -27 | -14 |
| | 383 | 11.5-12 | 11.5 | -114 | 42 | 86 | 17 | -42 | -11 | -11 |
| w= 700 rpm G= 660 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | | 10-10.5 | 10.8 | -176 | 66 | 93 | 18 | - | 4 | - |
| | | 10.5-11 | 10.7 | -146 | 66 | 90 | 24 | -9 | 5 | -3 |
| | | 11-11.5 | 11.8 | -40 | 74 | 95 | - | - | 10 | 46 |
| w= 750 rpm G= 950 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | | 10-10.5 | 10.8 | -18 | 43 | 67 | 9 | - | -30 | -16 |
| | | 10.5-11 | 10.7 | -48 | 28 | 84 | 31 | 0 | -23 | -2 |
| | | 11-11.5 | 11.2 | 3 | 37 | 93 | 34 | 4 | -10 | -2 |
| w= 750 rpm G= 950 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | 350 | 10-10.5 | 10.8 | -362 | 33 | 80 | 36 | -21 | -0 | 4 |
| | 450 | 10.5-11 | 10.8 | -264 | 33 | 79 | 30 | - | -100 | 10 |
| | 350 | 11-11.5 | 11.8 | -194 | 10 | 71 | 14 | 28 | -27 | 15 |
| | 430 | 11.5-12 | 11.9 | -13 | 76 | 87 | -7 | 26 | -17 | 7 |
| w= 546 rpm G= 621 s ⁻¹ tr= 2.0 min | 300 | 10-10.5 | 10.0 | -7 | 47 | 68 | - | - | - | - |
| | 333 | 10.5-11 | 10.8 | -31 | 37 | 86 | 55 | 26 | -24 | 18 |
| | 367 | 11-11.5 | 11.2 | -84 | 34 | 89 | 19 | 30 | -1 | 3 |
| | 414 | 11.5-12 | 11.8 | -49 | 37 | 87 | 19 | 20 | 4 | 24 |
| w= 740 rpm G= 1085 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | 350 | 10.5-11 | 10.9 | 5 | 36 | 65 | 54 | 6 | 11 | 6 |
| | | | | | | | | | | |
| w= 1673 rpm G= 2455 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | 300 | 11-11.5 | 11.2 | -46 | - | 89 | 45 | -31 | - | - |
| | 420 | 11.5-12 | 11.6 | -90 | 56 | 89 | 26 | -35 | 5 | 5 |

CUADRO III.10 EFICIENCIAS DE REMOCION PARA CONDICIONES CONSTANTES DE FLOCULACION Y CLARIFICACION

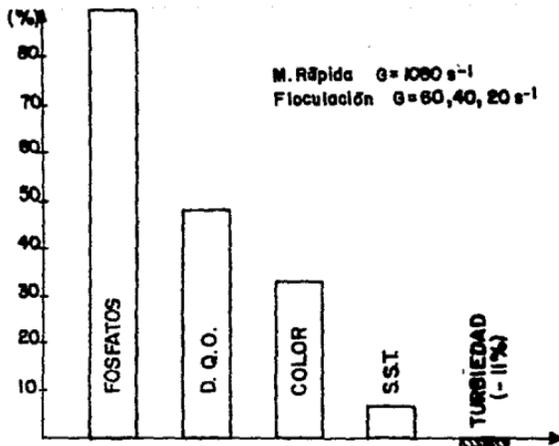
FLOCULACION: W_{1,2,3} = 14, 14, 7 r.p.m.
G_{1,2,3} = 76, 53, 16 Seg⁻¹
T_{1,2,3} = 8, 8, 8 min.

| PARAMETROS DE OPERACION | DOSIS CAL mg/L | PARAMETROS DE CALIDAD | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|--|--------------|-------|--------|-------------|---------|--------------|--------------|-----|----|
| | | RANGO X pH. | TURBIDEZ pt. | COLOR | FOSFOS | D.O.D. cc/l | S. S.T. | ALCAL. TOTAL | DUREZA TOTAL | | |
| M. RAPIDA : w= 600 rpm G= 682 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | 450 | 11-11.5 | 11.6 | -120 | 40 | 81 | 0 | -106 | 5 | 34 | |
| | 383 | 11.5-12 | 11.6 | -175 | 54 | 88 | 14 | -490 | 21 | -30 | |
| | 350 | 10.5-11 | 10.9 | -193 | 20 | 74 | 2 | -300 | -28 | 3 | |
| w= 750 rpm G= 950 s ⁻¹ t _r = 2.0 min | 350 | 11-11.5 | 11.8 | -167 | 36 | 78 | 30 | -133 | -2 | 4 | |
| | 350 | 11.5-12 | 11.7 | -198 | 37 | 83 | 0 | -109 | -1 | -1 | |
| | 350 | | | | | | | | | | |
| Condiciones : FLOCULACION | | w _{1,2,3} = 10, 10, 5 rpm G _{1,2,3} = 40, 32, 13 s ⁻¹ t _{r1,2,3} = 8, 8, 8 min | | | | | | | | | |
| CLARIFICACION | | t _r = 40.6 min | | | | | | | | | |
| M. RAPIDA : t _r = 2.0 min | W= 475 rpm G= 493 s ⁻¹ | 500 | 11.5-12 | 11.7 | 0 | 67 | 89 | 14 | 28 | 3 | 6 |
| | w= 613 rpm G= 697 s ⁻¹ | 400 | 10.5-11 | 11.0 | -31 | 43 | 72 | 5 | -10 | 2 | 5 |
| | w= 808 rpm G= 1060 s ⁻¹ | 300 | 10.5-11 | 10.8 | -11 | 33 | 90 | 48 | 7 | -7 | 14 |
| | w= 1022 rpm | 500 | 11.5-12 | 11.8 | 12 | 40 | 74 | 13 | -31 | 2 | -4 |
| FLOCULACION | | w _{1,2,3} = 12, 12, 6 rpm G _{1,2,3} = 60, 40, 20 s ⁻¹ t _r = 8 min | | | | | | | | | |
| CLARIFICACION | | t _r = 40.6 min | | | | | | | | | |

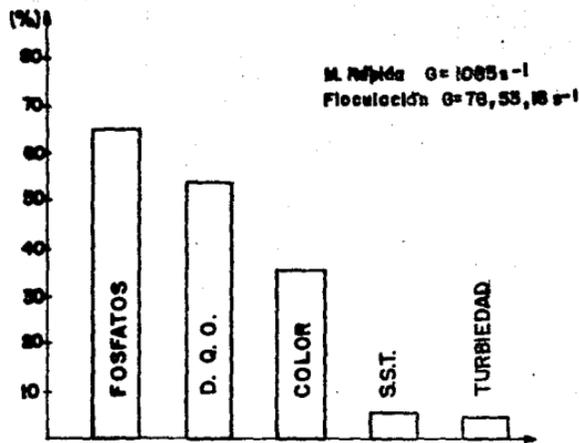
CUADRO III. II EFICIENCIAS DE REMOCION PARA CONDICIONES CONSTANTES DE FLOCULACION Y CLARIFICACION.



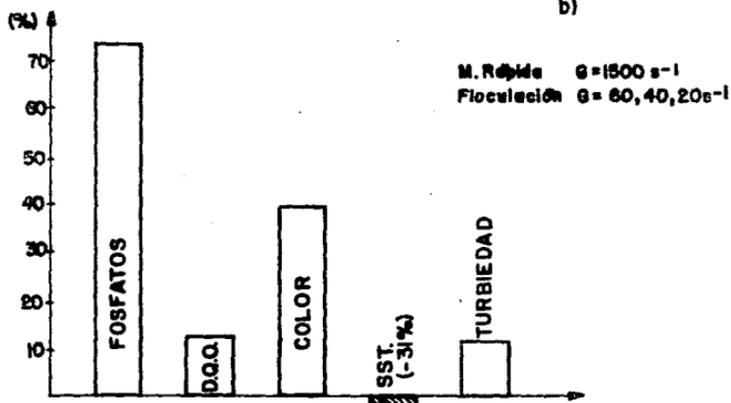
GRAFICA 9 EFICIENCIAS DE REMOCION A DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION (Tratamiento Químico).



a)



b)



c)

De lo anterior se concluye lo siguiente: a grandes gradientes de velocidad 76, 53, 16 seg^{-1} ; en floculación tiende a romperse el flóculo formado produciéndose altas turbiedades y concentraciones de sólidos en los efluentes. Con los gradientes por cámara 60, 40, 20 seg^{-1} se reduce la cantidad de energía y la posibilidad de romper el floculo considerándose este gradiente como óptimo y para mezcla rápida el de 861 a 1060 seg^{-1} ; ajustándose las condiciones a la calidad del agua que se trate así como de las cargas orgánicas horarias que presentan los efluentes de las plantas de tratamiento a nivel secundario.

Cabe mencionar que en clarificación se podrán evaluar algunos puntos extremos en cuanto al tiempo de retención de 40.6 min. y la alta tasa de clarificación $6.313 \text{ l/m}^2 - \text{min}$.

En cuanto a las dosis de cal se recomiendan de 300 a 450 mg/l siendo aplicativo de acuerdo al pH del agua a tratar así como el deseado para fines de remoción de amoníaco en el siguiente proceso.

III.3 Desgasificación

La remoción de amoniaco de aguas residuales en torres de agotamiento es relativamente reciente.

Análisis de costos preliminares sugieren que este proceso puede ser considerablemente más económico que el uso de procesos alternativos como la adsorción por carbón activado o por resinas.

Las concentraciones de contaminantes orgánicos volátiles en aguas residuales es menor a 1 mg/l y de otros gases disueltos menor a 100 mg/l.

En monitoreos realizados entre marzo de 1981 y marzo de 1982 en el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales "Cerro de la Estrella", se observó una concentración de nitrógeno amoniacal de 17.5 mg/l, en tanto que el nitrógeno total promedio era de 28.05 mg/l, lo que nos indica que el 62% del nitrógeno presente se encontraba en forma amoniacal.

Debido a esta situación, se diseñó un sistema para la desgasificación del agua residual en la planta piloto de "Cerro de la Estrella", ya que los criterios de la DGCOH para el uso de agua renovada para usos cuya calidad es similar a la potable (doméstico, comercial, natación, pesca, abrevaderos) van de 0.5 a 2.5 mg/l de nitrógeno amoniacal según la actividad y para cumplir con dicha norma es necesario remover una cantidad considerable.

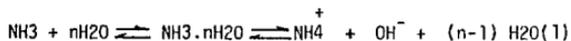
Fundamentos del Proceso

La operación unitaria asociada a la remoción de amoníaco del agua se denomina desorción, en ésta, se separa un soluto gaseoso (amoníaco) contenido en una mezcla líquida (agua), poniendo ésta en contacto con un gas inerte (aire).

El caso que nos ocupa, se efectúa por arrastre de aire a contracorriente con el agua renovada a través de torres empacadas con material sólido irregular a fin de obtener la velocidad máxima de desorción.

Desde el punto de vista económico es aún más conveniente si previamente se trata el influente con cal (coagulación) y se clarifica, ya que simultáneamente se precipita el fósforo, se remueven sólidos suspendidos y se eleva el pH, obteniéndose así beneficios adicionales. Además, debido al arrastre físico por el aire extraído a contra corriente en las torres de desgasificación, se pueden extraer orgánicos purgables (hidrocarburos aromáticos y alifáticos halogenados), algunos plaguicidas y policlorobifenilos residuales.

En las aguas residuales municipales, una cantidad importante del nitrógeno presente se encuentra en forma amoniacal (NH_3), que dependiendo del pH y la temperatura puede estar ionizado o en forma molecular.



Al aumentar el pH y la temperatura, el equilibrio de las reacciones se desplaza hacia la izquierda, aumentando así la fracción de amoníaco molecular (NH_3).

El sistema de remoción se basa en la transferencia del amoníaco gaseoso de la fase líquida a la atmósfera, por medio de un intercambio de gases; dicha transferencia sólo tiene lugar en función del amoníaco molecular, no del ionizado.

El porcentaje de NH_3 no ionizado (f) puede obtenerse a partir de la constante de ionización K_a :

$$\text{si-} \log k_a = \text{p}k_a$$

$$\text{Entonces} \quad \text{p}k_a = 0.09018 + 2729.92/T$$

$$\text{Donde:} \quad T = ^\circ \text{K}$$

$$\text{Así} \quad f = \frac{100}{1 + \text{antilog} \left(0.09018 + \frac{2729.92}{T} - \text{p}^H \right)}$$

Sustituyendo diversos valores de pH y T:

PORCENTAJE DE AMONIACO MOLECULAR (f)
TEMPERATURA (° C)

| pH | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 12.0 | 99.2 | 99.5 | 99.6 | 99.7 | 99.8 | 99.9 |
| 11.5 | 97.5 | 98.3 | 98.9 | 99.2 | 99.4 | 99.6 |
| 11.0 | 92.6 | 94.9 | 96.5 | 97.5 | 98.3 | 98.8 |
| 10.5 | 79.8 | 85.5 | 89.6 | 92.6 | 94.7 | 96.2 |
| 10.0 | 55.6 | 65.1 | 73.3 | 79.9 | 85.1 | 89.0 |
| 9.5 | 28.3 | 37.1 | 46.4 | 55.7 | 64.3 | 71.8 |
| 9.0 | 11.1 | 15.7 | 21.5 | 28.4 | 36.3 | 44.6 |
| 8.5 | 3.8 | 5.6 | 8.0 | 11.2 | 15.3 | 20.3 |
| 8.0 | 1.2 | 1.8 | 2.7 | 3.8 | 5.4 | 7.5 |
| 7.5 | 0.4 | 0.6 | 0.9 | 1.2 | 1.8 | 2.5 |
| 7.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
| 6.5 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| 6.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 |

REF. PERRY, R. H. PERRY'S CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK, 6TH ED.

MC. GRAW-HILL BOOK CO. N. Y. 1984.

Los valores mínimos recomendables tanto económica como técnicamente son a pH = 10 y temperatura entre 10 y 20°C para una remoción eficiente de NH_3 .

Por los motivos anteriores se recomienda usar cal como coagulante en el tratamiento químico y aprovechar el pH alto, pasar por las columnas de remoción de NH_3 , antes de recarbonatar y filtrar las aguas residuales en proceso de acondicionamiento.

Mecanismo de Transferencia

Las condiciones de equilibrio de concentración del amoniaco molecular en el agua y el aire se expresan por medio de la Ley de Henry:

$$C_i = K_i/p_i$$

Donde: C_i = Concentración del amoniaco en el agua (mol/m^3)

p_i = Presión parcial del amoniaco en el agua (atm)

K_i = Constante de Henry ($\text{atm m}^3/\text{mol}$)

La Ley de Henry relaciona la presión parcial del soluto en la fase vapor con la fracción molar del soluto en la solución. Enfocando la relación desde otro punto de vista, la Ley de Henry relaciona la fracción molar en el equilibrio, solubilidad de j en la solución, con la presión parcial de

J en el vapor , con la presión parcial de J en el vapor

$$X_j = \frac{1}{K_j} P_j$$

La ecuación anterior expresa que la solubilidad X_j de un constituyente volátil es proporcional a la presión parcial del mismo en la fase gaseosa en equilibrio con el líquido. Esta Ec. se emplea para correlacionar los datos de la solubilidad de gases en líquidos. Si el solvente y el gas no reaccionan químicamente, la solubilidad de gases en líquidos es pequeña por lo general, de modo que se cumple la condición de dilución.

La presión parcial del amoníaco en el aire (atm) puede ser calculada directamente de la concentración de amoníaco en el aire, expresada como

$$\frac{\text{moles NH}_3 \text{ en aire}}{\text{mol aire}}$$

CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY

| T (°C) | H _i (atm - m ³ /mol) |
|--------|--|
| 10 | 0.45 x 10 ⁻⁵ |
| 20 | 0.99 " |
| 30 | 1.53 " |
| 40 | 2.39 " |
| 50 | 3.8 " |

Así, de la ley de los gases

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

Donde:

n = Moles de NH_3 en el aire (mol)

P = Presión parcial del amoníaco (atm)

V = Volúmen del aire

T = Temperatura ($^{\circ}$ K)

K = Constante de los gases

$$8 \times 10^{-5} \text{ atm m}^3/\text{mol } ^{\circ}\text{K}$$

Haciendo balance de masa

$$C_i^e V_w = C_i^e V_w + N$$

$$C_i^e V_w = C_i^e V_w + \frac{P_i^e V_a}{RT}$$

Donde: i = Influyente

e = Efluente

$$H_i^e = \frac{P_i^e}{C_i^e} \Rightarrow P_i^e = H_i C_i^e$$

$$C_i^e V_w = C_i^e V_w + \frac{H_i C_i^e V_a}{RT} = \frac{C_i^e (V_w + H_i V_a)}{RT}$$

$$\frac{C_i^e}{C_i^e} = \frac{V_w}{V_w + H_i V_a}$$

$$\frac{C_i^e}{C_i^e} = \frac{1}{1 + \frac{H_i V_a}{RT V_w}}$$

$\frac{C_i^o}{C_i^e}$ = Relación de concentraciones de amoníaco en el agua de salida (C_i^e) y el agua de entrada (C_i^o)

$\frac{V_a}{V_w}$ = Rel. de volúmenes de aire (V_a) a volúmen de agua (V_w)

$$\frac{V_a}{V_w} = \frac{C_i^e}{C_i^o} - 1 \quad \frac{RT}{H_i}$$

RESOLVIENDO PARA DISTINTAS TEMPERATURAS:

| EFICIENCIA DE REMOCION | C_i^o / C_i^e | V_a / V_w | | | | |
|------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | | T=10°C $H_i=0.45 \times 10^{-5}$ | T=20°C $H_i=0.99 \times 10^{-5}$ | T=30°C $H_i=1.53 \times 10^{-5}$ | T=40°C $H_i=2.39 \times 10^{-5}$ | T=50°C $H_i=3.8 \times 10^{-5}$ |
| 99 | 100 | 510 893 | 240 424 | 160 874 | 106 383 | 69 046 |
| 95 | 20 | 98 050 | 46 142 | 30 875 | 20 417 | 13 251 |
| 90 | 10 | 46 445 | 21 857 | 14 625 | 9 671 | 6 277 |
| 80 | 5 | 20 642 | 9 714 | 6 500 | 4 298 | 2 790 |
| 70 | 3.3 | 12 041 | 5 667 | 3 792 | 2 507 | 1 627 |
| 60 | 2.5 | 7 741 | 3 643 | 2 437 | 1 612 | 1 046 |
| | 2 | 5 161 | 2 429 | 1 625 | 1 075 | 697 |

Como podemos observar, la eficiencia de remoción es afectada de manera considerable por la temperatura del agua.

Además de las condiciones de equilibrio, la eficiencia depende de la velocidad de transferencia del gas:

$$N_i = K_{iL} (C_i P_i / H_i)$$

Donde:

K_{iL} = Coef. global de transferencia del líquido

N_i = Flujo de amoníaco

De acuerdo a la teoría de la doble capa.

$$\frac{1}{K_{iL}} = \frac{1}{R_{iL}} + \frac{1}{H_i R_{ig}/RT}$$

Entonces :
$$\frac{1}{K_{iL}} = \frac{1}{K_{iL}} + \frac{1}{H_i K_{ig}/RT}$$

R_{iL} = Resistencia de la Película Líquida

R_{ig} = Resistencia de la Película Gaseosa

K_{iL} = Coef. Individual de Transferencia de la Película Líquida

K_{ig} = Coef. Individual de Transferencia de la Película gaseosa

Estos coeficientes deben determinarse experimentalmente, ya que dependen de variables como la geometría del equipo, turbulencia, etc.

Criterios de Diseño

El aparato más frecuentemente utilizado en la desorción de gases y también en otras operaciones es la torre de relleno, que consta esencialmente de una columna, o torre, prevista de una entrada y una cámara de distribución de gas en la parte inferior; salidas para el gas y el líquido en la cima y en el fondo, respectivamente y un lecho de partículas sólidas inertes que rellenan la columna y que reciben el nombre de relleno.

Se han diseñado numerosos tipos de relleno; algunos se distribuyen al azar dentro de la torre, mientras otros se colocan ordenadamente. Los primeros están generalmente formados por piezas cuya dimensión mayor está comprendida entre 5 y 50 mm y se utilizan mucho en torres pequeñas. Los rellenos colocados ordenadamente están formados por piezas de 5 a 20 cm y se utilizan solamente en torres grandes. Los anillos Raschig, Pall, Monturas Berl, Intalox, Tellerettes, son ejemplos de rellenos al azar; mientras que los anillos de espiral simple, doble o triple anillos Rashing de 5 y 8 cm de \emptyset se colocan de manera ordenada.

Las principales características de un relleno son:

1. Químicamente inerte para los fluidos que circulan en la torre.
2. Tener suficiente resistencia mecánica sin un peso excesivo.
3. Permitir un paso adecuado de ambas corrientes sin originar una retención de líquido o una caída de presión excesivas.

4. Proporcionar un buen contacto entre las fases.
5. Tener un costo relativamente bajo.

La mayor parte de los rellenos se construyen con materiales baratos, inertes y relativamente ligeros como arcilla, porcelana, grafito o plástico; también pueden hacerse metálicos de pared delgada, construidos en acero o aluminio. Mediante unidades de relleno de formas irregulares o huecas se consiguen grandes espacios vacíos, con una porosidad del 60% o superior, que permiten flujos elevados de las fases.

El contacto entre el líquido y el gas se realiza mediante películas descendentes sobre la superficie del relleno, estas tienden a hacerse más gruesas por zonas de forma que el líquido tiende a preunirse formando pequeños arroyuelos que curculan a través de trayectorias localizadas en el lecho. Para bajas velocidades del líquido, una gran parte de la superficie del relleno puede estar seca o, mejor, recubierta de una película estancada de líquido. Este efecto se conoce con el nombre de canalización.

En torres de tamaño moderado, la canalización se hace mínima cuando el diámetro de la torre es superior a ocho veces el diámetro del relleno. Si la relación entre el diámetro de la torre y el del relleno es inferior a 8:1, el líquido tiende a circular por el exterior del relleno y descender por la pared de la columna.

La altura de una torre de relleno está en función de la velocidad de desorción que, por otra parte depende de la velocidad de transferencia de materia a través de las fases de líquido y gas.

La velocidad de desorción puede explicarse si el componente A, que es el soluto gaseoso que se transfiere desde el líquido al gas, tiene que pasar en serie a través de 2 resistencias difusionales correspondientes al gas y al líquido, la teoría de esta transferencia también recibe el nombre de teoría de la doble película o capa. En la remoción de amoníaco, este cruza la interfase, mientras que el componente B (aire) es inerte y estacionario con respecto a la interfase.

La unidad de desgasificación fue diseñada en base a datos empíricos de la bibliografía, esto es, tomando las recomendaciones de organismos como la WPCF, EPA y experiencias obtenidas en la planta Factory 21 en Orange County California (USA). (Cuadro No. III.12).

Como puede observarse, estos criterios de diseño se han generado para las condiciones ambientales de EUA, donde la temperatura media anual es de 5° C; pero ésto beneficia la transferencia del amoníaco ya que en México, D. F., la temperatura media anual es de 25° C, siendo menor la ionización del NH_3 en 16% y disminuyendo el requerimiento de aire 53%; por lo tanto se considera que la unidad podrá operar a un pH = 10 y aproximadamente 50% menos aire, con respecto a E.U.A.

| PARAMETROS DE DISEÑO. | WPCF-EPA. | Planta Factory 21 | El Estado del Arte de Tret. | D.E.T.A.A.R. |
|---|---------------------------------------|---------------------|---|----------------------------------|
| C.H.S. | 59-175 m^3/m^2-d | 48-64.5 m^3/m^2-d | 58.7-117.3 m^3/m^2-d | 58.4 m^3/m^2-d |
| qa/Qw | 2250-3750 adim. | 3000 | 2244-3741 | 3000 |
| hempaue | 6.0-7.60 m | 7.60 m | 6.10 - 7.62 | 7.32 |
| h _f aire | 1.3-3.2 cm 0.02-0.05 Psi | --- | 0.13-0.16 cm/m de empaque | 7cm de col. de agua (0.1 Psi) |
| pH | 10.8-11.5 | --- | 10.8-11.5 | 11.1 |
| Velocidad punta del abanico del extractor | 46 - 61 m/seg. 9,000-12,000 ft/min | --- | | |
| Tipo de empaque | Madera o plástico | --- | Madera o plástico distribución uniforme del agua | Empaque modular sintético |

CUADRO III.12 Parametros Recomendables en la Desgasificación.

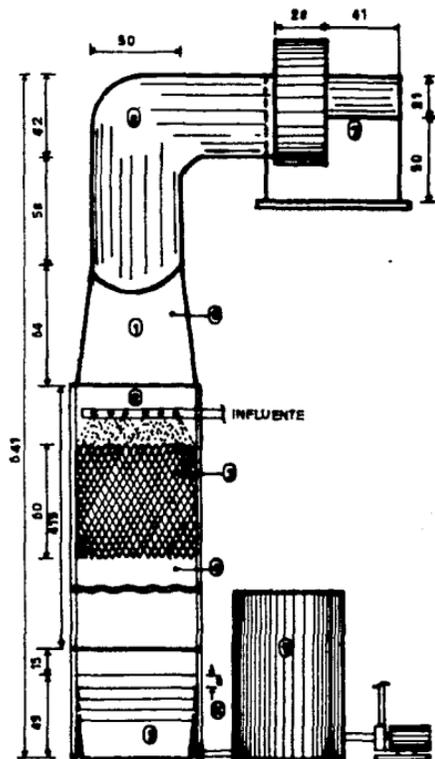
Las eficiencias reales de remoción pueden ser aún mayores debido a que el aire a contracorriente favorece las condiciones de equilibrio del amoniaco y trabajando las dos torres en serie, con equipos de extracción independientes.

Descripción de la Unidad

La unidad se construyó a base de dos torres rectangulares de 0.74 m^2 , una c.h.s. = $58.4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$ ($1.0 \text{ gpm}/\text{ft}^2$) y una altura de empaque de plástico modular de 3.65 m c/una (12 ft). La relación aire/agua utilizada es de $3\ 000 \text{ m}^3 \text{ aire}/\text{m}^3$ de agua; que para el gasto de diseño el caudal de aire es $5\ 400 \text{ m}^3/\text{hr.}$, $3\ 172 \text{ ft}^3/\text{min.}$, la potencia de los extractores es de 3.0 h.p. y una caída de presión de $4''$ de columna de agua. (Figura 8).

La unidad cuenta además con un distribuidor tipo antena para la aspersión del agua en la parte superior, sistema de recolección de agua tratada y unidad de transferencia para su operación en serie y paralelo.

UNIDAD DE REMOCION DE AMONIACO.



- NOBENCILATURA:
- 1-TORRE DE DESGASIFICACION
 - 2-DIFUSOR.
 - 3-EMPALQUE SINTETICO.
 - 4-LONA AMALADA.
 - 5-RECIPENTE COLECTOR.
 - 6-CAMPANA DE EXTRACCION.
 - 7-MOTOR
 - 8-EXTRACTOR.
 - 9-UNIDAD DE TRANSFERENCIA.
 - 10-DEFLECTORES.

ACOTAR
ESCALA: 1:25

FIGURA 8

Programa de Pruebas

Los parámetros que controlan el proceso de desgasificación son la remoción de nitrógeno amoniacal, la altura de empaque, la relación aire/agua, el pH y la temperatura del agua. En la figura 7 se muestra el diagrama de pruebas para las diferentes alternativas de operación experimentadas y en los cuadros III.13.1 al III.13.4 se resumen los resultados medios obtenidos.

En el cuadro III.14 se tiene que para una relación aire/agua de 3 000 y dos diferentes alturas de empaque 3.65 m y 7.30 m, la eficiencia de remoción promedio máxima es del 69%, en un rango de pH 10.0-10.5 a una temperatura media de 18° C y una altura de columna de 7.30 m; ya para una columna de 3.65 m y el mismo rango la eficiencia baja un 34% respecto a la anterior (gráfica III.11.a,b,c.)

Para verificar el comportamiento del sistema se procedió a calcular una serie de parámetros como la fracción no ionizada de amoníaco, la cual depende del pH del agua y de la temperatura del agua:

$$f = \frac{1}{(1 + \text{Antilog. } (0.09018 + 2729/T - \text{pH}))}$$

De donde T en grados Rankin.

$$T = 273 + ^\circ \text{C}$$

DESGASIFICACION

123

| PARAMETROS DE OPERACION | RANGO DE | PH | TEMPERAT. | NITROGENO AMON. | | EFICIEN- | |
|---|---|-----------|-----------|-----------------|------------|------------------------|------|
| | PH | | °C | INF.(Mg/l) | EFL.(Mg/l) | CIAS DE REMOCION (D.%) | |
| Qw = 0.5 l/seg Qa = 1500 l/seg Qm Qv = 3,000 adim. | 10.0-10.5 | 10.35 | 14 | 8.38 | 2.89 | 65.5 | |
| | 10.24 | 10.24 | 17 | 10.10 | 5.40 | 46.5 | |
| | | 9.66 | 17 | 0.90 | - | - | |
| | | 10.37 | 18 | 2.31 | 1.01 | 56.3 | |
| | | 10.34 | 18 | 0.06 | - | - | |
| | | 9.94 | 19 | 0.70 | - | - | |
| | | 10.47 | 20 | 11.03 | - | - | |
| | | | 10.19 | 18 | 4.78 | 3.10 | 35.1 |
| | hempaque = 3.65 m 1 sola torre C.H.S.=40.5 l/m ² -min. | 10.5-11.0 | 10.87 | 15 | 9.24 | 3.17 | 65.7 |
| | | | 10.66 | 16 | 3.37 | 2.35 | 30.6 |
| | | 10.81 | 16 | 3.70 | 2.02 | 45.4 | |
| | | 10.54 | 16 | 5.72 | 3.03 | 47.0 | |
| | | 10.95 | 18 | 9.92 | - | - | |
| | | 10.78 | 19 | 2.82 | - | - | |
| | | 10.99 | 19 | 0.12 | - | - | |
| | | 10.82 | 19 | - | - | - | |
| | | 10.57 | 20 | 0.90 | 0.10 | 88.8 | |
| | | 10.65 | 20 | 7.32 | - | - | |
| | | 10.68 | 20 | 6.00 | - | - | |
| | | 10.68 | 20 | - | - | - | |
| | | 10.72 | 20 | 0.127 | - | - | |
| | | 10.82 | 21 | 1.00 | - | - | |
| | | 10.75 | 21 | - | - | - | |
| | 10.78 | 21 | 0.317 | - | - | | |
| | 10.53 | 21 | - | - | - | | |
| $\bar{x} =$ | | 10.74 | 19 | 3.89 | 2.13 | 45.2 | |
| | 11.0-11.50 | 11.40 | 16 | 7.51 | 2.02 | 73.1 | |
| | | 11.18 | 16 | 1.70 | 1.30 | 23.5 | |
| | | 11.05 | 17 | 1.97 | - | - | |
| | | 11.23 | 17 | 3.03 | 1.68 | 44.5 | |
| | | 11.05 | 18 | 7.10 | - | - | |
| | | 11.26 | 18 | 0.17 | - | - | |
| | | 11.28 | 18 | 0.10 | 0.19 | (-) | |
| | | 11.09 | 18 | 3.00 | 1.60 | 46.6 | |
| | | 11.07 | 19 | 0.12 | 0.12 | - | |
| | | 11.43 | 20 | 0.569 | 0.253 | 55.5 | |
| | | 11.42 | 20 | 0.19 | - | - | |
| | | 11.27 | 20 | 0.10 | - | - | |
| | | 11.08 | 20 | - | - | - | |
| | 11.09 | 21 | 0.37 | - | - | | |
| $\bar{x} =$ | | 11.30 | 21 | 0.60 | - | - | |
| | | 11.21 | 19 | 1.89 | 1.02 | 46.0 | |

CUADRO III. 13.1 RESUMEN RESULTADOS MEDIOS OBTENIDOS

DESGASIFICACION

124

| PARAMETROS DE OPERACION. | RANGO DE | P H | TEMPERAT. | NITROGENO AMON. | | EFICIENCIA |
|---|-----------|-------|-----------|-----------------|-------|-------------|
| | P H. | — | °C | INFL. | EFL. | DE REM.(n)% |
| CONTINUACION CUADRO 13.1 | 11.5-12.0 | 11.82 | 11 | 0.90 | 1.00 | (-) |
| | | 11.82 | 12 | 10.00 | 2.00 | 80.0 |
| | | 12.06 | 16 | 0.90 | 0.80 | 11.1 |
| | | 11.54 | 18 | 1.14 | - | - |
| | | 11.80 | 18 | 3.37 | 1.68 | 50.1 |
| | | 11.64 | 19 | 0.82 | 0.32 | 60.9 |
| | | 11.67 | 19 | 0.82 | 0.25 | 69.5 |
| \bar{x} | | 11.76 | 16 | 2.56 | 1.01 | 60.5 |
| $Q_w = 0.5$ l/seg $Q_a = 1500$ l/seg $Q_a = 3,000$ Q_w hempaque = 7.30 m 2 torres en serie C.B.S. = 40.5 l/m ² -min. | 10.0-10.5 | 10.45 | 11 | 3.00 | 0.80 | 73.3 |
| | | 10.20 | 11 | 9.24 | 2.60 | 71.8 |
| | | 10.47 | 11 | 3.70 | 1.01 | 72.7 |
| | | 10.48 | 11 | 9.92 | 2.66 | 73.2 |
| | | 10.36 | 12 | 7.51 | 2.02 | 73.1 |
| | | 9.94 | 13 | 2.31 | 0.50 | 78.3 |
| | | 10.12 | 13 | 11.03 | 3.32 | 69.9 |
| | | 9.63 | 13 | - | 1.86 | - |
| | | 10.14 | 13 | 6.56 | 0.80 | 87.8 |
| | | 10.35 | 14 | 8.38 | 4.62 | 44.9 |
| | | 10.31 | 14 | 6.00 | 3.20 | 46.6 |
| | | 10.34 | 14 | 0.19 | 0.25 | (-) |
| | | 10.31 | 14 | - | 0.127 | - |
| | | 10.25 | 15 | 2.80 | 1.00 | 64.3 |
| | | 9.89 | 15 | 2.70 | - | - |
| | | 10.32 | 15 | 0.127 | 0.19 | (-) |
| | | 10.32 | 15 | 0.317 | 0.254 | 19.9 |
| | | 10.02 | 15 | - | 0.19 | - |
| | | 10.27 | 16 | - | 2.29 | - |
| | | 10.24 | 17 | 10.1 | 5.10 | 49.5 |
| 10.26 | 17 | 7.32 | 1.97 | 73.1 | | |
| 10.47 | 17 | 0.30 | 0.0 | 100 | | |
| 10.30 | 18 | 10.80 | 1.0 | 90.7 | | |
| 10.08 | 18 | 0.60 | 0.22 | 63.3 | | |
| 9.90 | 18 | 0.06 | 0.003 | 95.0 | | |
| | | | | | 69.4 | |
| \bar{x} | | 10.22 | 14.0 | 4.90 | 1.50 | 69.4 |

CUADRO III. 13.2 RESUMEN RESULTADOS MEDIOS OBTENIDOS

DES GASIFICACION

125

| | RANGO DE PH | P _H | TEMPERATURA °C | NITROGENO AMON. | | EFIC. (%) |
|-------------------|---|----------------|----------------|-----------------|-------|-----------|
| | | | | LINEA | RIE | |
| Cont. Cuadro 13.2 | 10.5-11.0 | 10.55 | 11 | - | - | - |
| | | 10.59 | 11 | 7.10 | 1.09 | 31.8 |
| | | 10.97 | 12 | 0.10 | 0.60 | 32.2 |
| | | 10.75 | 13 | - | 1.00 | - |
| | | 10.91 | 13 | 0.10 | - | - |
| | | 10.50 | 14 | 0.90 | 0.50 | 44.4 |
| | | 10.54 | 14 | 0.12 | 0.127 | (-) |
| | | 10.93 | 14 | 0.17 | - | - |
| | | 10.70 | 15 | 0.217 | 0.19 | 40.1 |
| | | 10.66 | 16 | 3.37 | 2.07 | 40.0 |
| | 10.54 | 16 | 5.72 | 2.35 | 55.9 | |
| | | R = 10.66 | 14 | 2.13 | 1.13 | 37.0 |
| | 11.0-11.5 | 11.48 | 10 | 2.37 | 1.03 | 70.0 |
| | | 11.40 | 13 | 0.782 | 0.063 | 92.3 |
| | | 11.41 | 13 | 0.569 | 0.063 | 86.3 |
| | | 11.45 | 13 | 0.822 | 0.359 | 77.0 |
| | | 11.24 | 17 | 1.012 | 0.759 | 25.0 |
| | | 11.23 | 17 | 3.03 | 1.01 | 56.6 |
| | | 11.05 | 17 | 1.97 | 0.70 | 64.4 |
| | | 11.28 | 18 | 0.10 | 0.10 | (-) |
| | | 11.07 | 18 | 0.12 | 0.12 | (-) |
| | | | R = 11.25 | 15 | 1.31 | 0.40 |
| | 11.5-12.0 | 11.62 | 11 | 10.0 | 2.4 | 76.0 |
| | | 11.84 | 13 | 1.14 | 0.316 | 72.2 |
| | | 11.58 | 16 | 1.07 | 0.44 | 58.8 |
| | | 11.54 | 18 | 0.379 | 1.139 | (-) |
| | | | R = 11.65 | 15 | 3.15 | 1.07 |
| | Q = 0.25 l/seg. Q = 1500 l/seg. Q = 4085 Q = 1.55 m 1 TORRE EN OPERACION CILINDRO DE PRESION | 10.0-10.5 | 10.15 | 16 | 5.95 | 3.35 |
| 10.14 | | | 16 | 6.25 | 3.18 | 42.7 |
| 10.29 | | | 16 | 6.40 | 4.24 | 36.8 |
| 10.15 | | | 18 | 6.18 | 5.64 | 8.7 |
| 10.13 | | | 18 | 7.09 | 4.30 | 32.3 |
| 10.22 | | | 19 | 7.07 | 6.07 | 14.1 |
| | | R = 10.20 | 17 | 6.48 | 4.57 | 39.4 |
| 11.0-11.5 | | 11.22 | 16 | 2.84 | 1.24 | 56.3 |
| | | R = 11.22 | 16 | 2.84 | 1.24 | 56.3 |
| 12.0-12.5 | | 12.27 | 16 | 2.98 | 1.10 | 69.8 |
| | | 12.33 | 16 | 2.84 | 0.971 | 65.8 |
| | | 12.33 | 16 | 2.71 | 1.86 | 31.4 |
| | R = 12.31 | 16 | 2.84 | 1.24 | 56.3 | |

CUADRO III.13.3 RESUMEN RESULTADOS MEDIOS OBTENIDOS

DESGASIFICACION

126

| PARAMETROS DE OPERACION. | RANGO DE PH | PH | TEMPERAT. °C | NITROGENO AMON. | | EFICIEN - CLAS. RE- CIACION. n (%) | |
|---|--|-------------|--------------|-----------------|-------|------------------------------------|------|
| | | | | INF. | EFL. | | |
| Qw = 0.35 l/seg Qa = 1500 l/seg Qa / Qw = 4285 hempaque = 7.30 m 2 Torres en operación 31280 | 10.0-10.5 | 10.15 | 16 | 5.95 | 1.90 | 68.1 | |
| | | 10.14 | 16 | 6.25 | 2.51 | 59.8 | |
| | | 10.29 | 16 | 6.40 | 2.74 | 57.2 | |
| | | 10.15 | 16 | 6.18 | 3.66 | 40.7 | |
| | | 10.20 | 17 | 1.22 | 0.305 | 75 | |
| | | 10.39 | 17 | 1.22 | 0.300 | 75.4 | |
| | 10.33 | 19 | 7.01 | 3.73 | 53.2 | | |
| | $\bar{x} =$ | 10.23 | 17 | 4.89 | 2.16 | 55.8 | |
| | 10.5-11.0 | 10.68 | 17 | 1.22 | 0.61 | 50.0 | |
| | | $\bar{x} =$ | 10.68 | 17 | 1.22 | 0.61 | 50.0 |
| 11.0-11.5 | 11.22 | 16 | 2.84 | 0.485 | 82.9 | | |
| | $\bar{x} =$ | 11.22 | 16 | 2.84 | 0.485 | 82.9 | |
| | 12.0-12.5 | 12.22 | 16 | 2.98 | 0.90 | 69.8 | |
| | 12.33 | 16 | 2.84 | 0.97 | 65.8 | | |
| 12.38 | 16 | 2.71 | 1.86 | 31.4 | | | |
| $\bar{x} =$ | 12.31 | 16 | 2.84 | 1.24 | 56.3 | | |
| Qw = 0.25 l/seg Qa = 1500 l/seg Qa / Qw = 6,000 | 10.0-10.5 | 10.58 | 19 | 6.10 | 3.28 | 46.2 | |
| | | 10.61 | 18 | 6.02 | 2.82 | 53.1 | |
| | $\bar{x} =$ | 10.59 | 18 | 6.06 | 3.05 | 49.6 | |
| | 10.5-11.0 | 10.58 | 19 | 6.10 | 1.90 | 68.8 | |
| | | 10.61 | 18 | 6.02 | 1.60 | 73.4 | |
| | | 10.60 | 18 | 6.10 | 2.36 | 61.3 | |
| | | 10.61 | 18 | 5.00 | - | - | |
| | $\bar{x} =$ | 10.60 | 18 | 5.80 | 1.95 | 66.4 | |
| | Qw = 0.35 l/seg Qa = 1500 l/seg Qa / Qw = 8571 | 10.0-10.5 | 10.13 | 19 | 7.04 | 4.80 | 31.8 |
| | | | $\bar{x} =$ | 10.13 | 19 | 7.04 | 4.80 |
| 12.0-12.5 | | 12.51 | - | 2.69 | 1.30 | 51.6 | |
| | | 12.45 | - | 2.95 | 1.64 | 44.4 | |
| $\bar{x} =$ | | 12.48 | - | 2.82 | 1.47 | 47.8 | |
| 10.0-10.5 | | 10.41 | 17 | 7.98 | 4.16 | 47.8 | |
| | | 10.43 | 17 | 7.72 | 4.34 | 43.78 | |
| | | 10.00 | 19 | 6.02 | 5.34 | 11.3 | |
| | | 9.84 | 19 | 6.33 | 2.74 | 56.7 | |
| $\bar{x} =$ | | 10.17 | 18 | 7.01 | 4.14 | 40.9 | |
| 12.0-12.5 | 12.45 | - | 2.95 | 1.64 | 44.4 | | |
| | 12.45 | - | 2.95 | 1.99 | 32.5 | | |
| $\bar{x} =$ | 12.45 | - | 2.95 | 1.81 | 38.6 | | |

CUADRO III. 13.4 RESUMEN RESULTADOS MEDIOS OBTENIDOS

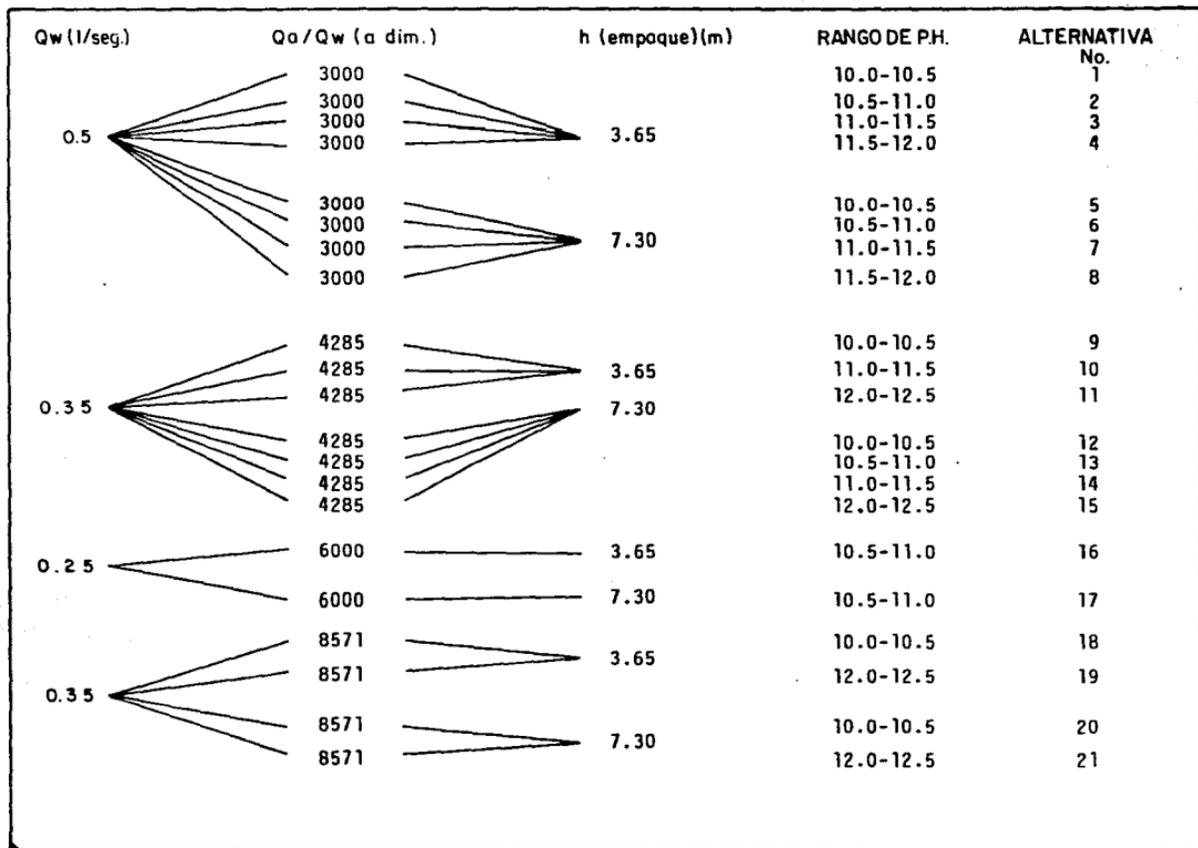
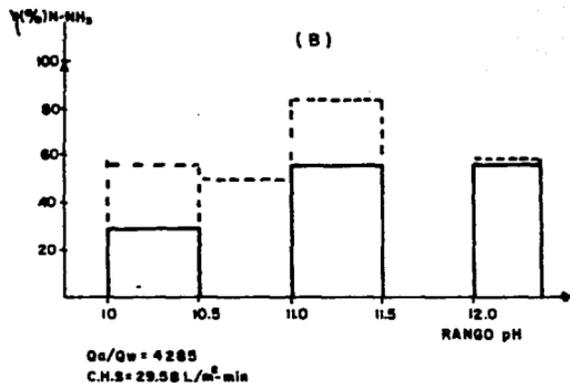
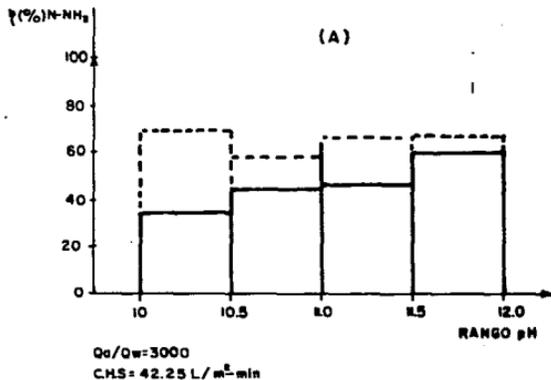
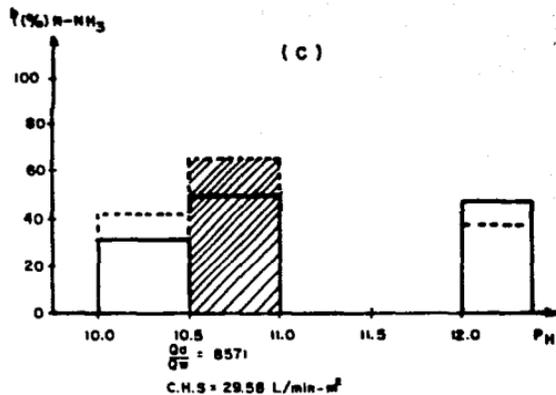


FIGURA 7 DIAGRAMA DE ARBOL ALTERNATIVAS DE OPERACION DE DEGASIFICACION



GRAFICA III. II. VARIACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA REMOCION DEL AMONIACO PARA DIFERENTES ALTERNATIVAS DE OPERACION

También se calculó la constante "R" que depende de la cantidad molecular de agua y aire. Ya convertidos los valores se tiene lo siguiente:

$$R = H * \frac{r}{1250}$$

H = cte de Henry que depende de la temperatura del agua

r = relación aire/agua en $m^3/hr/m^3/hr.$

Para calcular el valor de "R" se consideró una temperatura promedio del agua de 20° C, por lo que H = 0.625 considerando los diferentes valores de "r = Qa/Qw".

Posteriormente se calculó la constante "K" de donde:

$$f = \frac{R}{R-1} * \left[\exp \left(K * t * \frac{R-1}{R} \right) - 1 \right] ; Ef = \frac{F}{1+F}$$

Despejando "K"

$$K = \frac{\ln \left(1 + \frac{Ef}{1-Ef} * \frac{R-1}{R} \right)}{R-1}$$

R = cte. general del sistema (1/hr)

Ef = Eficiencia de remoción (%)

F = Factor de eficiencia (adim.)

considerandose un proceso dinámico la constante final del sistema es:

$$K = K_f \dots\dots\dots (\text{adim.})$$

Para calcular las ctes. "K" finales se agruparon los resultados por condiciones de operación y se calculó el valor promedio. Así finalmente se calculó la eficiencia de remoción con las constantes. Y el valor de "F" el cual se derivó de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{R}{R-1} \left[\text{Exp} \left(Kt \left(\frac{R-1}{R} \right) - 1 \right) \right]$$

$$t = \frac{V}{Q_w} = \frac{A \times \text{hemp.}}{Q_w} ;$$

t = Tiempo virtual de retención en (hr)

A = Area de la sección transversal (m²)

hemp = Altura de empaque (m).

Q_w = Caudal de agua en (m³/hr.)

En el cuadro III.14 se calcularon los valores promedios de las "K" resultando de 0.22 a 0.48 en el cuadro III.15 se resume para eficiencias de remoción los valores de K y a diferentes alturas de empaque. Finalmente en la gráfica III.12 se muestra el comportamiento entre la eficiencia medida y la eficiencia calculada de lo cual se acepta la dependencia entre las variables calculadas.

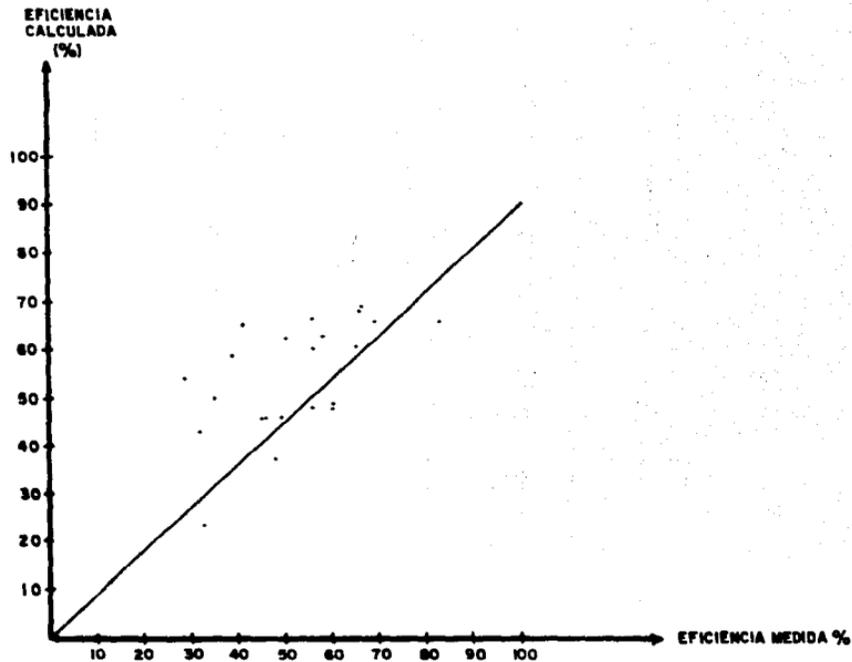
| Qw (l/seg.) | Qa (l/seg.) | Qa/Qw (adim.) | Hempaque (m) | C.H.S. l/m ² -min. | N - NH ₃ I N L E F L | | (%) |
|----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|------|------|
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 40.50 | 4.78 | 3.10 | 35.1 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 40.50 | 3.89 | 2.13 | 35.2 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 40.50 | 1.89 | 1.02 | 46.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 40.50 | 2.56 | 1.01 | 60.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 40.5 | 4.90 | 1.50 | 69.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 40.5 | 2.63 | 1.13 | 57.6 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 40.5 | 1.31 | 0.46 | 65.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 40.5 | 3.15 | 1.07 | 66.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 3.65 | 29.58 | 6.48 | 4.57 | 29.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 3.65 | 29.58 | 2.84 | 1.24 | 56.3 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 3.65 | 29.58 | 2.84 | 1.24 | 56.3 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 4.89 | 2.16 | 55.8 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 1.22 | 0.61 | 50.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 2.84 | 0.48 | 52.9 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 2.84 | 1.24 | 56.3 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 4.59 | 2.16 | 55.8 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 1.22 | 0.61 | 50.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 2.84 | 0.48 | 52.9 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 2.84 | 1.24 | 56.3 |
| 0.25 | 1500 | 6000 | 3.65 | 21.13 | 6.06 | 3.05 | 49.6 |
| 0.25 | 1500 | 6000 | 7.30 | 21.13 | 5.80 | 1.35 | 50.4 |
| 0.35 | 1500 | 8571 | 3.65 | 29.58 | 7.04 | 1.00 | 51.0 |
| 0.35 | 1500 | 8571 | 3.65 | 29.58 | 2.82 | 1.47 | 47.0 |
| 0.35 | 1500 | 8571 | 7.30 | 29.58 | 7.01 | 1.14 | 40.9 |
| 0.35 | 1500 | 8571 | 7.30 | 29.58 | 2.95 | 1.81 | 38.6 |

CUADRO III.14 RESUMEN DE LA REMOCION EN DESGASIFICACION.

| Gw | Ge | Ga/Gw | A Columna | C.H.S. | N- NH ₃ | | PH | EFICIENCIA de Remoc. (G) % | f | R | k | K | EFICIENCIA CALCULADA % |
|-------|-------|-------|-----------|---------|--------------------|------|-------|----------------------------|------------|------|------|----------------|------------------------|
| 1/300 | 1/300 | g/g | g | 1/300 g | lit. | E/L | | | No. litras | | | | |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 42.25 | 4.78 | 2.10 | 10.19 | 35.1 | 0.82 | 1.5 | 0.33 | 0.27 | 50.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 42.25 | 3.89 | 2.13 | 10.74 | 45.2 | 0.95 | 1.5 | 0.48 | 0.45 | 46.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 42.25 | 1.89 | 1.02 | 11.21 | 46.0 | 0.96 | 1.5 | 0.50 | 0.43 | 46.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 3.65 | 42.25 | 2.56 | 1.01 | 11.76 | 60.0 | 0.90 | 1.5 | 0.41 | 0.72 | 48.0 |
| | | | | | | | | | | | | \bar{x} 0.45 | |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 42.25 | 4.00 | 1.50 | 10.22 | 69.0 | 0.81 | 1.5 | 0.55 | 0.44 | 66.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 42.25 | 2.63 | 1.13 | 10.68 | 57.6 | 0.92 | 1.5 | 0.37 | 0.34 | 62.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 42.25 | 1.31 | 0.46 | 11.25 | 65.0 | 0.98 | 1.5 | 0.48 | 0.47 | 61.0 |
| 0.5 | 1500 | 3000 | 7.30 | 42.25 | 3.15 | 1.07 | 11.65 | 66.0 | 0.76 | 1.5 | 0.50 | 0.38 | 68.0 |
| | | | | | | | | | | | | \bar{x} 0.41 | |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 3.65 | 29.58 | 6.48 | 4.57 | 10.20 | 29 | 0.83 | 2.14 | 0.17 | 0.14 | 54.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 3.65 | 29.58 | 2.84 | 1.24 | 11.22 | 56.3 | 0.98 | 2.14 | 0.46 | 0.45 | 48.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 3.65 | 29.58 | 2.84 | 1.24 | 12.31 | 56.3 | 1.00 | 2.14 | 0.46 | 0.46 | 48.0 |
| | | | | | | | | | | | | \bar{x} 0.35 | |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 4.89 | 2.16 | 10.23 | 55.8 | 0.84 | 2.14 | 0.22 | 0.18 | 66.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 1.22 | 0.61 | 10.68 | 50.0 | 0.94 | 2.14 | 0.19 | 0.18 | 62.3 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 2.84 | 0.48 | 11.22 | 82.9 | 0.84 | 2.14 | 0.56 | 0.47 | 66.0 |
| 0.35 | 1500 | 4285 | 7.30 | 29.58 | 2.84 | 1.24 | 12.31 | 56.3 | 1.00 | 2.14 | 0.23 | 0.23 | 60.0 |
| | | | | | | | | | | | | \bar{x} 0.26 | |
| 0.25 | 1500 | 6000 | 3.65 | 21.13 | 6.06 | 3.05 | 10.59 | 49.6 | 0.93 | 3.00 | 0.25 | 0.23 | 46.14 |
| 0.25 | 1500 | 6000 | 7.30 | 21.13 | 5.3 | 1.45 | 10.60 | 66.4 | 0.93 | 3.00 | 0.21 | 0.19 | 68.8 |
| 0.35 | 1500 | 8571 | 3.65 | 29.58 | 7.04 | 4.50 | 10.13 | 31.8 | 0.83 | 4.28 | 0.18 | 0.15 | 42.93 |
| 0.35 | 1500 | 8571 | 3.65 | 29.58 | 2.82 | 1.47 | 12.48 | 47.8 | 1.00 | 4.28 | 0.32 | 0.32 | 37.40 |
| | | | | | | | | | | | | \bar{x} 0.23 | |
| 0.35 | 1500 | 8571 | 7.30 | 29.58 | 7.01 | 4.14 | 10.17 | 40.9 | 0.83 | 4.28 | 0.26 | 0.21 | 65.2 |
| 0.25 | 1500 | 8571 | 7.30 | 29.58 | 2.95 | 1.81 | 12.45 | 38.6 | 0.99 | 4.28 | 0.24 | 0.24 | 59.1 |
| | | | | | | | | | | | | \bar{x} 0.22 | |

CUADRO III. 15 RESUMEN DE LA REMOCION EN DESGASIFICACION

**GRAFICA III.12 EFICIENCIA MEDIDA Y CALCULADA EN
DESGASIFICACION**



11.4 Recarbonatación

El efluente del proceso de tratamiento químico generalmente presenta un alto pH, (10-11.5), debido al uso de cal como coagulante primario, convirtiendo los bicarbonatos y carbonatos a hidróxidos, siendo conveniente la inyección de CO_2 al agua para disminuir el pH, siendo este el propósito básico de la recarbonatación.

Cuando el proceso se lleva a cabo apropiadamente, se obtiene el equilibrio del carbonato de calcio en el agua evitándose problemas de depósitos e incrustación de tuberías, así como el acondicionamiento de las aguas para procesos posteriores como filtración y adsorción en carbón activado; ya que de no reducir a un pH menor a 7, se afecta de manera negativa la eficiencia de los mismos.

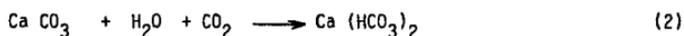
Mecanismo del Proceso

La dureza presente en el agua generalmente se debe a la presencia de compuestos de calcio y magnesio, iones metálicos como estroncio, hierro y manganeso, combinados con aniones divalentes (carbonatos y sulfatos), monovalentas (bicarbonatos, cloruros y nitratos).

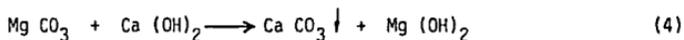
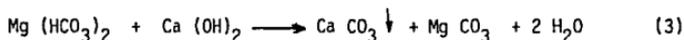
La dureza atribuible a los carbonatos de calcio y magnesio se conoce como dureza de carbonatos, mientras que la ocasionada por los sulfatos, cloruros o

nitratos de calcio y magnesio recibe el nombre de dureza de carbonatos, en algunas aguas ésta medición puede incluir también alguna alcalinidad del sodio, si la alcalinidad total es superior a la dureza total.

En el proceso de recarbonatación, el dióxido de carbono (CO_2) reacciona con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), para formar carbonato de calcio (Ca CO_3), el cual se precipita, realizándose posteriormente una post-recarbonatación, en la cual el (Ca CO_3) se reduce a bicarbonato de calcio ($\text{Ca} (\text{HCO}_3)_2$).

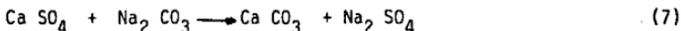


En el caso de la presencia de magnesio, las reacciones que se llevan a cabo son:



Generalmente se encuentra presente sodio en solución, por lo que también participa en las reacciones:





En los procesos de tratamiento de aguas, es práctico expresar todas las formas de alcalinidad en términos de carbonato de calcio; las cantidades de CO_2 requerido pueden calcularse con las ecuaciones:

- 1) CO_2 requerido para convertir Ca (OH)_2 a Ca CO_3 (reac. (1))

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ (mg/l)} &= \frac{\text{PM de CO}_2}{\text{PM de CaCO}_3} * \text{alcalinidad de OH}^- \text{ en mg/l Ca CO}_3 \\ &= 0.44 * \text{alcalinidad de OH}^- \text{ en mg/l como Ca CO}_3 \end{aligned}$$

- 2) CO_2 requerido para convertir el Ca CO_3 a $\text{Ca (HCO}_3)_2$ (reac. (2))

$$\text{CO}_2 \text{ (mg/l)} = 0.44 * \text{alcalinidad de CO}_3^{2-} \text{ como Ca CO}_3$$

- 3) CO_2 requerido para convertir el Ca (OH)_2 a $\text{Ca (HCO}_3)_2$ (reac (1) +

$$\begin{aligned} \text{reac. (2)) } \text{CO}_2 \text{ (mg/l)} &= 0.88 * \text{alcalinidad de OH}^- \text{ en mg/l} \\ &\text{como Ca CO}_3 \end{aligned}$$

Indices para la caracterización del agua

La aplicación de algunos de los principios fisicoquímicos como ley de acción de masas, la interpretación de los análisis del agua y de los equilibrios del carbonato, permitieron desarrollar el índice de saturación del carbonato de calcio (índice de Langelier).

Este índice relaciona el pH del agua analizada con el pHs que es el pH de saturación para las condiciones de dureza de calcio y la alcalinidad de bicarbonatos del agua, por lo que puede expresarse como:

$$pH = pH_s = \log k_s/k_2 - \log (Ca^{2+}) - \log (HCO_3^-)$$

donde

$$K_s = \text{constante de solubilidad del } CaCO_3 = (Ca^{2+}) (CO_3^{2-})$$

$$K_2 = \text{constante de equilibrio del } HCO_3^- = \frac{(CO_3^{2-})(H^+)}{(HCO_3^-)}$$

Por lo que el índice de Langelier se define como:

$$I = pH - pH_s$$

Si $I = 0$, el agua se encuentra en equilibrio; si $I > 0$ el agua está sobresaturada de $CaCO_3$ y es incrustante; si $I < 0$, el agua está subsaturada y es corrosiva.

El índice de Langelier fue el primer intento de describir cuantitativamente las características incrustantes o corrosivas del agua.

Existen otros índices que toman en cuenta parámetros como sólidos disueltos totales o algún otro parámetro, esto hace que para algunos rangos de valores que caracterizan al agua, éstos índices resulten más apropiados que el índice de Langelier, como por ejemplo el Índice de Riddick, Índice de

Larson, Índice de Rizar, Índice de dureza impulsora, etc.

El cálculo de las formas de alcalinidad en un abastecimiento de agua puede realizarse por uso de las ecuaciones de equilibrio de las moléculas presentes en solución. La alcalinidad de un agua, definida como la capacidad para reaccionar con los iones hidrógeno a un pH correspondiente a la formación estequiométrica del ácido carbónico (ó CO_2 y H_2O), se determina generalmente por la presencia de iones bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e hidroxilo (OH^-). La determinación puede realizarse por métodos netamente analíticos o auxiliados por gráficas y diagramas, en función del pH y coeficientes de distribución o pH y $-\log C_i$, donde C_i es la concentración de las especies presentes en solución (HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , OH^- ó H^+), si las aguas contienen únicamente estos iones como formas de alcalinidad, si las especies presentes son mayores en número, implica un cálculo más complicado, ya que es necesario relacionar una cantidad mayor de ecuaciones de equilibrio, de acuerdo al grado de exactitud que se desee y el tipo de alcalinidad por determinar.

Descripción de la Unidad

La unidad se construyó con dos cámaras una de reacción y una de contacto para garantizar el buen mezclado entre el CO_2 y el agua. El tiempo de retención es de 12 min para cada cámara. Además se construyeron vertedores triangulares en cada cámara para propiciar un flujo laminar y evitar turbulencias en el agua. (Fig. 9).

UNIDAD DE RECARBONATACION

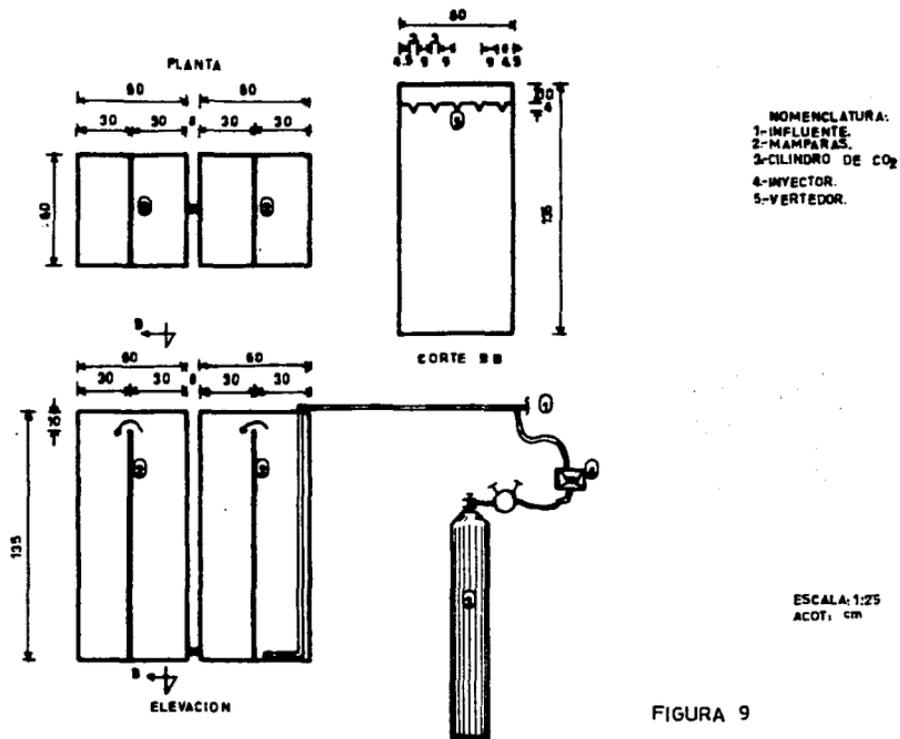


FIGURA 9

Programa de Pruebas

En la figura 10 se muestran las pruebas realizadas para tres tiempos de retención 15, 24 y 30 min; y para tres dosis de bioóxido de carbono 97, 116 y 139 mg/l. Ya en el cuadro III.16 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al influente y efluente del pH, alcalinidad, dureza. Calculandose además el pH de saturación y el índice de saturación de Langelier, que son los parámetros de control del proceso.

El pHs de saturación es igual a (Ref. 12)

$$pH_s = 8.813 - \log (\text{dureza}/20.5) - \log (\text{alcalinidad}/50) + 0.177$$

$$I_s = pH - pH_s$$

de donde:

pHs = potencial hidrógeno de saturación

Is = Índice de saturación de Langelier

pH = potencial hidrógeno de estabilidad del agua

En la gráfica III.13 se presenta la variación del decremento del pH con respecto a la dosis de CO₂ a diferentes tiempos de contacto entre el agua y el gas. Para la dosis de CO₂ de 97 mg/l hay menos decremento del pH, no hay variación en la alcalinidad y dureza; además el agua producto es incrustante

| QW l/seg | T. RET. min. | DOSIS CO ₂ (mg/l) | PH | | DECREMENTO DEL PH | ALCALINIDAD | | DUREZA | | PH sat | | INDICE sat | | AGRESIVIDAD | |
|-------------|-----------------|---------------------------------|-------|-------|----------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|------|------------|-------|-------------|---|
| | | | I | E | | I | E | I | E | I | E | | | | |
| | | | | | | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | (mg/l) | | | I | E | | |
| 0.5 | 24 | 97 | 9.72 | 7.97 | 1.75 | 209 | 209 | 160 | 164 | 7.48 | 7.46 | 2.24 | 0.50 | INCrustANTE | 多 |
| 0.2 | 15 | 116 | 10.74 | 7.41 | 3.33 | 169.8 | 172.6 | 150 | 155.1 | 7.57 | 6.43 | 3.16 | -1.24 | CORROSIVA | 多 |
| 0.5 | 24 | 116 | 11.04 | 7.81 | 3.23 | 167 | 183.9 | 158.6 | 174.6 | 7.58 | 7.49 | 3.46 | 0.31 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 116 | 11.05 | 7.29 | 3.76 | 177.4 | 179.3 | 167.2 | 172.3 | 7.53 | 7.51 | 3.52 | -0.22 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 116 | 10.91 | 7.46 | 3.45 | 177.7 | 183.3 | 153.5 | 162.7 | 7.56 | 7.53 | 3.34 | -0.07 | | 多 |
| | | \bar{x} = | 10.98 | 7.37 | 3.61 | 177.6 | 181.3 | 160.35 | 167.5 | 7.54 | 7.52 | 3.43 | -0.14 | | 多 |
| 0.2 | 15 | 139 | 11.88 | 7.35 | 4.53 | 166 | 175.5 | 144.1 | 150.3 | 7.62 | 7.58 | 4.25 | -0.23 | | 多 |
| 0.5 | 24 | 139 | 11.74 | 8.62 | 3.12 | 181 | 192.8 | 181.5 | 197 | 7.48 | 7.42 | 4.25 | 1.20 | | 多 |
| 0.5 | 24 | 139 | 11.38 | 7.01 | 4.37 | - | 182.6 | - | 176.3 | - | 7.49 | - | -0.48 | | 多 |
| 0.5 | 24 | 139 | 11.99 | 9.64 | 2.35 | 239.6 | 125.5 | 168.9 | 110 | 7.39 | 7.86 | 4.6 | 1.78 | | 多 |
| 0.5 | 24 | 139 | 11.30 | 8.35 | 2.95 | - | 291.5 | - | 149 | - | 7.36 | - | 0.99 | | 多 |
| | | \bar{x} = | 11.60 | 8.40 | 3.20 | 210.3 | 198.1 | 175.2 | 158.1 | 7.43 | 7.53 | 4.42 | 0.87 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 11.04 | 6.87 | 4.17 | 155.6 | 178.3 | 155.1 | 174.6 | 7.62 | 7.51 | 3.42 | -0.64 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 10.93 | 9.68 | 1.25 | - | - | 125 | 125 | - | - | - | - | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 11.59 | 8.89 | 2.70 | 182.6 | 182.6 | 134.8 | 141.6 | 7.61 | 7.59 | 3.98 | 1.30 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 10.89 | 8.05 | 2.84 | 205.4 | 205.4 | 153.5 | 162 | 7.50 | 7.48 | 3.39 | 0.57 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 10.50 | 7.91 | 2.59 | 228.2 | - | 173.9 | - | 7.40 | - | 3.09 | - | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 10.60 | 10.47 | 0.13 | - | 239.6 | - | 187.2 | - | 7.35 | - | 3.12 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 10.60 | 7.52 | 3.08 | 239.6 | 252 | 182.1 | 182.1 | 7.36 | 7.34 | 3.24 | -0.18 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 12.01 | 9.90 | 2.11 | 303 | 93.5 | - | - | - | - | - | - | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 10.67 | 7.90 | 2.77 | 225 | 231 | 160.4 | 162.3 | 7.44 | 7.43 | 3.43 | 0.47 | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 10.15 | - | - | 237.6 | 201.4 | 236.5 | 184.6 | 7.25 | 7.41 | 2.90 | - | | 多 |
| 0.4 | 30 | 139 | 9.28 | 7.47 | 1.81 | 144.6 | 155 | 107.7 | 133.5 | 7.81 | 7.68 | 1.47 | -0.21 | | 多 |
| | | \bar{x} = | 10.75 | 8.47 | 2.28 | 213.5 | 193.2 | 158.8 | 161.4 | 7.54 | 7.52 | 3.07 | 0.59 | | 多 |
| 0.5 | 24 | 164 | 11.49 | 6.95 | 4.54 | 195.6 | 201.2 | 151.1 | 198.7 | 7.53 | 7.40 | 3.96 | -0.45 | | 多 |
| 0.5 | 24 | 164 | 11.55 | 6.83 | 4.72 | 162.1 | 191.5 | 151.1 | 180.7 | 7.61 | 7.46 | 3.94 | -0.63 | | 多 |
| | | \bar{x} = | 11.52 | 6.89 | 4.63 | 178.8 | 196.3 | 151.1 | 189.7 | 7.57 | 7.43 | 3.95 | -0.54 | | 多 |

CUADRO III.16 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RECARBONATACION

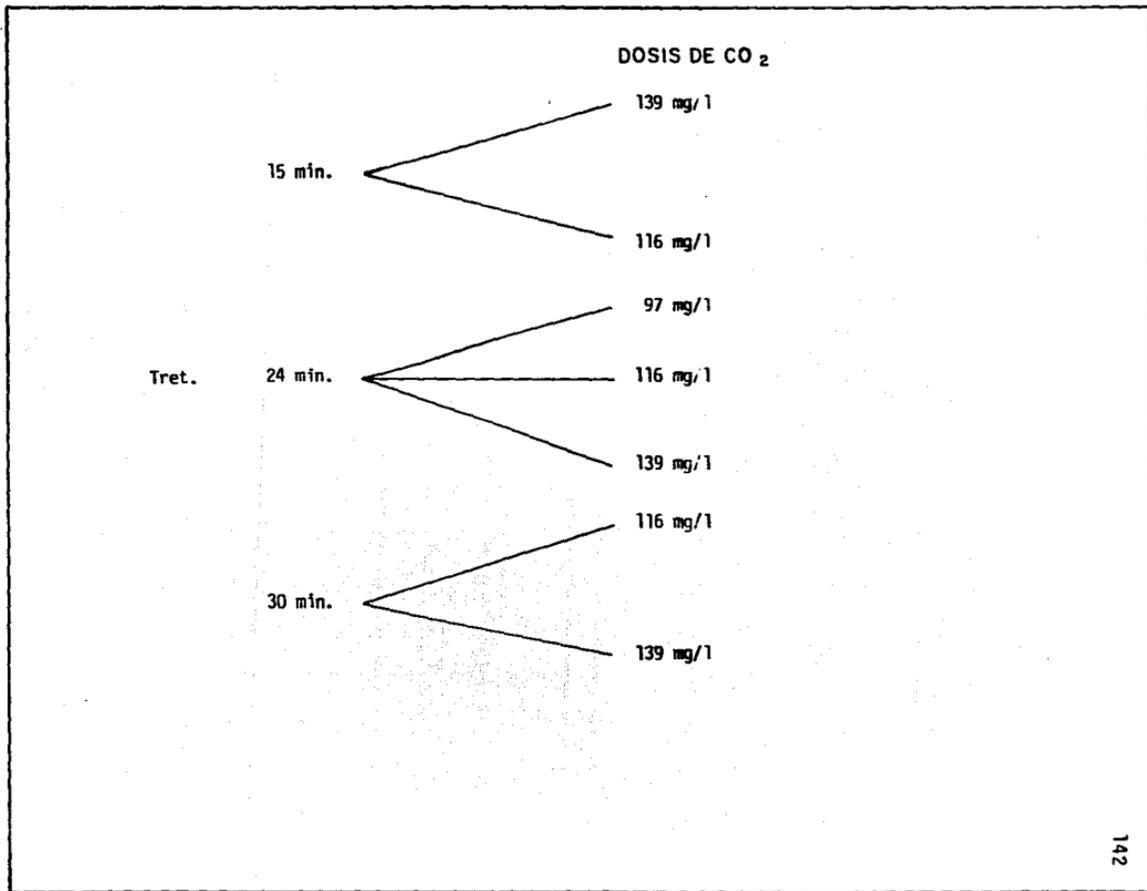
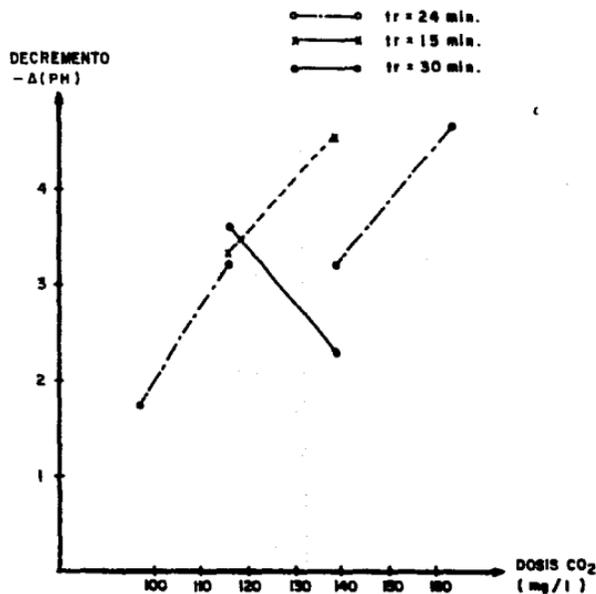
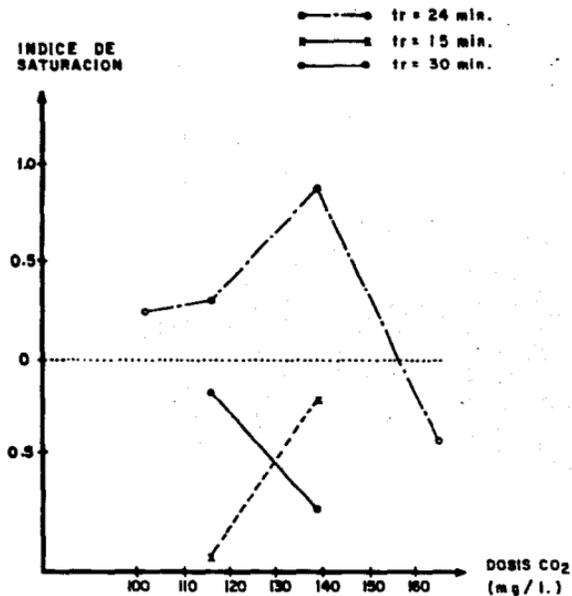


FIGURA 10 DIAGRAMA DE PRUEBAS PARA LA UNIDAD DE RECARBONATACION

GRAFICA III.13 VARIACION DEL PH Y DEL INDICE DE SATURACION PARA DIFERENTES DOSIS DE CO₂ TIEMPOS DE RETENCION



(a)



(b)

no siendo adecuada para los siguientes procesos; la dosis de 116 mg/l a 24 min. produce un decremento de 3.23 unidades, eleva la alcalinidad y dureza en 10% produciendo un efluente ligeramente incrustante; con esta misma dosis pero a 15 min. de contacto el agua se convierte en corrosiva; para 30 min. de contacto el agua es ligeramente corrosiva. En la dosis de 139 mg/l conviene utilizar el tiempo de contacto de 15 min. pues se produce un mayor decremento del pH y el agua producto es ligeramente corrosiva presentando además una variación en la alcalinidad y dureza del 4 y 5% respectivamente.

Finalmente no se recomienda utilizar dosis mayores a 139 mg/l, ya que para 164 mg/l no hay variación en el pH respecto a la dosis anterior y el agua es aún más corrosiva. Gráfica III.13.b.

III.5 Filtración

La filtración es un proceso unitario básico en el tratamiento de agua para usos diversos, la cual se pasa a través de un lecho poroso, teniendo como finalidad retener materia en suspensión o en estado coloidal.

Las variantes de la filtración presentan un amplio margen: tasas de filtración y retrolavado, tiempos de retrolavados ya sea con aire y agua o con agua solamente, tipo y granulometría de lecho simple (arena), doble (arena, antracita), triple (arena, antracita, gravilla), tipo de flujo (puede ser lento o rápido), por gravedad o a presión, en sentido ascendente o descendente.

Recientemente con objeto de reducir los costos de inversión se han incrementado las tasas de filtración. En la actualidad se ha empleado en forma más amplia la filtración rápida con lecho doble (arena-antracita) cuyo material va del fino al grueso y con tasas de filtración de 83 a 450 l/m² min.

La aplicación del filtro se hace en base a las teorías físicas, las cuales consideran las características del lecho (diámetro, espesores), la tasa de filtración (C.H.S.) y la suspensión a filtrar.

En la filtración se presentan dos fenómenos de transporte, el primero debido a un mecanismo físico-hidráulico antes de llegar al empaque y el segundo es el de adhesión de las partículas del material para resistir la fuerza de corte del líquido en movimiento. Es decir, en este proceso permanecen fijas unas partículas y otras en suspensión.

La adhesión de una partícula suspendida en la interfase sólido-líquido que presenta el filtro se atribuye a dos fenómenos:

- 1) Acción recíproca de las fuerzas electrostáticas y de Van Der Waals en la doble capa de los granos del medio.
- 2) La unión química de la partícula y la superficie del medio por un material de enlace.

El parámetro que se busca optimizar en la filtración es la pérdida de carga, según Mintz (5). Ref. 13.

$$i = i_0 \frac{f_0}{f_0 - \nabla}^3 \times \frac{1 - f_0}{\sqrt{1 + 1 - f_0}}^{2/3}; \quad i = \text{gradiente hidr\u00e1ulico}$$

final

$i_0 = \text{gradiente hidr\u00e1ulico}$
inicial

$f_0 = \text{porosidad del filtro}$

$\nabla = \text{Vol\u00famen espec\u00edfico del}$
dep\u00f3sito por unidad de
vol\u00famen del filtro

La p\u00e9rdida de carga se mide en funci\u00f3n del gradiente hidr\u00e1ulico "i" y es m\u00ednimo cuando se tiene un dep\u00f3sito uniforme en todo el espesor del filtro.

El valor m\u00ednimo de costo se tiene cuando el tiempo para alcanzar el l\u00edmite del gradiente hidr\u00e1ulico o p\u00e9rdida de carga (t_2) es igual al tiempo en que empieza a pasar turbiedad en el efluente (t_1).

De donde:

$$t_1 = K \frac{\sqrt{L - P}}{V \cdot C_0} \cdot L - \frac{F(C_1)}{o}; \quad o = v^{-0.7} \text{ de}^{-1.7}$$

$C_0 = \text{concentraci\u00f3n inicial de dep\u00f3sitos}$

$V = \text{velocidad de filtraci\u00f3n}$

$o = \text{Coeficiente de proporcionalidad del filtro}$

$K = \text{cte. de permeabilidad}$

$L = \text{Longitud del filtro (empaquetado)}$

$\sqrt{L} = \text{valor l\u00edmite del dep\u00f3sito espec\u00edfico}$

$F (c1)$ = parámetro adimensional relacionado con la turbiedad límite del efluente

$p (\nabla)$ = Densidad del depósito

Se debe procurar el balance en la operación del filtro para optimizar resultados, así el gradiente hidráulico debe mantener una relación directa del tamaño del medio con el depósito específico ∇ , por lo que se tendrá más depósito en los poros más grandes, manteniendo un gradiente hidráulico constante a través de la profundidad del lecho, observándose menores pérdidas de carga y velocidades de filtración más altas. La remoción de la turbiedad permanente de las capas gruesas se hará en la zona del medio más fino.

El problema práctico de la filtración se puede plantear considerando las concentraciones de la turbiedad o color de las aguas a filtrar para así darles tratamiento previo o como paso ulterior de algún proceso biológico o físico-químico.

Bases de Diseño

La filtración se utiliza para remover flóculos biológicos residuales de un tratamiento secundario, sólidos remanentes de una coagulación química, antes de un paso de adsorción en carbón activado o de intercambio iónico. La filtración remueve precipitados de fosfatos con sales de aluminio, hierro o cal, remoción de materia suspendida previo tratamiento con microcoagulante

(ayuda de filtración).

Para elevar la eficiencia de remoción de contaminantes es necesario optimizar los parámetros que rigen la filtración: duración de la carrera de filtración entendiéndose como el tiempo de duración del filtro en operación que va de 6 a 8 hrs. y no más de 36 a 48 hrs. para controlar la descomposición anaeróbica del lecho y en consecuencia nos determina la producción de agua tratada por unidad de área del filtro, lo que afecta a la carga hidráulica superficial o tasa de filtración, en base a éstos parámetros se determina la pérdida de carga debida a la granulometría del filtro, la tasa de retrolavado y el volumen de agua de retrolavado. Otra variable importante es el espesor y granulometría del lecho, pues de esta depende la retención, la cantidad y la filtrabilidad de los sólidos.

De acuerdo con las variables descritas se desprenden los conceptos siguientes:

Carga de Sólidos:

La carga en un filtro para una pérdida de carga dada, una tasa de filtración y las características del agua.

La carga de sólidos es:

$$C. S. = C_o \times t \times Q_f \text{ (Kg/m}^2\text{/AH) para un lecho y granulometría determinada}$$

$$C_o = C_i - C_f \text{ (mg/l)}$$

De donde:

C_s = Carga de sólidos (Kg. $m^2/\Delta H$)

C_o = Diferencia de la concentración de sólidos (mg/l)

C_i = Concentración influente (mg/l) de S.S.T.

C_f = Concentración efluente (mg/l) de S.S.T.

t = Duración de la carrera (hr)

Q_f = Carga hidráulica superficial

ΔH = Pérdida de carga (m)

Granulometría del Lecho:

La interrelación entre el tamaño, espesor y la tasa de filtración define la calidad del filtrado y la pérdida de carga. En la granulometría se debe especificar el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad del lecho. El tamaño efectivo por definición es el tamaño del grano, tal que el 10% de su peso son más pequeñas y 90% son más grandes; el coeficiente de uniformidad determina la relación del tamaño que tiene 60% de la muestra más fina al tamaño efectivo.

Es necesario elegir adecuadamente la granulometría del lecho para facilitar el proceso de filtración, pues el retrolavado se favorece con C.U. bajos, ya que a mayor C.U. se requiere mayor tasa de retrolavado para fluidizar los

granos más gruesos. Como se mencionó anteriormente, en el cuadro III.17 se presentan las recomendaciones para diferentes tipos de lecho a diferente granulometría.

Tasa de Filtración:

Es la relación de la fuerza de impulso a la resistencia del filtro. La fuerza de impulso es la carga hidráulica disponible, mientras que la resistencia la da el lecho propiamente y los sólidos que se van reteniendo; la tasa de filtración se divide en:

- Filtración a presión constante
- Filtración a tasa constante
- Filtración a tasa variable declinante

Filtración a Presión Constante:

La fuerza de impulso o carga hidráulica se aplica durante toda la carrera a medida que se va saturando el filtro se incrementa la resistencia y como la carga hidráulica permanece constante, la tasa de filtración decrece.

Filtración a Tasa Constante y Nivel de Agua Constante:

En los últimos años no se utiliza este método, pues requiere de grandes almacenamientos aguas arriba del filtro y de un sistema automático en la

| | ESPESOR CM | TAMAÑO EFECTIVO MM | COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (C.U) |
|-----------------------|---------------|--------------------------|-------------------------------------|
| LECHO SIMPLE | | | |
| ARENA | 120-150 | 1.5-2.5 | -- |
| LECHO DOBLE | | | |
| ARENA | 15-50(75) | 0.3-1.0 (0.50) | 1.2-1.65(1.4) |
| CARBON (ANTRACITA) | 20-60(45) | 0.8-2.0 (1.0) | 1.3-1.3(1.5) |
| LECHO TRIPLE | | | |
| ARENA | 20-40(30) | 0.4-1.0 (0.6) | 1.2-1.65(1.4) |
| CARBON (ANTRACITA) | 20-60(38) | 1.0-2.0 (1.4) | 1.3-1.3(1.5) |
| GRAVILLA | 5-15 (8) | 0.2-0.6 (0.2) | -- |

CUADRO III. 17 RECOMENDACIONES PARA DIFERENTES TIPOS DE LECHOS FILTRANTES

válvula de control, ya que a medida que el filtro se tapona con sólidos, se debe abrir lentamente hasta su apertura total, en este punto termina la carrera del filtro.

Filtración a Tasa Variable Declinante:

Al igual que la anterior presenta mayores ventajas teniendo diferencias en la localización y tipo de arreglo del influente y la provisión para una menor pérdida de carga disponible. La tasa variable declinante nos proporciona una producción de agua constante, pues a medida que un filtro pierde carga, los demás la amortiguan, siendo necesario para esto conectar los filtros por arriba del nivel del lecho.

Por último, el retrolavado es más difícil por los problemas de aglomeración en la superficie y fractura del lecho, por lo que el retrolavado con agua no es eficiente, siendo necesario aplicar aire como auxiliar de la agitación. Las tasas de retrolavado con agua oscilan de 600 a 900 l/m² min. y las tasas de retrolavado con aire oscilan de 3 a 5 m³/m², con flujo ascendente ambas, (ref. 14).

Criterios de Diseño:

Para un caudal de diseño de 0.5 l/seg:

Tipo de filtros:

Rápidos

| | |
|------------------------------|---------------------------------|
| Tipo de flujo: | Descendente |
| Fuerza inductora: | Gravedad |
| Control de flujo: | Tasa variable declinante |
| Tipo de lecho: | Doble (arena-antracita) |
| Espesor de arena: | 30 cm |
| Espesor de antracita: | 45 cm |
| Falso fondo gravilla: | 10 cm |
| Tasa de filtración: | 80 a 450 l/m ² min. |
| Nº de unidades: | 3 de Ø = 30 cm y 1 de Ø = 15 cm |
| Carga hidráulica disponible: | 2 m de columna de agua |

Se consideró una carga hidráulica de 130 l/m² min, cuya área es de 0.23 m² para tres filtros con un diámetro de 30 cm y un filtro con un diámetro de 15 cm.

Descripción de la unidad. (figura 12)

La alimentación del agua se realiza por la parte superior; el efluente se recolecta en el fondo de las columnas; en la parte superior de los lechos se interconectan los filtros con la finalidad de operar con tasa constante y tasa declinante.

Para medir el grado de ensuciamiento a través de los lechos se colocaron piezómetros a diferentes alturas quedando como sigue:

1. Pérdida de carga en los 5 cm arriba de la antracita
2. Pérdida de carga en los 10^5 5 cm de antracita
3. Pérdida de carga en la antracita
4. Pérdida de carga en la interfase arena-antracita
5. Pérdida de carga en la interfase gravilla-arena

Programa de Pruebas

En la figura 11 se muestran las diferentes corridas experimentales y en los cuadros III.18 A y B se resumen los resultados de la corrida 1, en la cual se trabajó con 97.77, 114 y 395 lpm/m^2 (2.4, 2.8 y 9.7 gpm/ft^2) a tasa constante como resultados se obtuvo lo siguiente: para la tasa de filtración de 97.72 lpm/m^2 (2.4 gpm/ft^2) la duración de carrera fue de 36 hr., con una eficiencia media de remoción de turbidez del 84.36% gráfica III.14, no habiendo pérdida de carga a través del lecho gráfica III.15 la cantidad de agua de retrolavado fue del 5%; para la tasa de filtración de 114 lpm/m^2 (2.8 gpm/ft^2) se obtuvo una misma duración de 36 hr., una remoción del 84.10% de turbidez, una pérdida de carga total de 57 cm no habiendo pérdida de carga en los primeros 5 cm del lecho de antracita, pero teniéndose 50 cm para la interfase arena-antracita y 49 cm para la arena (gráfica III.15), la cantidad de agua de retrolavado fue del 5%; en la tasa de filtración de 395 lpm/m^2 (9.7 gpm/ft^2) la duración de carrera es de 36 hr., una remoción del 78% de turbidez gráfica III.14, una pérdida de carga total de 45 cm., de la gráfica III.15 se observa que para esta tasa de filtración se tiene ensuciamiento a través de todo el lecho, por

| AREA (m ²) | DURACION (hr) | CARGA HIDRAULICA-SUPERFICIAL. | PERDIDAS DE CARGA(ΔH) | | | | TURBIEDAD 155 (UTN) | | |
|------------------------|---------------|---|-----------------------|----|-----|------|---------------------|------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | I | E | n(%) |
| 0.071 | 2 | 2.4gpm/pie ² 97.771pm/m ² 5.86m ³ phv/m ² | 47 | 0 | 30 | 35 | 3.9 | 1.3 | 66.67 |
| | 4 | | 40 | 0 | 22 | 28 | 3.9 | 0.8 | 79.49 |
| | 6 | | 21 | 0 | 8 | 12 | 3.9 | 0.7 | 82.05 |
| | 8 | | 19 | 0 | 9 | 12 | 3.9 | 0.8 | 79.49 |
| | 10 | | 21 | 0 | 10 | 12 | 3.9 | 0.6 | 84.61 |
| | 12 | | 23 | 0 | 9 | 12 | 3.9 | 0.6 | 84.61 |
| | 14 | | 17 | 0 | 11 | 14 | 3.9 | 0.6 | 84.61 |
| | 16 | | 34 | 0 | 33 | 36 | 3.9 | 0.5 | 87.20 |
| | 18 | | 35 | 0 | 18 | 23 | 3.9 | 0.3 | 92.30 |
| | 20 | | 26 | 0 | 12 | 16 | 3.9 | 0.4 | 89.74 |
| | 22 | | 22 | 0 | 10 | 13 | 3.9 | 0.4 | 89.74 |
| | 24 | | 34 | 0 | 16 | 22 | 3.9 | 0.79 | 79.74 |
| | 26 | | 26 | 0 | 10 | 12 | 3.9 | 0.78 | 80.00 |
| | 28 | | 23 | 0 | 10 | 14 | 3.9 | 0.56 | 85.64 |
| | 30 | | 26 | 0 | 11 | 15 | 3.9 | 0.63 | 83.84 |
| | 32 | | 29 | 0 | 12 | 17 | 3.9 | 0.40 | 89.74 |
| 34 | 32 | 0 | 15 | 20 | 3.9 | 0.40 | 89.74 | | |
| 36 | 36 | 0 | 17 | 22 | 3.9 | 0.40 | 89.74 | | |
| -- | -- | -- | 11* | 0 | 13 | 13 | 3.9** | 0.61 | 84.36 |
| 0.071 | 2 | 2.8gpm/pie ² 1141pm/m ² 6.84m ³ phr/m ² | 26 | 0 | 10 | 14 | 3.9 | 1.2 | 69.23 |
| | 4 | | 23 | 0 | 10 | 13 | 3.9 | 0.8 | 79.48 |
| | 6 | | 24 | 0 | 9 | 13 | 3.9 | 0.7 | 82.05 |
| | 8 | | 25 | 0 | 10 | 13 | 3.9 | 0.7 | 82.05 |
| | 10 | | 30 | 0 | 13 | 17 | 3.9 | 0.8 | 79.48 |
| | 12 | | 32 | 0 | 15 | 19 | 3.9 | 0.6 | 84.61 |
| | 14 | | 34 | 0 | 16 | 20 | 3.9 | 0.5 | 87.20 |
| | 16 | | 25 | 0 | 12 | 18 | 3.9 | 0.5 | 87.20 |
| | 18 | | 36 | 0 | 16 | 22 | 3.9 | 0.5 | 87.20 |
| | 20 | | 38 | 0 | 20 | 24 | 3.9 | 0.4 | 89.74 |
| | 22 | | 40 | 0 | 20 | 24 | 3.9 | 0.4 | 89.74 |
| | 24 | | 44 | 0 | 24 | 28 | 3.9 | 0.73 | 80.16 |
| | 26 | | 43 | 0 | 24 | 28 | 3.9 | 0.78 | 77.24 |
| | 28 | | 44 | 0 | 25 | 30 | 3.9 | 0.65 | 83.33 |
| | 30 | | 49 | 0 | 30 | 49 | 3.9 | 0.59 | 84.87 |
| | 32 | | 60 | 0 | 38 | 43 | 3.9 | 0.40 | 89.74 |
| 34 | 70 | 0 | 47 | 52 | 3.9 | 0.40 | 89.74 | | |
| 36 | 83 | 0 | 60 | 63 | 3.9 | 0.50 | 87.20 | | |
| | | | 57* | 0 | 50 | 49 | 3.9** | 0.62 | 84.10 |

PARA TODOS LOS CUADROS III-18. a III 21

* PERDIDA DE CARGA TOTAL=VALOR INICIAL MENOS VALOR FINAL.

* * VALORES MEDIOS DE CONCENTRACION.

CUADRO III 18. A CORRIDA 1 DE FILTRACION PERDIDAS DE CARGA (cm) Y REMOCION DE TURBIDEZ (%)

| AREA (m ²) | DURACION (hr.) | CARGA HIDRAULICA SUFICIAL | PERDIDAS DE CARGA (ΔH) | | | | TURBIDEZ ¹⁵⁶ (U TN) | | |
|------------------------|----------------|--|------------------------|----|-----|------|--------------------------------|------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | E | n(%) |
| 0.018 | 2 | 9.7gpm/pie ² 3951pm/m ² 23.71m ³ phz/m ² | 83 | 18 | 36 | 52 | 3.9 | 1.7 | 56.42 |
| | 4 | | 87 | 19 | 40 | 56 | 3.9 | 1.2 | 69.23 |
| | 6 | | 84 | 23 | 43 | 57 | 3.9 | 0.9 | 76.92 |
| | 8 | | 92 | 25 | 50 | 64 | 3.9 | 0.9 | 76.92 |
| | 10 | | 96 | 20 | 50 | 68 | 3.9 | 0.9 | 76.92 |
| | 12 | | 85 | 15 | 46 | 60 | 3.9 | 1.0 | 74.36 |
| | 14 | | 86 | 14 | 38 | 55 | 3.9 | 0.9 | 76.92 |
| | 16 | | 150 | 40 | 96 | 116 | 3.9 | 0.5 | 87.20 |
| | 18 | | 87 | 10 | 35 | 57 | 3.9 | 0.9 | 76.92 |
| | 20 | | 80 | 10 | 27 | 44 | 3.9 | 0.7 | 82.05 |
| | 22 | | 76 | 12 | 29 | 35 | 3.9 | 0.7 | 82.05 |
| | 24 | | 102 | 13 | 29 | 60 | 3.9 | 0.97 | 75.12 |
| | 26 | | 102 | 19 | 43 | 62 | 3.9 | 0.97 | 75.12 |
| | 28 | | 92 | 12 | 37 | 55 | 3.9 | 0.76 | 81.15 |
| | 30 | | 99 | 17 | 40 | 61 | 3.9 | 0.74 | 81.82 |
| | 32 | | 111 | 18 | 44 | 67 | 3.9 | 0.60 | 84.61 |
| | 34 | | 117 | 20 | 47 | 71 | 3.9 | 0.50 | 87.20 |
| 36 | 128 | 24 | 53 | 80 | 3.9 | 0.50 | 87.20 | | |
| | | | 45 | 6 | 17 | 28 | 3.9 | 0.85 | 78.20 |
| | | | * | | | | * | * | |

CUADRO III. 18. B.

CORRIDA 1 DE FILTRACION PERDIDAS DE CARGA Y REMOCION DE TURBIDEZ.

| AREA (m ²) | DURACION (hr) | CARGA HIDRAULICA SUPERFICIAL | PERDIDAS DE CARGA(ΔH) | | | | TURBIEDAD (UTN) | | |
|------------------------|---------------|--|-----------------------|-----|-----|-----|-----------------|------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | I | E | n(%) |
| 0.071 | 2 | 2.9gpm/pie ² 1181pm/m ² 7.09m ³ p/hr/m ² | 65 | 07 | 52 | 56 | 2.1 | 0.9 | 57.14 |
| | 4 | | 63 | 10 | 45 | 54 | 2.1 | 1.0 | 52.38 |
| | 6 | | 60 | 12 | 48 | 50 | 2.1 | 1.2 | 42.85 |
| | 8 | | 23 | 01 | 22 | 22 | 2.1 | 1.2 | 42.85 |
| | 10 | | 63 | 09 | 54 | 56 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 12 | | 55 | 10 | 48 | 50 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 14 | | 52 | 12 | 44 | 46 | 2.1 | 1.4 | 33.33 |
| | 16 | | 52 | 14 | 45 | 47 | 2.1 | 1.4 | 33.33 |
| | 18 | | 50 | 14 | 42 | 44 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 20 | | 52 | 4 | 44 | 46 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 22 | | 74 | 29 | 69 | 71 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 24 | | 90 | 36 | 80 | 82 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 26 | | 94 | 34 | 84 | 86 | 2.1 | 1.6 | 23.80 |
| | 28 | | 106 | 41 | 92 | 94 | 2.1 | 1.7 | 19.04 |
| | 30 | | 104 | 40 | 94 | 98 | 2.1 | 1.5 | 28.57 |
| | 32 | | 138 | 54 | 127 | 131 | 2.1 | 1.5 | 28.57 |
| | 34 | | 146 | 57 | 136 | 139 | 2.1 | 1.5 | 28.57 |
| 36 | 117 | 13 | 45 | 1 | 2.1 | 1.5 | 28.57 | | |
| 38 | 164 | 65 | 153 | 157 | 2.1 | - | - | | |
| 40 | 170 | 69 | 160 | 162 | 2.1 | - | - | | |
| | | | 105 | 62 | 108 | 106 | 2.1 | 1.34 | 36.19 |
| | | | * | | | | * * | | |
| 0.071 | 2 | 2.9gpm/pie ² 1181pm/m ² 7.09m ³ p/hr/m ² | 70 | 02 | 60 | 62 | 2.1 | 1.0 | 52.38 |
| | 4 | | 74 | 02 | 64 | 66 | 2.1 | 1.1 | 47.61 |
| | 6 | | 84 | 08 | 72 | 76 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 8 | | 99 | 02 | 89 | 91 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 10 | | 118 | 12 | 108 | 110 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 12 | | 120 | 50 | 110 | 112 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 14 | | 128 | 15 | 119 | 121 | 2.1 | 1.4 | 33.33 |
| | 16 | | 130 | 16 | 120 | 122 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | 18 | | 136 | 18 | 116 | 126 | 2.1 | 1.2 | 42.85 |
| | 20 | | 142 | 18 | 132 | 134 | 2.1 | 1.2 | 42.85 |
| | 22 | | 202 | 32 | 193 | 195 | 2.1 | 1.3 | 38.09 |
| | | | 132 | 30 | 133 | 133 | 2.1 | 1.24 | 48.95 |
| | | | * | | | | * * | | |

CUADRO III 19. A CORRIDA 2 DE FILTRACION PERDIDAS DE CARGA (cm) Y REMOCION DE TURBIDEZ (%) PARA AGUA PROVENIENTE DE TRATAMIENTO SECUNDARIO.

| AREA (m ²) | DURACION (hr.) | CARGA HIDRAULICA SUPERFICIAL | PERDIDAS DE CARGA (ΔH) | | | | TURBIEDAD 158 (UTN) | | |
|------------------------|----------------|--|------------------------|-----|-----|-----|---------------------|------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | INF. | EFL. | n(%) |
| | 2 | | 102 | 57 | 77 | 87 | 2.1 | 0.9 | 57.14 |
| | 4 | | 105 | 65 | 80 | 90 | | 1.0 | 52.38 |
| | 6 | | 116 | 78 | 94 | 105 | | 1.3 | 38.09 |
| | 8 | | 124 | 72 | 107 | 117 | | 1.3 | 38.09 |
| | 10 | 3.95gpm/pie ² | 155 | 106 | 134 | 143 | | 1.3 | 38.09 |
| | 12 | | 163 | 114 | 146 | 152 | | 1.4 | 33.33 |
| | 14 | 160.921pm/m ² | 168 | 119 | 150 | 158 | | 1.4 | 33.33 |
| | 16 | | 168 | 119 | 153 | 159 | | 1.3 | 38.09 |
| | 18 | 9.65 m ³ phr/m ² | 172 | 122 | 156 | 164 | | 1.2 | 42.85 |
| | 20 | | 182 | 134 | 164 | 182 | | 1.3 | 38.09 |
| | 22 | | 270 | 205 | 250 | 262 | | 1.3 | 38.09 |
| | | | 168 | 148 | 173 | 175 | 2.1 | 1.24 | 40.95 |
| | | | * | | | | ** | | |
| | 2 | | 17 | 04 | 10 | 12 | 2.1 | 1.1 | 47.61 |
| | 4 | | 20 | 05 | 10 | 12 | | 1.1 | 47.61 |
| | 6 | | 24 | 10 | 14 | 16 | | 1.2 | 42.85 |
| | 8 | | 33 | 15 | 19 | 21 | | 1.2 | 42.85 |
| | 10 | | 29 | 18 | 20 | 23 | | 1.2 | 42.85 |
| | 12 | 2.45gpm/pie ² | 30 | 19 | 22 | 25 | | 1.3 | 38.09 |
| | 14 | | 39 | 29 | 31 | 34 | | 1.4 | 33.33 |
| | 16 | 99.811pm/m ² | 40 | 30 | 32 | 35 | | 1.3 | 38.09 |
| | 18 | | 48 | 36 | 40 | 42 | | 1.2 | 42.85 |
| | 20 | 5.99m ³ phr/m ² | 47 | 35 | 39 | 41 | | 1.2 | 42.85 |
| | 22 | | 80 | 68 | 74 | 76 | | 1.3 | 38.09 |
| | 24 | | 80 | 66 | 70 | 80 | | 1.3 | 38.09 |
| | 26 | | 84 | 70 | 76 | 78 | | 1.6 | 23.80 |
| | 28 | | 84 | 72 | 76 | 78 | | 1.6 | 23.80 |
| | 30 | | 90 | 78 | 82 | 84 | | 1.5 | 28.57 |
| | 32 | | 105 | 98 | 98 | 100 | | 1.5 | 28.57 |
| | 34 | | 115 | 101 | 107 | 109 | | 1.4 | 33.33 |
| | 36 | | 129 | 113 | 120 | 123 | | 1.4 | 33.33 |
| | 38 | | 135 | 120 | 126 | 128 | | - | - |
| | 40 | | 139 | 122 | 130 | 134 | | - | - |
| | | | 122 | 118 | 120 | 122 | 2.1 | 1.32 | 37.14 |
| | | | * | | | | ** | | |

CUADRO III. 19. B CORRIDA 2 DE FILTRACION PERDIDAS DE CARGA (cm) Y REMOCION DE TURBIDEZ (%) PARA AGUA PROMENIENTE DE TRATAMIENTO SECUNDARIO.

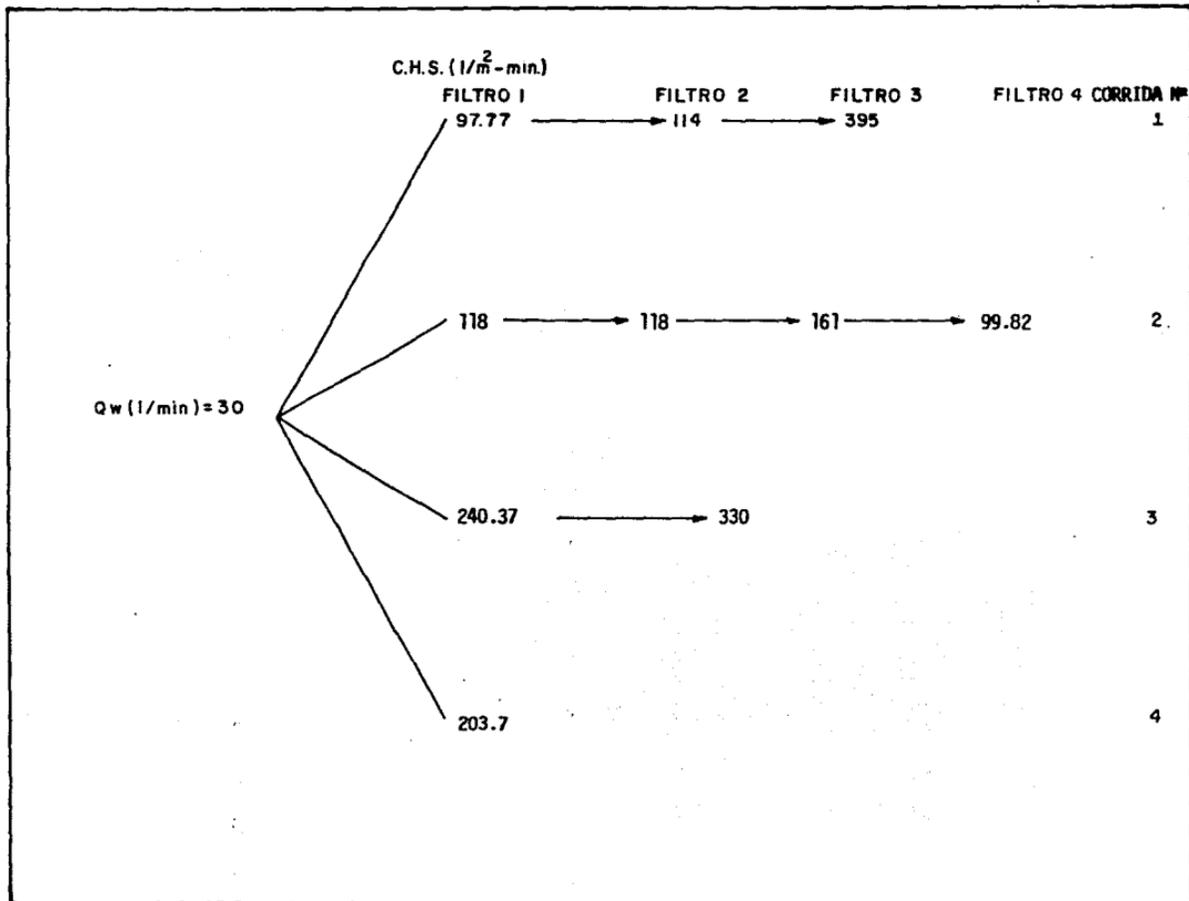
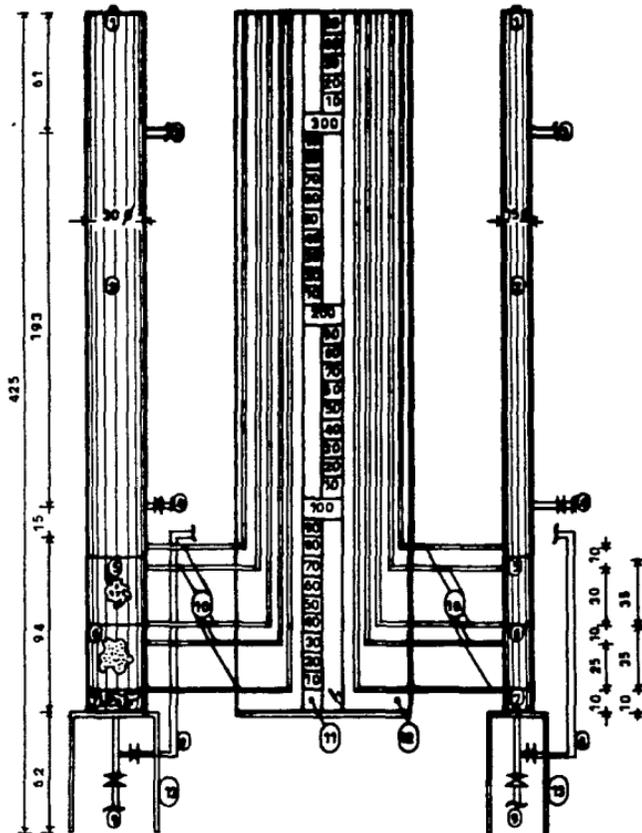


FIGURA II DIAGRAMA DE PRUEBAS DE FILTRACION

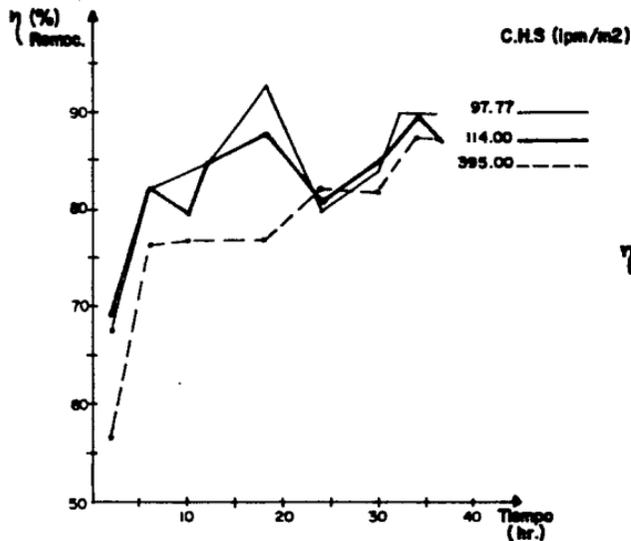
UNIDAD DE FILTRACION



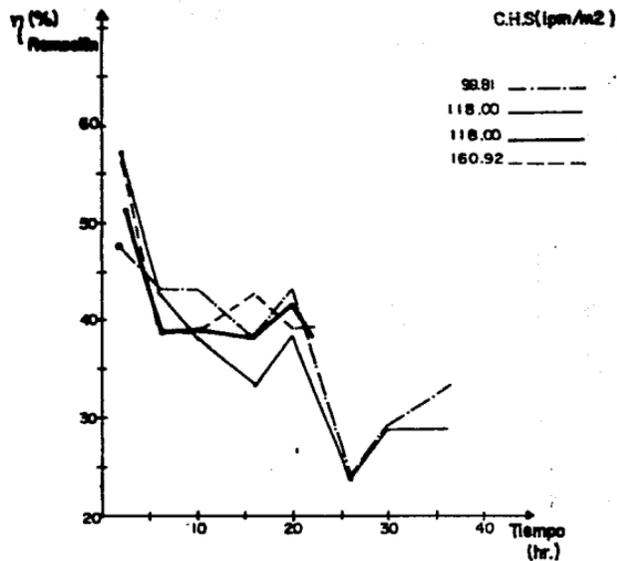
- NOMENCLATURA:**
- 1-INFLUENTE.
 - 2-COLUMNAS DE FILTRACION.
 - 3-EFLUENTE DE RETROLAVADO A DRENAJE.
 - 4-TUBERIA DE INTERCONEXION.
 - 5-LECHO DE ANTRACITA.
 - 6-LECHO DE ARENA SILICA.
 - 7-LECHO DE GRAVA.
 - 8-EFLUENTE.
 - 9-RETROLAVADO.
 - 10-MANGUERAS INDICADORAS DE LAS PERDIDAS DE CARGA EN LOS DIFERENTES LECHOS.
 - 11-ESTADAL.
 - 12-TABLERO.
 - 13-ESTRUCTURA DE SOPORTE.

ESCALA: 1:25
ACOT. ±m

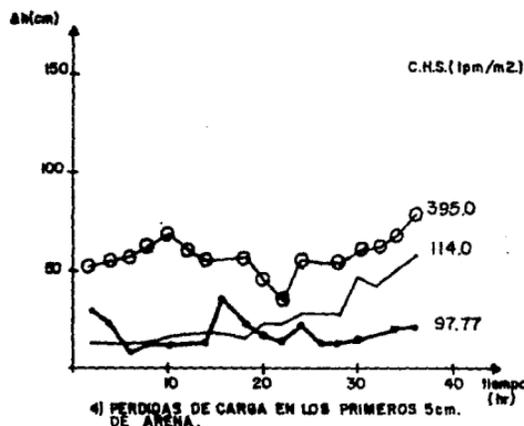
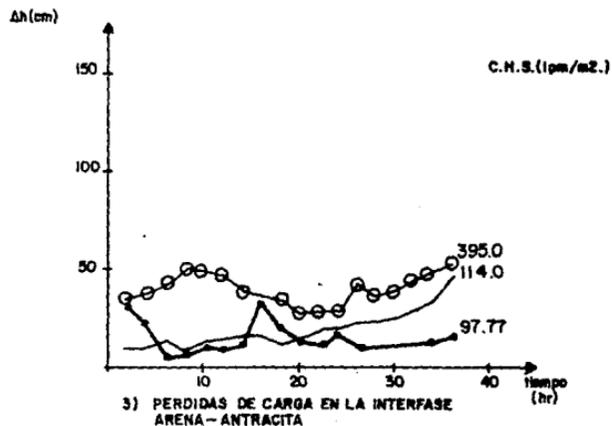
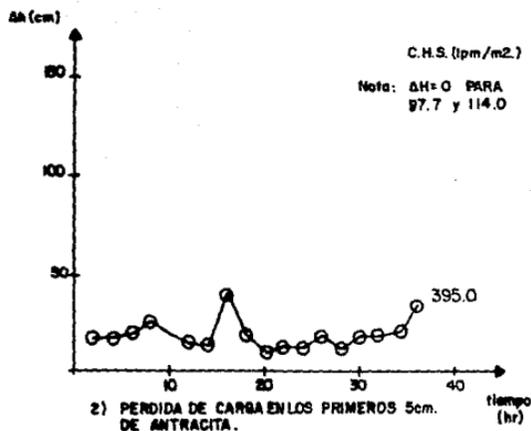
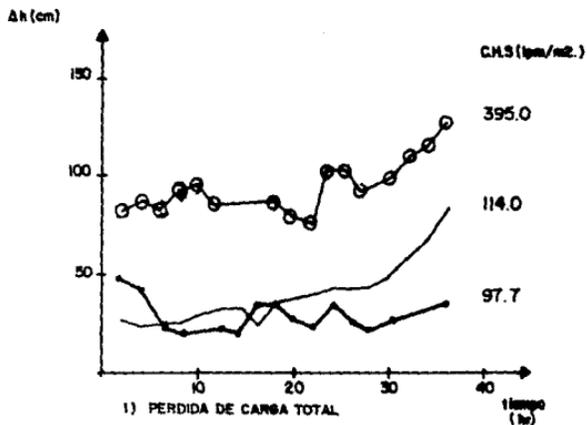
FIGURA Nº 12



GRAFICA III. 14 EFICIENCIAS DE REMOCION DE TURBIDEZ. CORRIIDA 1.



GRAFICA III. 16 EFICIENCIAS DE REMOCION DE TURBIDEZ. CORRIIDA 2.



GRAFICA XI.18 PERDIDAS DE CARGA DE LA CORRIJA I.

lo que es de esperar el ser más difícil el retrolavado de los lechos.

Corrida 2: Se utilizaron cuatro cargas constantes 118, 118, 161 y 99.81 lp/m^2 (2.9, 2.9, 3.95, 2.45 gpm/ft^2), cuadros III.19 A y B. El agua utilizada procedía directamente del tratamiento secundario (Lodos activados) como se puede observar para duraciones de carrera de 40 y 22 hr., en la tasa de filtración de 118 lp/m^2 ambas la remoción de turbidez bajó considerablemente 36 y 41% con pérdidas de carga de más de 100 cm.

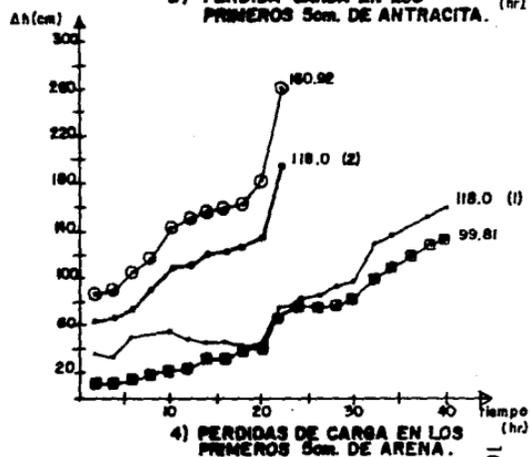
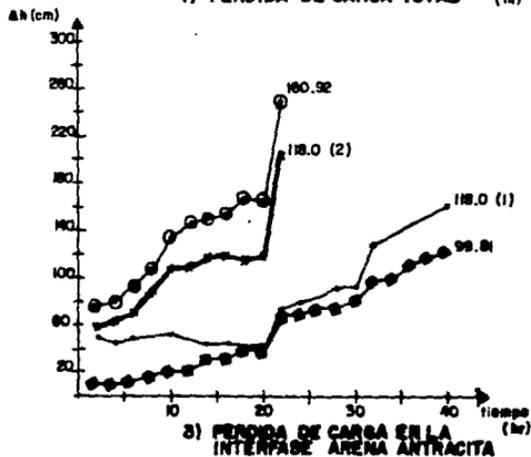
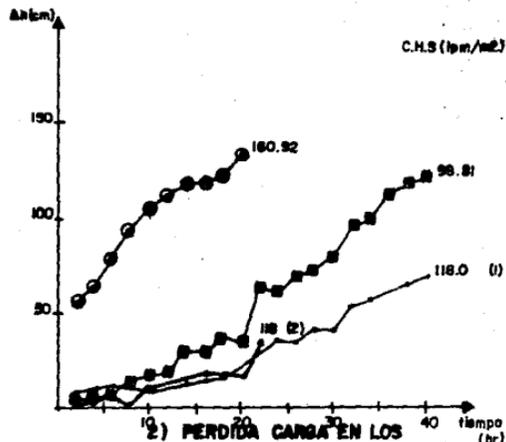
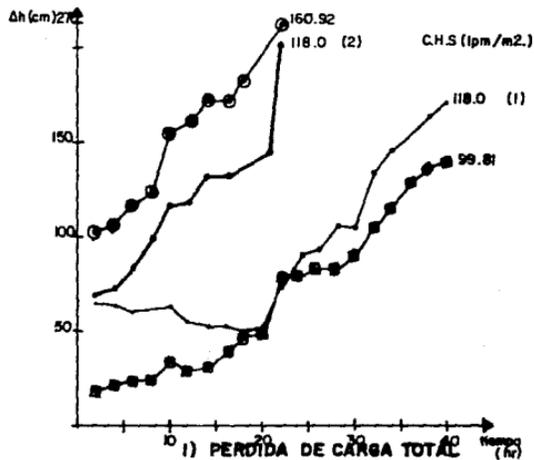
A lo largo del lecho filtrante gráfica III.16 y III.17 respectivamente ya al incrementar la tasa de filtración a 160.92 lp/m^2 en 22 hrs., de operación la remoción de turbidez promedio fue del 40.95% con una pérdida de carga total de 168 cm (gráfica III.16 y III.17). También al bajar las tasas de filtración a 99.81 lp/m^2 se obtuvieron variaciones muy pequeñas respecto a la tasa de 116 lp/m^2 , únicamente se removió el 37.14% de turbiedad, una pérdida de carga total de 112 cm para una duración de carrera de 40 Hrs.

Cabe hacer mención que la cantidad de agua de retrolavado en todos los casos resultó mayor del 10%, por lo que resulta antieconómico. La operación de los filtros para aguas con cargas de sólidos considerables.

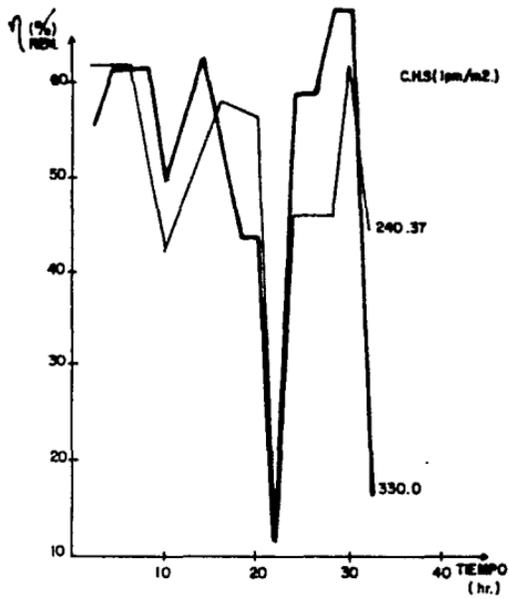
Corrida 3: En el cuadro III.20 se tiene para 240.37 y 330 lp/m^2 (5.9 y 8.1 gpm/ft^2) la remoción de turbidez fue del 56.19 y 52.38% con una duración de carrera de 32 hrs., se obtuvo mayor pérdida de carga total en la primera tasa de filtración 185 cm. (gráficas III.18 y III.19) respectivamente.

| AREA (m ²) | DURACION (hr) | CARGA HIDRAULICA SUPERFICIAL | PERDIDAS DE CARGA (ΔH) | | | | TURBIEDAD ¹⁶⁴ | | |
|------------------------|---------------|--|------------------------|-----|-----|------|--------------------------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | INF. | EFL. | n(%) |
| | 2 | 5.9gpm/pie ² 240.371pm/m ² 1442m ³ phr/m ² | 60 | 22 | 36 | 44 | 2.1 | 0.8 | 61.90 |
| | 4 | | 62 | 23 | 38 | 45 | 2.1 | 0.8 | 61.90 |
| | 6 | | 66 | 26 | 40 | 50 | 2.1 | 0.8 | 61.90 |
| | 8 | | 78 | 40 | 54 | 62 | 2.1 | 0.8 | 61.90 |
| | 10 | | 63 | 32 | 43 | 48 | 2.6 | 1.5 | 42.30 |
| | 12 | | 77 | 46 | 57 | 64 | 2.6 | 1.1 | 57.69 |
| | 14 | | 77 | 43 | 46 | 53 | 2.4 | 0.6 | 75.00 |
| | 16 | | 82 | 41 | 62 | 70 | 2.4 | 1.0 | 58.33 |
| | 18 | | 98 | 64 | 80 | 86 | 2.3 | 1.1 | 77.54 |
| | 20 | | 114 | 86 | 94 | 100 | 2.3 | 1.0 | 56.52 |
| | 22 | | 116 | 80 | 94 | 102 | 1.7 | 1.5 | 11.76 |
| | 24 | | 124 | 80 | 102 | 110 | 1.3 | 0.7 | 46.15 |
| | 26 | | 138 | 86 | 110 | 118 | 1.3 | 0.7 | 46.15 |
| | 28 | | 128 | 80 | 104 | 112 | 1.3 | 0.7 | 46.15 |
| | 30 | | 140 | 86 | 114 | 120 | 1.8 | 0.7 | 61.11 |
| | 32 | | 245 | 193 | 219 | 128 | 1.8 | 1.0 | 44.44 |
| | | | 185 | 171 | 183 | 84 | 2.01 | 0.92 | 54.23 |
| | 2 | 8.1gpm/pie ² 3301pm/m ² 19.80m ³ phr/m ² | 98 | 28 | 52 | 66 | 2.1 | 0.9 | 55.55 |
| | 4 | | 98 | 28 | 50 | 66 | 2.1 | 0.8 | 61.90 |
| | 6 | | 99 | 26 | 56 | 71 | 2.1 | 0.8 | 61.90 |
| | 8 | | 92 | 04 | 38 | 54 | 2.1 | 0.8 | 61.90 |
| | 10 | | 103 | 06 | 46 | 59 | 2.6 | 1.3 | 50.00 |
| | 12 | | 84 | 05 | 38 | 50 | 2.6 | 1.0 | 61.54 |
| | 14 | | 103 | 08 | 38 | 62 | 2.4 | 0.9 | 62.50 |
| | 16 | | 89 | 08 | 44 | 55 | 2.4 | 1.0 | 58.33 |
| | 18 | | 110 | 10 | 56 | 68 | 2,3 | 1,3 | 43.48 |
| | 20 | | 122 | 10 | 60 | 74 | 2.3 | 1,3 | 43.48 |
| | 22 | | 120 | 08 | 51 | 66 | 1.7 | 1.5 | 11.76 |
| | 24 | | 124 | 06 | 48 | 62 | 1.3 | 0.7 | 58.82 |
| | 26 | | 130 | 08 | 52 | 66 | 1.3 | 0.7 | 58.82 |
| | 28 | | 126 | 06 | 48 | 62 | 1.8 | 0.8 | 88.23 |
| | 30 | | 136 | 06 | 54 | 70 | 1.8 | 0.8 | 88.23 |
| | 32 | | 134 | 08 | 54 | 70 | 1.8 | 1.5 | 16.66 |
| | | | 36 | - | 2 | 2.01 | | 50.25 | |

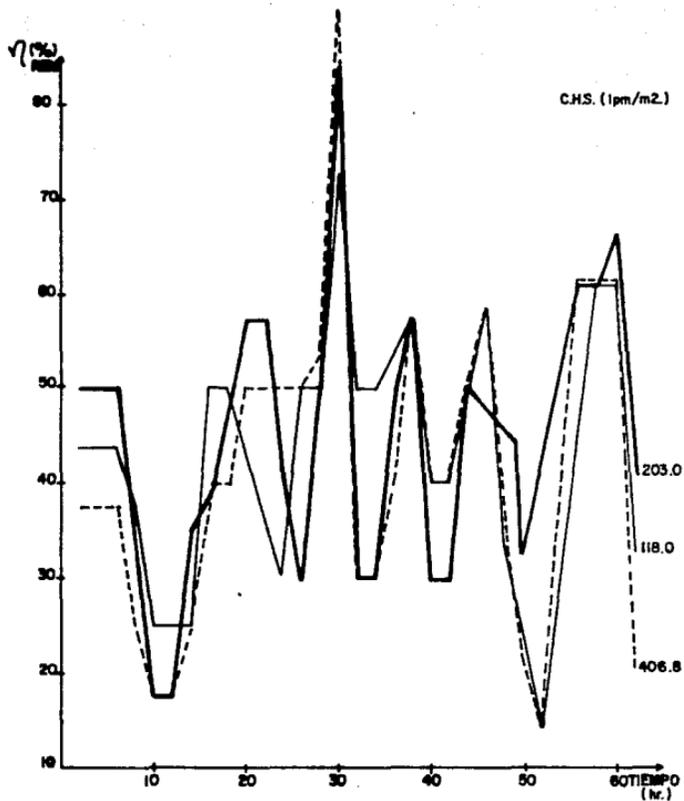
CUADRO III. 20 A CORRIDA 3 DE FILTRACION PERDIDA DE CARGA (cm) Y RELACION DE TURBIEZ (%).



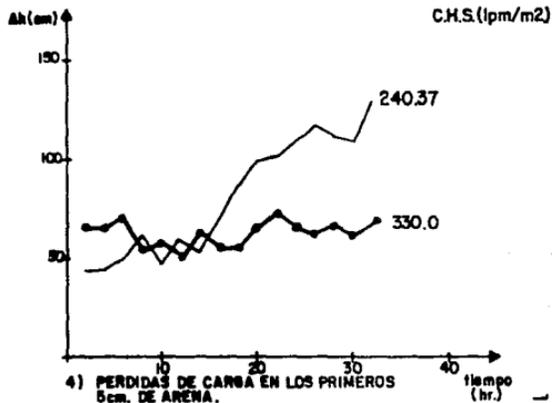
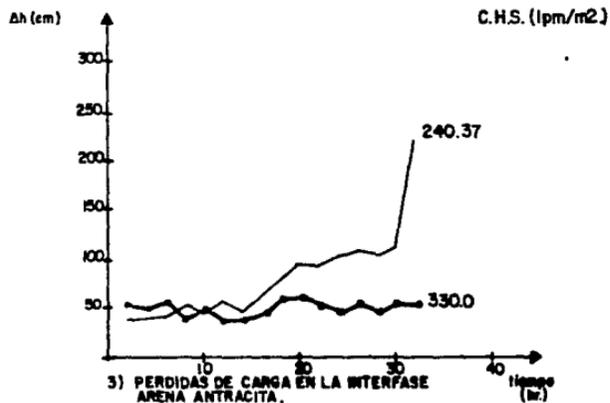
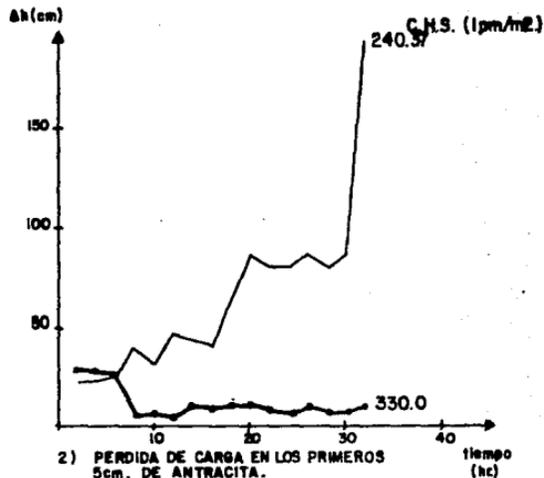
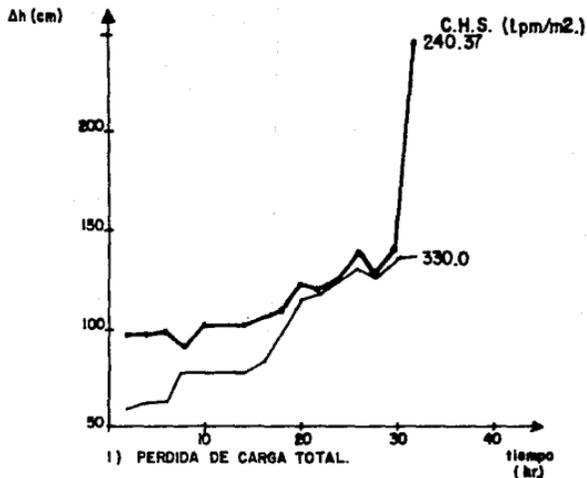
GRAFICA No. 17 PERDIDAS DE CARGA DE LA CORRIDA 2.



GRAFICA III. 18 EFICIENCIAS DE REMOCION DE TURBIDEZ
CORRIDA 3.



GRAFICA III. 20 EFICIENCIAS DE REMOCION DE TURBIDEZ
CORRIDA 4.



GRAFICA III.19 PERDIDAS DE CARGA DE LA CORRIDA 3.

Finalmente en una última corrida 4 (cuadros III.21. A, B y C), se utilizaron tasas de filtración de 118, 203 y 406.8 lpm/m^2 (2.9, 5 y 10 gpm/ft^2). Se experimentó hasta tener 62 hr., de duración de carrera teniéndose remoción de turbidez de 44.64% gráfica III.20 y pérdida de carga total de 96 cm (gráfica III.21), como se observa el ensuciamiento ocurrió en todo el lecho. Para la tasa de filtración de 203 lpm/m^2 la remoción de turbidez se mantuvo en 46.43% (gráfica III.20) aunque bajo la pérdida de carga en 78 cm el ensuciamiento se prolongó en todo el espesor del lecho (gráfica III.21). Por último para la tasa de 406.8 lpm/m^2 la remoción de turbidez fue de 44.64% (gráfica III.20) y 50 cm de pérdida de carga total (gráfica III.21) observándose menor ensuciamiento en el lecho.

En el cuadro III.22 se resumen los resultados de filtración para diferentes tasas y duraciones de carrera, recomendándose como óptimas de 114 a 160.92 lpm/m^2 para duraciones de carrera de 36 y 22 hrs. respectivamente con eficiencias de remoción de turbidez de 84.1 y 40.95%; pérdidas de carga de 57 y 168 cm; con cantidades de agua de retrolavado de 4 y 5% estando éstas dentro de lo recomendable por la bibliografía, ya que para cantidades mayores resulta antieconómico el filtrado.

Por último se retrolavó el lecho con tasas de 600 a 900 l/m^2 min. con diferentes tiempos, pero no influyendo esto en el % de retrolavado, ya que es una medida directa del volumen de retrolavado y volumen filtrado.

| AREA (m ²) | DURACION (hr) | CARGA HIDRAULICA SUPERFICIAL. | PERDIDAS DE CARGA (ΔH) | | | | TURBIEDAD ¹⁶⁹ | | |
|------------------------|---------------|---------------------------------------|------------------------|----|----|----|--------------------------|------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | INF. | EFL. | n (%) |
| | 0 | | 12 | 2 | 4 | 6 | 0.8 | 0.45 | 43.75 |
| | 2 | | 18 | 4 | 8 | 10 | 0.8 | 0.45 | 43.75 |
| | 4 | 2.9 gpm/pie ² | 18 | 4 | 8 | 10 | 0.8 | 0.45 | 43.75 |
| | 6 | | 20 | 4 | 10 | 12 | 0.8 | 0.45 | 43.75 |
| | 8 | 118.0 lpm/m ² | 19 | 3 | 7 | 9 | 0.8 | 0.50 | 37.50 |
| | 10 | | 20 | 5 | 9 | 12 | 0.8 | 0.60 | 25.00 |
| | 12 | 7.3 m ³ phr/m ² | 20 | 4 | 9 | 11 | 0.8 | 0.60 | 25.00 |
| | 14 | | 18 | 5 | 8 | 10 | 0.8 | 0.60 | 25.00 |
| | 16 | | 20 | 6 | 8 | 10 | 1.0 | 0.50 | 50.00 |
| | 18 | | 20 | 4 | 8 | 10 | 1.0 | 0.50 | 50.00 |
| | 20 | | 22 | 6 | 10 | 12 | 1.4 | 0.90 | 35.71 |
| | 22 | | 24 | 8 | 12 | 14 | 1.4 | 0.90 | 35.71 |
| | 24 | | 24 | 8 | 12 | 14 | 1.0 | 0.70 | 30.00 |
| | 26 | | 30 | 12 | 17 | 20 | 1.0 | 0.80 | 20.00 |
| | 28 | | 30 | 20 | 18 | 19 | 1.5 | 0.60 | 60.00 |
| | 30 | | 34 | 25 | 21 | 24 | 1.5 | 0.40 | 73.33 |
| | 32 | | 38 | 20 | 26 | 28 | 1.0 | 0.60 | 40.00 |
| | 34 | | 40 | 12 | 28 | 30 | 1.0 | 0.60 | 40.00 |
| | 36 | | 42 | 14 | 30 | 32 | 1.4 | 0.70 | 50.00 |
| | 38 | | 46 | 28 | 32 | 36 | 1.4 | 0.60 | 57.14 |
| | 40 | | 46 | 28 | 32 | 36 | 1.0 | 0.60 | 40.00 |
| | 42 | | 48 | 28 | 34 | 38 | 1.0 | 0.60 | 40.00 |
| | 44 | | 52 | 30 | 38 | 40 | 1.2 | 0.60 | 50.00 |
| | 46 | | 55 | 35 | 42 | 45 | 1.2 | 0.50 | 58.33 |
| | 48 | | 58 | 36 | 44 | 48 | 0.9 | 0.60 | 33.3 |
| | 50 | | 62 | 40 | 47 | 50 | 0.9 | 0.60 | 33.3 |
| | 52 | | 64 | 42 | 50 | 53 | 0.7 | 0.60 | 14.28 |
| | 54 | | 64 | 42 | 50 | 53 | 0.7 | 1.00 | - |
| | 56 | | 70 | 47 | 56 | 59 | 1.8 | 0.70 | 61.11 |
| | 58 | | 79 | 55 | 64 | 68 | 1.8 | 0.70 | 61.11 |
| | 60 | | 84 | 60 | 70 | 74 | 1.8 | 0.70 | 61.11 |
| | 62 | | 108 | 80 | 92 | 94 | 1.2 | 0.80 | 33.33 |
| | | | 96 | 78 | 88 | 88 | 1.12 | 0.62 | 44.64 |
| | | | # | | | | ** | | |

CUADRO III. 21. A. CORRIDA 4 DE FILTRACION PERDIDAS DE CARGA (cm) Y REMOCION

| AREA (m ²) | DURACION (hr) | CARGA HIDRAULICA SUPERFICIAL. | PERDIDAS DE CARGA (ΔH) | | | | TURBIEDAD 170 | | |
|------------------------|---------------|---------------------------------------|------------------------|----|----|----|---------------|------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | INF. | EFL. | n(%) |
| 0.071 | 0 | | 32 | 6 | 14 | 18 | 0.8 | 0.40 | 50.00 |
| | 2 | 5gpm/ft ² | 40 | 16 | 20 | 26 | 0.8 | 0.40 | 50.00 |
| | 4 | | 50 | 22 | 32 | 36 | 0.8 | 0.40 | 50.00 |
| | 6 | | 50 | 22 | 30 | 36 | 0.8 | 0.40 | 50.00 |
| | 8 | 2031pm/m ² | 59 | 28 | 42 | 44 | 0.8 | 0.50 | 37.5 |
| | 10 | | 60 | 31 | 42 | 46 | 0.8 | 0.70 | 12.50 |
| | 12 | 12.23m ³ ph/m ² | 61 | 31 | 44 | 49 | 0.8 | 0.70 | 12.50 |
| | 14 | | 63 | 30 | 40 | 51 | 0.8 | 0.50 | 37.5 |
| | 16 | | 66 | 34 | 50 | 54 | 1.0 | 0.60 | 40.00 |
| | 18 | | 72 | 36 | 54 | 58 | 1.0 | 1.00 | - |
| | 20 | | 86 | 40 | 66 | 70 | 1.4 | 0.60 | 57.14 |
| | 22 | | 90 | 40 | 68 | 76 | 1.4 | 0.60 | 57.14 |
| | 24 | | 82 | 30 | 64 | 67 | 1.0 | 0.60 | 40.00 |
| | 26 | | 82 | 30 | 64 | 67 | 1.0 | 0.70 | 30.00 |
| | 28 | | 42 | 12 | 22 | 30 | 1.5 | 0.60 | 60.00 |
| | 30 | | 50 | 16 | 27 | 32 | 1.5 | 0.24 | 84.00 |
| | 32 | | 48 | 20 | 28 | 34 | 1.0 | 0.70 | 30.00 |
| | 34 | | 54 | 24 | 32 | 38 | 1.0 | 0.70 | 30.00 |
| | 36 | | 66 | 36 | 44 | 50 | 1.4 | 0.70 | 50.00 |
| | 38 | | 76 | 42 | 54 | 58 | 1.4 | 0.60 | 57.14 |
| | 40 | | 78 | 38 | 56 | 58 | 1.0 | 0.70 | 30.00 |
| | 42 | | 74 | 24 | 40 | 54 | 1.0 | 0.70 | 30.00 |
| | 44 | | 66 | 24 | 38 | 48 | 1.2 | 0.60 | 50.0 |
| | 46 | | 74 | 31 | 50 | 54 | 1.2 | 0.50 | 58.33 |
| | 48 | | 73 | 32 | 48 | 55 | 0.9 | 0.50 | 44.44 |
| | 50 | | 91 | 33 | 67 | 73 | 0.9 | 0.60 | 33.33 |
| | 52 | | 95 | 41 | 72 | 78 | 0.7 | 0.70 | - |
| | 54 | | 96 | 39 | 73 | 79 | 0.7 | 0.70 | - |
| | 56 | | 92 | 31 | 69 | 74 | 1.8 | 0.70 | 61.11 |
| | 58 | | 95 | 32 | 72 | 73 | 1.8 | 0.70 | 61.11 |
| | 60 | | 96 | 34 | 72 | 78 | 1.8 | 0.60 | 66.6 |
| | 62 | | 110 | 42 | 84 | 92 | 1.2 | 0.70 | 41.66 |
| | | | 78 | 36 | 70 | 74 | 1.12 | 0.60 | 46.43 |

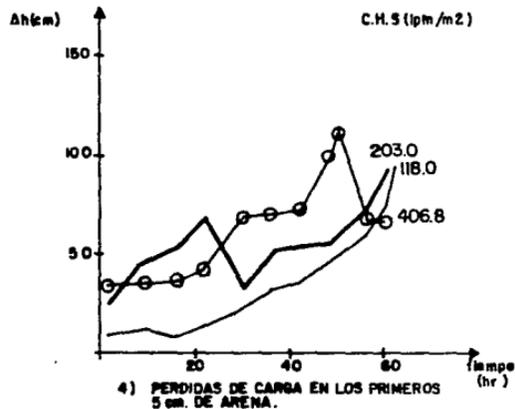
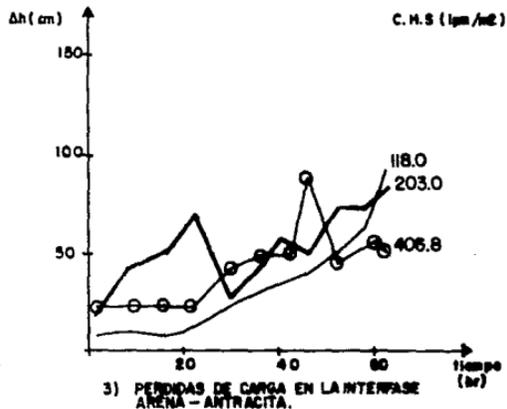
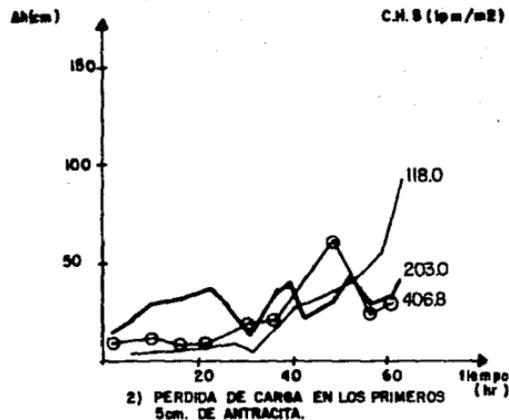
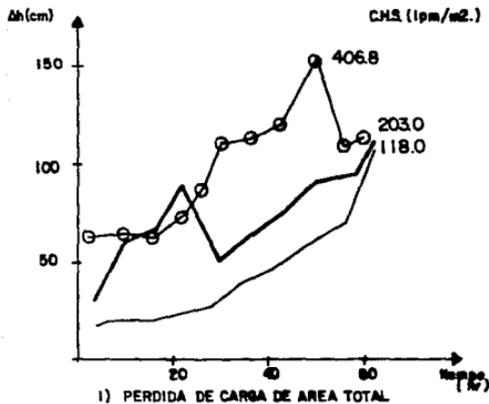
III. 21.B. CORRIDA 4 DE FILTRACION PERDIDAS DE CARGA (cm)
Y REMOCION DE TURBIDEZ (%).

| AREA (m ²) | DURACION (hr) | CARGA HIDRAULICA SUPERFICIAL | PERDIDAS DE CARGA (AH) | | | | TURBIEDAD 171 | | |
|------------------------|---------------|--|------------------------|----|----|-----|---------------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | INF. | EFL. | n(%) |
| 0.018 | 0 | | 62 | 10 | 20 | 34 | 0.8 | 0.50 | 37.5 |
| | 2 | 10gpm/ft ² | 66 | 10 | 24 | 38 | 0.8 | 0.50 | 37.5 |
| | 4 | | 66 | 10 | 24 | 38 | 0.8 | 0.50 | 37.5 |
| | 6 | 406.81pm/m ² | 66 | 8 | 24 | 38 | 0.8 | 0.50 | 37.5 |
| | 8 | | 57 | 6 | 25 | 29 | 0.8 | 0.60 | 25.0 |
| | 10 | 24.46m ³ phr/m ² | 64 | 8 | 22 | 36 | 0.8 | 0.70 | 12.5 |
| | 12 | | 60 | 9 | 22 | 34 | 0.8 | 0.70 | 12.5 |
| | 14 | | 61 | 9 | 22 | 35 | 0.8 | 0.60 | 25.0 |
| | 16 | | 62 | 8 | 22 | 36 | 1.0 | 0.60 | 40.0 |
| | 18 | | 64 | 8 | 24 | 36 | 1.0 | 0.60 | 40.0 |
| | 20 | | 68 | 10 | 26 | 40 | 1.4 | 0.70 | 50.0 |
| | 22 | | 72 | 10 | 24 | 42 | 1.4 | 0.70 | 50.0 |
| | 24 | | 76 | 12 | 30 | 46 | 1.0 | 0.70 | 50.0 |
| | 26 | | 86 | 14 | 32 | 50 | 1.0 | 0.70 | 50.0 |
| | 28 | | 86 | 14 | 33 | 50 | 1.5 | 0.70 | 53.3 |
| | 30 | | 110 | 18 | 42 | 70 | 1.5 | 0.12 | 92.0 |
| | 32 | | 114 | 20 | 46 | 70 | 1.0 | 0.70 | 30.0 |
| | 34 | | 108 | 24 | 46 | 68 | 1.0 | 0.70 | 30.0 |
| | 36 | | 112 | 22 | 48 | 71 | 1.4 | 0.80 | 42.85 |
| | 38 | | 112 | 22 | 46 | 70 | 1.4 | 0.60 | 57.14 |
| | 40 | | 118 | 24 | 48 | 74 | 1.0 | 0.60 | 40.0 |
| | 42 | | 118 | 22 | 48 | 74 | 1.0 | 0.60 | 40.0 |
| | 44 | | 120 | 24 | 50 | 76 | 1.2 | 0.60 | 50.0 |
| | 46 | | 123 | 27 | 50 | 77 | 1.2 | 0.50 | 58.33 |
| | 48 | | 151 | 64 | 87 | 100 | 0.9 | 0.60 | 33.3 |
| | 50 | | 155 | 68 | 90 | 114 | 0.9 | 0.70 | 22.2 |
| | 52 | | 153 | 68 | 87 | 112 | 0.70 | 0.60 | 14.28 |
| | 54 | | 151 | 68 | 87 | 110 | 0.70 | 0.70 | - |
| | 56 | | 108 | 26 | 46 | 67 | 1.8 | 0.70 | 61.11 |
| | 58 | | 104 | 24 | 44 | 65 | 1.8 | 0.70 | 61.11 |
| 60 | | 104 | 26 | 56 | 68 | 1.8 | 0.70 | 61.11 | |
| 62 | | 112 | 32 | 54 | 67 | 1.2 | 0.70 | 20.83 | |
| | | | 50 | 22 | 34 | 33 | 1.12 | 0.62 | 6.64 |

III. 21. C. CORRIDA 4 DE FILTRACION PERDIDAS DE CARGA (cm)
Y REMOCION DE TURBIDEZ (%).

CUADRO III. 22 RESUMEN DE CORRIDAS DE FILTRACION

| Qw | TASA DE FILTRACION | CARRERA (hr) | PERDIDAS DE CARGA | | | | REMOCION DE TURBIDEZ (%) | AGUA DE RETROLAVADO (%) | OBSERVACIONES |
|-----|---|-------------------|-------------------|-----|-----|-------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| 0.5 | 97.77 lpm/m ² 2.4 gpm/ft ² | 36 | 0 | 0 | 0 | 84.36 | 4 | AGUA RECARBONATADA | |
| 0.5 | 114 lpm/m ² 2.8 gpm/ft ² | 36 | 57 | 0 | 50 | 49 | 84.10 | 4 | IDEM. |
| 0.5 | 395 lpm/m ² 9.7 gpm/ft ² | 36 | 45 | 6 | 17 | 28 | 78.20 | 8 | IDEM. |
| 0.5 | 118 lpm/m ² 2.9 gpm/ft ² | 40 | 105 | 62 | 108 | 106 | 36.19 | 8 | AGUA DE TRATAMIENTO BIOLOGICO |
| 0.5 | 118 lpm/m ² 2.9 gpm/ft ² | 22 | 132 | 30 | 133 | 133 | 40.95 | 6 | IDEM. |
| 0.5 | 160.92 lpm/m ² 3.95 gpm/ft ² | 22 | 168 | 148 | 173 | 175 | 40.95 | 5 | IDEM. |
| 0.5 | 99.81 lpm/m ² 2.45 gpm/ft ² | 40 | 122 | 118 | 120 | 122 | 37.14 | 10 | IDEM. |
| 0.5 | 240.37 lpm/m ² 5.90 gpm/ft ² | 32 | 185 | 171 | 183 | 84 | 54.23 | 8 | AGUA RECARBONATADA |
| 0.5 | 330.0 lpm/m ² 8.1 gpm/ft ² | 32 | 36 | 0 | 2 | 4 | 52.38 | 6 | IDEM. |
| 0.5 | 118 lpm/m ² 2.9 gpm/ft | 62 | 96 | 78 | 88 | 88 | 44.64 | 6 | AGUA RECARBONATADA |
| 0.5 | 203 lpm/m ² | 62 | 78 | 36 | 70 | 74 | 46.43 | 6 | IDEM. |
| 0.5 | 406.8 lpm/m ² 10 gpm/ft ² | 62 | 50 | 22 | 34 | 33 | 44.64 | 8 | IDEM. |



III.6 Adsorción

El proceso de adsorción fue observado primeramente para gases en el año 1773 por C. W. Scheele y luego para soluciones por Lowitz (1785); actualmente se reconoce como un fenómeno importante para la mayor parte de los procesos físicos naturales, biológicos y químicos. La adsorción sobre sólidos, particularmente carbón activado, ha llegado a utilizarse ampliamente para la purificación de aguas y aguas residuales.

Los carbones activados son valiosos para la eliminación de sabor, olor y color de las aguas, así como para la remoción de compuestos refractarios al tratamiento biológico de aguas residuales.

En general, la adsorción varía en razón directa de la presión y en razón inversa de la temperatura.

Puede decirse que todos los materiales comerciales que muestran, desde el punto de vista de la ingeniería, la máxima capacidad adsorbente efectiva en las condiciones en que se emplean, se activan fácilmente y se desprende de ellos con facilidad el adsorbato.

La adsorción como operación unitaria, podría considerarse como complementaria o suplementaria de otros procesos, cada uno de los cuales tiene limitaciones concretas con respecto a las pequeñas concentraciones de sustancias que habrían de eliminarse o sacarse.

Las características del carbón empleado son un dato fundamental para el diseño de las unidades de proceso.

En terminos generales los carbones utilizados son de origen mineral, aunque también pueden emplearse carbones vegetales. En la planta piloto de Cerro de la Estrella se empleó carbón de origen mineral, de procedencia americana, pero activado en México.

Mecanismo de Transferencia

Los parámetros básicos que definen la eficiencia del proceso son :

- 1) Las concentraciones de equilibrio en la superficie del carbón y en el aire.
- 2) La velocidad de transferencia de los contaminantes del agua al carbón.

1) La adsorción en un sistema sólido-líquido proviene de la separación del soluto de la solución y su concentración en la superficie de un sólido hasta que se establece un equilibrio dinámico en la superficie, entre la concentración de soluto que permanece en solución y la concentración superficial del soluto, En el equilibrio, existe una distribución definida de soluto entre las fases líquida y sólida, la relación de distribución es una medida de la posición del equilibrio en el proceso de adsorción y puede ser una función de la concentración del soluto, concentración y naturaleza de los solutos competitivos, naturaleza de la solución, etc.

La forma más común para expresar esta distribución consiste en expresar la cantidad "qe" como una función de "C" a una temperatura fija; la "C" es la concentración del soluto que permanece en solución en el equilibrio. Una expresión de este tipo se llama isoterma de adsorción, la cual es una función de la variación de la adsorción con la concentración de adsorbato en la masa principal de la solución y a temperatura constante.

La ecuación usada para explicar el fenómeno que ocurre en el proceso de adsorción de contaminantes en el agua por medio de carbón activado es conocida como isoterma de Freundlich.

(Esta ecuación es un caso especial para energías superficiales heterogéneas.)

La ecuación de Freundlich es básicamente empírica, pero es un instrumento útil para describir los datos; su forma general es:

$$q_e = K_F C^{1/n}$$

Donde: K_F y n son constantes de capa compuesta y para cada tipo de carbón; mientras que C es la concentración del contaminante en el agua (mg/l).

En forma logarítmica tenemos

$$\text{Log } q_e = \text{log } K_F + 1/n \text{ log } C$$

Para el caso de tratamiento de aguas, la cantidad adsorbida, q_e , es igual a $(C_0 - C)/D_0$, siendo C_0 la concentración del contaminante y D_0 la dosificación de carbón, es decir, el peso por unidad de volumen.

Sustituyendo en la ec. anterior, obtenemos:

$$\text{Log } \frac{C_0 - C}{D_0} = \log K + \frac{1}{n} \log C$$

La cual nos da una línea recta con pendiente $1/n$ y ordenada en el origen igual al valor de $\log K$ para $C = 1$ ($\log C = 0$); la ordenada en el origen es una indicación aproximada de la capacidad de adsorción y la pendiente, $1/n$ de la intensidad de adsorción.

2) La velocidad de transferencia. Los criterios de diseño son esencialmente empíricos y prácticamente revisten menos importancia desde el punto de vista de diseño, porque en condiciones normales se emplean volúmenes tales de carbón, que el tiempo de contacto excede los requerimientos comunes para asegurar la transferencia del contaminante del agua al carbón.

Existen diversos factores que influyen en la adsorción: área superficial, naturaleza del adsorbato, pH, temperatura, adsorción de solutos mixtos y naturaleza del adsorbente.

Area Superficial:

La adsorción es un fenómeno superficial, como tal, el grado de adsorción es proporcional al área superficial específica, la cual puede definirse como la porción del área total que está disponible para la adsorción. Por lo tanto, la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente sólido es tanto mayor cuanto más finamente dividido y poroso esté el sólido.

Naturaleza del Adsorbato

Al considerar la adsorción de una solución debemos tener en cuenta el hecho de que la solubilidad del soluto influye en gran parte en el control del equilibrio de adsorción.

En general, podemos anticipar una dependencia inversa entre el grado de adsorción de un soluto y su solubilidad en el disolvente a partir del cual ocurre la adsorción; esta es la regla de Lundelius, que es una de las dos normas generales que pueden aplicarse para una predicción semicuantitativa del efecto del carácter químico de un soluto sobre su propia adsorción de la solución.

pH:

Debido a que los iones H^+ y OH^- absorben bastante fuerza, la adsorción de otros iones viene influenciada por el pH de la solución. Además, el pH

influye en la adsorción ya que gobierna el grado de ionización de los compuestos ácido o básicos, el cual es factor determinante para la adsorción.

En general, la adsorción de los contaminantes orgánicos típicos del agua aumenta al disminuir el pH.

Temperatura

Las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas; por tanto el grado de adsorción suele aumentar al disminuir la temperatura; además, las variaciones pequeñas de temperatura no alteran grandemente el proceso de adsorción.

Adsorción de Solutos Mixtos

En la aplicación de la adsorción para la purificación de las aguas y aguas residuales, el material que debe adsorberse es una mezcla de varios componentes y esto ocasiona que cada soluto compita de alguna forma, con la adsorción de los otros.

Naturaleza del adsorbente

La naturaleza fisicoquímica del adsorbente puede tener efectos profundos sobre la velocidad y capacidad de adsorción respectivamente cada sólido es un adsorbente potencial; actualmente el carbón activado es el adsorbente de mayor interés.

Retrolavado

Esta operación consiste en someter la columna empacada a un flujo de fluido suficiente para remover sólidos acumulados en el lecho.

La velocidad y frecuencia del retrolavado depende de la carga hidráulica, la naturaleza y concentración de los sólidos suspendidos en el agua residual, el tamaño de partícula del carbón y el método de contacto.

La frecuencia del retrolavado se puede fijar arbitrariamente (a diario con un tiempo específico) o por criterio de operación (pérdida de presión o turbidez), su duración puede ser de 10 a 15 minutos.

Una de las alternativas para los sistemas de contacto de cloro es el flujo descendente de agua residual a través del lecho decarbón.

La razón principal para utilizar un contactor de flujo descendente. Es usar el carbón con un propósito doble: Adsorción de los orgánicos y filtración de materia suspendida.

Una desventaja de este sistema de flujo es que la provisión debe ser hecha de manera periódica para el retrolavado y en consecuencia relevar la pérdida de presión asociada con la acumulación de sólidos suspendidos. La operación continua por algunos días sin retrolavado, puede ocasionar compactación o falta de lecho.

La cantidad normal de agua de retrolavado empleada es menor al 5% del agua producida para una altura de filtro de 0.8 m (30 in) y 10-20% para 4.5 m (15 ft) de filtro. La velocidad de flujo de retrolavado recomendada para carbón granular de 8 x 12 o 12 x 30 son 8.2 a 13.7 l/ m²seg(12 a 20 gpm/ ft²). (Ref. 15).

La remoción de sólidos atrapados en un lecho empacado ascendente puede requerir 2 etapas:

La obturación de:

- 1) La superficie del fondo debe realizarse por operación temporal del lecho de manera descendente.
- 2) Los sólidos suspendidos atrapados a la mitad del lecho pueden ser removidos por expansión.

Cuando se retrolavan los filtros de flujo ascendente, se requiere más tiempo y proporcionalmente mayor volumen de agua de una calidad mayor para evitar obturaciones en el fondo de los lechos.

A veces el contraflujo de los contactores del empaque de carbón ascendente precedido por filtración, meramente consiste del doble de la velocidad del contactor normal de 10-15 min.

El equipo usado para retrolavado, lo mismo que el control son similares a los usados para la filtración con arena para agua potable.

Hidráulica del Retrolavado

El lecho de carbón activado es un medio compuesto de partículas relativamente uniformes, que durante la operación normal del filtro ocupa una profundidad "L", pero durante la operación de retrolavado se expande a una profundidad "Le".

Cuando se alcanza una velocidad crítica "Vc" durante el retrolavado habrá un balance entre la resistencia por fricción de las partículas y la pérdida de carga del agua en la expansión del lecho. La expresión matemática de este fenómeno es la siguiente:

$$h_L + E = (\epsilon_s - \epsilon) * (1 - ee) * Le$$

Donde:

h_L = Pérdida de carga durante la expansión (m)

ϵ_s = Peso específico de las partículas (kg/m^3)

ϵ = Peso específico del agua (Kg/m^3)

L_e = Profundidad del lecho expandido (m)

ee = Porosidad del lecho expandido (%)

La pérdida de presión por fricción ($h_L * \epsilon$) se balancea con el peso de las partículas en el agua, por lo que la ecuación anterior se convierte en:

$$h_L = L_e * (\epsilon_s - \epsilon) / \epsilon * (1 - ee)$$

La porosidad del lecho expandido (ee) se puede calcular de la siguiente manera:

$$ee = (v_s/k)^n$$

Donde: k = constante

n = coeficiente de expansión = $4.45 * Re^{-0.1}$

V_s = Velocidad del flujo ascendente durante el retrolavado

La expansión relativa del lecho se determinó considerando que el volumen de las partículas en el medio no expandido es exactamente igual cuando el filtro se expande, lo que puede expresarse matemáticamente con la siguiente relación:

$$L * (1 - e) * A_b = L_e * (1 - ee) * A_b$$

Donde: A_b es el área superficial del medio. Por lo tanto:

$$L_e = L * (1 - e) / (1 - ee)$$

De lo anterior se desprende que la tasa de retrolavado requerida para obtener una expansión dada, dependerá de la velocidad de asentamiento de las partículas de carbón a una temperatura de operación de 20°C.

Asumiendo que la gravedad específica "Sg" de 1.75 para el carbón activado, podemos obtener parámetros como la tasa de retrolavado las pérdidas de carga totales producidas en el proceso y la profundidad total del lecho expandido.

Para determinar la tasa de retrolavado fue necesario calcular primero la velocidad de asentamiento de las partículas, lo cual se hace por medio de la siguiente ecuación:

$$V_s = \left(\frac{4}{3} \right) * (g/CD) * (\epsilon_s - \epsilon) / \epsilon * d^{1/2}$$

El regimen normal para este tipo de procesos es laminar, así para

$$Re = 1.9 - 500 \quad CD = 18.5/Re^{0.6}$$

El número de Reynolds para una partícula, basado en la velocidad de asentamiento de la misma es $Re_o = 0.45$, el cual se usa para determinar los coeficientes de expansión "n" para el carbón:

Para una fluidización mínima, $v_f = Ke^n$

Donde: v_f = velocidad de fluidización (gpm/ft^2)

Durante el retrolavado se produce una pérdida de carga "hL", que se estima haciendo uso de la ecuación:

$$hL = Le * (\epsilon_s - \epsilon) / \epsilon * (1 - ee)$$

$$(\epsilon_s - \epsilon) / \epsilon = Sg - 1$$

$$hLf = Le * (Sg - 1) * (1 - e)$$

Donde hLf = Pérdida en el falso fondo

La pérdida total de carga será:

$$h_l \text{ total} = h_l \text{ medio} + h_l \text{ falso fondo}$$

Definiendo $(\epsilon_s - \epsilon) / \epsilon = S_g - 1$

S_g = gravedad específica de las partículas

Y sustituyendo la relación de CD en la ecuación de la velocidad de asentamiento, se determinó la siguiente relación entre " V_s " y " d " para el carbón activado.

$$V_s = 313.18 * d^{1.143}$$

La velocidad de asentamiento de las partículas está relacionada con su velocidad de fluidización " v_f " de la siguiente manera:

$$V_s = 8.45 * v_f$$

La velocidad de fluidización (desarrollada por Leva partiendo de Kozeny) se determina por la ecuación:

$$v_f = (0.00381 * (d_{60})^{1.02} * \epsilon * (\epsilon_s - \epsilon)^{0.94}) / \mu^{0.88}$$

Donde:

v_f = velocidad de fluidización en GPM/ft²

d_{60} = Diámetro de la partícula al 60%

ϵ = peso específico en lb/ft³

μ = viscosidad en centipoises

Fondo de las Columnas Empacadas

Se utilizó gravilla sílica de 4.7 mm de \varnothing y un espesor de 50 cm para soportar el carbón activado y evitar taponamiento de las cebollas.

Bases de Diseño

El diseño hidráulico básico y los conceptos operativos para adsorbedores de lecho fijo, flujo por gravedad y a presión son esencialmente los mismos que para los filtros de lecho granular del tipo correspondiente.

La granulometría del carbón es importante desde el punto de vista de operación hidráulica de las unidades (a menor tamaño de partícula, mayores pérdidas de carga, pero la superficie activa es prácticamente independiente del diámetro medio de los granulos, pues más del 99.9% de la superficie activa se localiza en poros internos de las partículas de carbón, por lo que la superficie externa de la partícula es irrelevante.

La planta piloto de "Cerro de la Estrella" fue diseñada con dos columnas en serie, con flujo descendente, un espesor total de lecho de 3.60 m; carga hidráulica por unidad de superficie de $3.86 \text{ l/seg} \cdot \text{m}^2$ ($0.23 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$, 5.69 gpm/ft^2) equivalente a un tiempo de contacto en cama vacía de 15.8 min. La unidad fue empacada con carbón mineral 8 * 30 (8% mayor que la apertura de la malla U.S. "A" y 30% menor que la apertura de la malla U.S. "B").

Las columnas son de 40 cm de \emptyset un bordo libre de 21 cm y una expansión del lecho del 40%. (figura 13).

Programa de Pruebas

Las pruebas realizadas consistieron únicamente en la variación de tres cargas hidráulicas 228, 237 y 263 l/m^2 min. No se varió la altura de empaque, debido a que se trabajo con la de diseño 7.20 m; se midieron los parámetros de turbiedad, pH, color, D.Q.O. y D.B.O₅ (cuadros III.23.A y B).

En el cuadro III.24 se presenta un resumen de las eficiencias de remoción para las tres cargas hidráulicas descritas. Como se puede observar no hay variación en el pH; para la turbiedad la remoción máxima fue del 53.58% para la carga superficial de 237 l/m^2 min. Aunque para la carga superficial de 263 l/m^2 min. la remoción de turbidez es el 40.75% más baja que la anterior, la remoción de color es del 83%, de D.Q.O. del 54% y de D.B.O del 27.11% cabe mencionar que lo óptimo se encuentra entre 237 y 263 l/m^2 min obteniendo carreras de 50 a 150 hrs. entre cada retrolavado.

En las gráficas III.22 se presentan esquemáticamente las remociones de los parámetros medidos.

Se hace mención respecto a las duraciones de carrera, pues la literatura recomienda de 24 a 48 mg/l.(Ref. 16) de carbón activado granular y en las

| Qw L/min. | C.H.S. L/m2.min. | EMPAQUE m | DURACION hr. | P ₁ kg/cm2 | P ₂ kg/cm2 | PH (inf. Ef.) | | TURBEDAD (inf. Ef.) | | COLOR (inf. Ef.) | | D. G. O. (inf. Ef.) | | D. B. O. (inf. Ef.) | |
|--------------|---------------------|--------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|------------------|------|------------------------|------|---------------------|------|------------------------|-------|------------------------|------|
| 30 | 263 | 7.20 | 37 | 1.5 | 0.8 | 7.49 | 8.62 | 1.6 | 0.8 | 17.5 | 2.5 | 38.8 | 3.98 | 2.4 | 0.60 |
| 30 | 263 | 7.20 | 63 | 1.1 | 1.1 | 7.56 | 8.60 | 1.8 | 0.65 | 20 | 2.5 | 19.4 | 3.88 | 2.4 | 2.0 |
| 30 | 263 | 7.20 | 105 | - | - | 8.60 | 7.96 | 7 | 4 | - | - | 19.4 | 27.16 | 1.3 | 1.1 |
| 30 | 263 | 7.20 | 38 | - | - | 7.70 | 8.41 | 6 | 4 | - | - | 31.04 | 7.76 | 1.8 | 1.3 |
| 30 | 263 | 7.20 | 28 | 1.1 | 1.2 | 8.34 | 7.84 | 6 | 4 | 25 | 2.5 | 11.76 | 3.92 | 0.8 | 0.5 |
| 30 | 263 | 7.20 | 35 | 0.5 | 1.0 | 7.96 | 8.36 | 6 | 5 | 25 | 2.5 | 19.6 | 39.2 | 0.2 | 0.4 |
| 30 | 263 | 7.20 | 65 | - | - | 9.22 | 8.48 | 4.5 | 2.5 | 50 | 5 | 43.12 | 3.92 | 2.9 | 1.0 |
| 30 | 263 | 7.20 | - | - | - | 9.81 | 8.68 | 4.5 | 2.0 | 15 | 5 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | 1.2 | 1.0 | 8.17 | 8.30 | 1.9 | 2.25 | 15 | 5 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | 1.3 | 1.1 | 7.72 | 8.22 | 4.5 | 1.0 | 50 | 5 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | - | - | - | 8.61 | - | 0.5 | - | 0 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | - | - | 7.86 | 8.35 | 1.0 | 1.0 | 30 | 5 | - | 3.92 | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | 0.5 | 0.5 | 9.33 | 8.54 | 2.0 | 1.5 | 30 | 0 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | - | - | 7.80 | 8.20 | 3.5 | 2.5 | 50 | 5 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | - | - | 7.85 | 7.92 | 3.5 | 2.0 | 30 | 0 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | - | 1.0 | 0.5 | 8.33 | 8.17 | 1.0 | 1.0 | 30 | 0 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | 150 | 1.5 | 1.0 | - | 8.09 | - | 0.5 | - | 0 | 39.2 | 3.9 | 3.9 | 2.7 |
| 30 | 263 | 7.20 | 26 | 1.9 | 1.5 | 8.25 | 7.82 | 2.5 | 2.0 | 30 | 10 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | 22 | - | - | 7.83 | 8.55 | 1.0 | 0.5 | 30 | 0 | 43.1 | 3.9 | 3.8 | 4.0 |
| 30 | 263 | 7.20 | 26 | 1.3 | 1.1 | 8.16 | 8.44 | 2.5 | 2.0 | 20 | 0 | 47.1 | 15.7 | 4.8 | 2.4 |
| 30 | 263 | 7.20 | 34 | - | - | 8.10 | 8.88 | 2 | 1.5 | 50 | 5 | 31.4 | 3.9 | 2.6 | 2.2 |
| 30 | 263 | 7.20 | 36 | 1.2 | 0.8 | 9.14 | 8.76 | 4.5 | 3.5 | - | - | - | 3.92 | - | 2.2 |
| 30 | 263 | 7.20 | 40 | - | - | - | - | 1.0 | 1.0 | 10 | 10 | 55.77 | 27.89 | 2.6 | 1.8 |
| 30 | 263 | 7.20 | 48 | - | - | 8.84 | 7.99 | 1.5 | 2.0 | - | - | 57.78 | 39.84 | 1.7 | 1.0 |
| 30 | 263 | 7.20 | 51 | - | - | 7.42 | 8.06 | 1.0 | 1.0 | 20 | 10 | 35.85 | 55.78 | 1.3 | 1.5 |
| 30 | 263 | 7.20 | 63 | 0.6 | 0.5 | - | 8.14 | 2.5 | 1.0 | 5 | 5 | 39.26 | 11.9 | 1.7 | 1.5 |
| 30 | 263 | 7.20 | 67 | 1.3 | 1.3 | 7.55 | 7.71 | 2.0 | 1.8 | 17.5 | 17.5 | 55.56 | 47.61 | 2.0 | 2.1 |
| 30 | 263 | 7.20 | 82 | 0.8 | 0.5 | 7.76 | - | 0.5 | 0.5 | - | - | 51.38 | - | 1.3 | - |
| 30 | 263 | 7.20 | 87 | - | - | 7.52 | 7.73 | 2.0 | 1.8 | 50 | 0 | 31.62 | 23.71 | 2.6 | 2.0 |
| 30 | 263 | 7.20 | 103 | 0.8 | 0.5 | 7.93 | 7.85 | 1.0 | 1.0 | - | - | 27.98 | 3.99 | 2.1 | 2.3 |
| 30 | 263 | 7.20 | 132 | - | - | 7.89 | 7.91 | 1.5 | 1.0 | 30 | 0 | 27.97 | 13.99 | 0.7 | 1.6 |
| 30 | 263 | 7.20 | 154 | - | - | 7.97 | 8.17 | 1.5 | 1.0 | 20 | 0 | 56 | 44 | 0.5 | 0.7 |
| 30 | 263 | 7.20 | - | - | - | 7.84 | 7.84 | 2.0 | 2.0 | 25 | 25 | 48 | 20 | 1.9 | 1.6 |

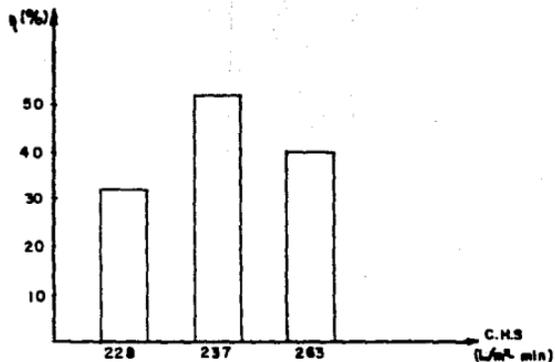
CUADRO III. 25A. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CARBON ACTIVADO

| Qv L/min. | C.H.S. L/m2. min. | LENPAQUE m. | DURACION hr. | PL P2 | | pH | | TURBEDAD | | COLOR | | D. Q. O. | | D. B. O.5 | |
|--------------|----------------------|----------------|-----------------|----------|-----|------|------|----------|------|-------|-------|----------|-------|-----------|------|
| | | | | kg/cm2. | | Inf. | Efl. | Inf. | Efl. | Inf. | Efl. | Inf. | Efl. | Inf. | Efl. |
| 30 | 263 | 7.20 | - | | | 8.80 | 7.62 | 2.0 | 1.0 | - | - | 43.65 | 7.94 | 1.9 | 1.0 |
| 30 | 263 | 7.20 | 26 | 1.1 | 1.1 | 7.88 | 8.12 | 1.2 | 0.5 | 40 | 0 | 47.61 | 1.8 | 6.35 | 1.9 |
| 30 | 263 | 7.20 | 38 | | | 7.97 | 7.96 | 1.0 | 0.5 | 40 | 10 | - | - | - | - |
| 30 | 263 | 7.20 | 62 | 0.6 | 0.5 | 7.57 | 7.70 | 1.0 | 0.5 | 40 | 15 | 47.9 | 49.7 | - | - |
| | | | | 1.080.87 | | 8.12 | 8.19 | 4.00 | 2.37 | 29 | 4.92 | 39.6 | 18.2 | 2.25 | 1.64 |
| | | | | 0.360.32 | | 0.58 | 0.33 | 6.22 | 4.52 | 12.7 | 5.90 | 12.9 | 17.1 | 0.34 | 0.80 |
| 30 | 228 | 7.20 | 138 | 1.1 | 1.0 | 9.47 | 8.54 | 2.0 | 2.0 | 30 | 10 | 34.2 | 15.7 | 2.4 | 2.4 |
| 30 | 228 | 7.20 | 30 | - | - | 7.94 | 7.98 | 2.0 | 1.0 | 20 | 15 | 51.8 | 39.68 | 2.3 | 1.5 |
| 30 | 228 | 7.20 | 50 | 1.2 | 1.1 | 8.29 | 8.35 | 2.0 | 1.0 | 40 | 10 | 35.6 | 19.8 | 2.7 | 2.8 |
| | | | | 1.151.05 | | 8.56 | 8.29 | 2.0 | 1.33 | 30 | 11.67 | 40.53 | 25.06 | 2.47 | 2.23 |
| | | | | 0.050.05 | | 0.65 | 0.23 | 0.0 | 0.47 | 8.16 | 2.36 | 7.99 | 10.47 | 0.17 | |
| 30 | 237 | 7.20 | 116 | 1.0 | 0.8 | 7.94 | 7.85 | 2.5 | 0.5 | 30 | 10 | - | - | - | - |
| 30 | 237 | 7.20 | 130 | - | - | 9.50 | 8.77 | 2.0 | 2.0 | 20 | 5 | 43.1 | 7.8 | 2.3 | 1.20 |
| 30 | 237 | 7.20 | - | - | - | - | - | 1.0 | 0.5 | 30 | 0 | 43.9 | 3.9 | 2.6 | 2.20 |
| 30 | 237 | 7.20 | 34 | 1.5 | 1.0 | - | 8.14 | 2.5 | 1.0 | 5 | 5 | 91.3 | 11.9 | 1.7 | 1.50 |
| 30 | 237 | 7.20 | 58 | 1.5 | 1.0 | 7.85 | - | 2.0 | 1.5 | 30 | 5 | 43.5 | 11.9 | 2.0 | 0.40 |
| | | | | 1.330.93 | | 8.43 | 8.25 | 2.37 | 1.1 | 23 | 5 | 55.45 | 8.88 | 2.15 | 1.32 |
| | | | | 0.230.09 | | 0.76 | 0.38 | 1.85 | 0.58 | 9.8 | 3.16 | 20.70 | 3.32 | 0.33 | 0.64 |

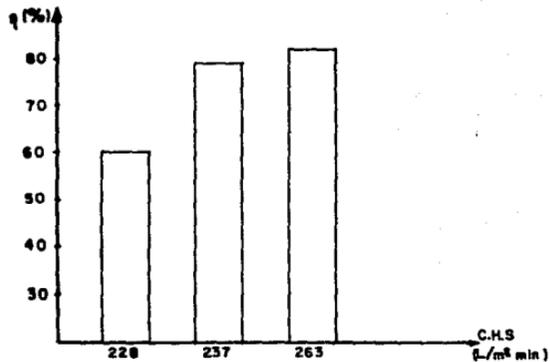
III. 23.6 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CARBON ACTIVADO

| C. H. S. L-M ² -LIE | DURACION HR | pH | | | TURBIEDAD | | | C O L O R | | | D. Q. O. | | | D. B. O. | | |
|-----------------------------------|----------------|------|------|------|-----------|------|-------|-----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|------|-------|
| | | INF. | EPL. | (%) | INF. | EPL. | (%) | INF. | EPL. | (%) | INF. | EPL. | (%) | INF. | EPL. | (%) |
| 223 | 79 | 8.56 | 8.21 | 0.27 | 2.0 | 1.33 | 33.5 | 30 | 11.67 | 61.2 | 40.53 | 25.06 | 38.17 | 2.47 | 2.23 | 9.72 |
| 227 | 72 | 8.43 | 8.25 | 0.18 | 2.27 | 1.1 | 53.58 | 23 | 5 | 78.26 | 55.45 | 8.88 | 32.98 | 2.15 | 1.32 | 38.6 |
| 263 | 59 | 8.12 | 8.19 | 0.07 | 4.0 | 2.37 | 40.75 | 29 | 4.92 | 83.03 | 39.6 | 18.2 | 54.4 | 2.25 | 1.64 | 27.11 |

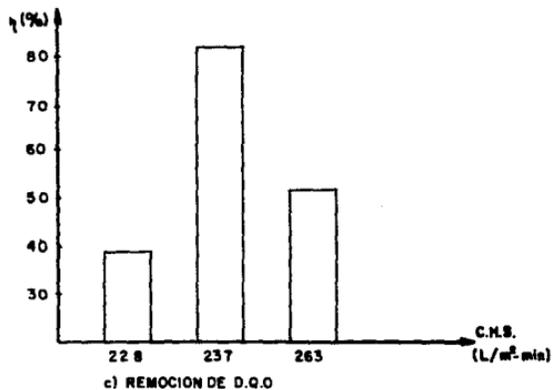
CUADRO III. 24 EFICIENCIAS DE REMOCION PROMEDIO DE ADSORCION EN CARBON ACTIVADO



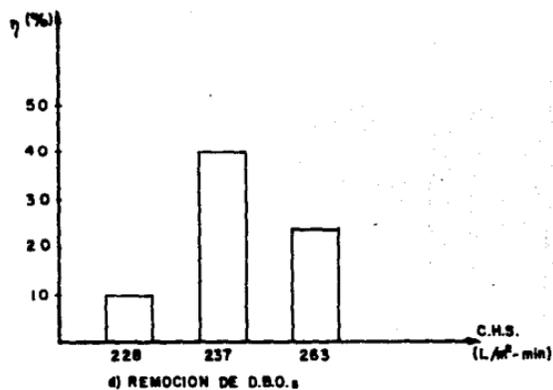
a) REMOCION DE TURBIDEZ



b) REMOCION DE COLOR



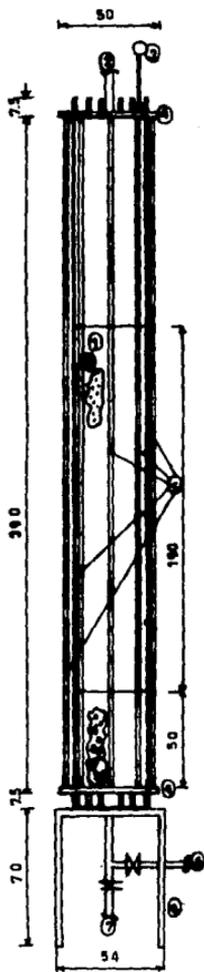
c) REMOCION DE D.Q.O.



d) REMOCION DE D.B.O.₅

GRAFICA III. 22 EFICIENCIA DE REMOCION DE ADSORCION EN CARBON ACTIVADO

UNIDAD DE ADSORCION EN CARBON ACTIVADO



- NOMENCLATURA:
 1-COLUMNA DE ADSORCION EN CARBON
 ACTIVADO. 36.8 Ø.
 2-INFLUENTE.
 3-MANOMETRO.
 4-BANDA DE ACERO.
 5-TENSORES.
 6-EFLUENTE.
 7-RETROLAVADO.
 8-BASE.
 9-LECHO DE CARBON
 10-LECHO DE GRAVA.

ACOT. cm.
 ESCALA: 1:25

FIGURA 13

corridas se utilizó aproximadamente 690 mg/l para las duraciones de 160 hrs., de operación. Al final de cada corrida se procedió a retrolavar como en el caso de los filtros duales utilizándose un 5% en promedio de agua para retrolavado, lo cual cae dentro de lo recomendable. Además los retrolavados nos sirvieron para evitar el crecimiento bacteriano en el lecho de carbón, el retrolavado del carbón activado se realizó con una tasa de 400 a 600 l/m² min (9.8 a 14.7 gpm/ft²) para la expansión del lecho del 40 al 50% observándose durante esta operación una buena limpieza del carbón.

Finalmente respecto a las lecturas de las presiones P_1 y P_2 estas se anotaron para controlar en un momento dado el incremento de presión en las cámaras, pues en un momento dado al saturarse alguna podría correrse el riesgo de reventarse por exceso de la presión.

III.7 Ozonación

El empleo de la ozonación en el tratamiento de aguas residuales es reciente.

Las propiedades físicas y químicas del ozono se han aprovechado de manera práctica, ya que es un fuerte oxidante, siendo una forma alotrópica del oxígeno, con un átomo más que la molécula natural. La ozonación se utiliza con propósitos varios:

Como ayuda de coagulación en la filtración directa de las aguas, acondicionamiento químico de las aguas para el proceso de carbón activado; para anticipar una posible degradación de la calidad de las aguas y una disminución en la capacidad adsorptiva de dicho proceso, se puede diseñar la capacidad de transferencia del ozono como ayuda de oxidación de orgánicos. Contribuye también a promover la conversión biológica del amoníaco presente a formas oxidadas del nitrógeno (nitratos y nitritos).

Eliminar también color, sabor, olor, fierro, manganeso y cianuro, etc., como se puede observar, el ozono es un oxidante de amplio espectro, ya que oxida compuestos orgánicos, inorgánicos y biológicos, por lo que también se emplea como desinfectante, además de facilitar la remoción de compuestos solubles ya que oxida la mayor parte de elementos y compuestos a su estado más elevado de oxidación

como los orgánicos refractarios (detergentes, pesticidas, fenoles, etc.)

El uso de la ozonación se ha extendido por Europa y América con buenos resultados, por ejemplo en las plantas de Los Angeles (EUA), Belle Glade, Florida (EUA), Ormond Beach, Florida (EUA), Worcester, Ma. (EUA), Hackensack, New Jersey (EUA), Choisy-le-roi (Francia) y Moulle (Francia).

El ozono es producido comercialmente por la excitación del oxígeno en una corona dieléctrica, es decir se propicia una descarga eléctrica en el dieléctrico. El oxígeno alimentado puede ser puro o combinado (aire). En el caso de alimentación de oxígeno puro las concentraciones de ozono logradas son aproximadamente del doble de las logradas si la unidad generadora se alimenta con aire, para la producción de la corona tradicionalmente se han empleado dielectricos de vidrio, pero la tendencia actual es el empleo de elementos de cerámica, por su mayor eficiencia en términos de energía consumida en la producción de ozono, una reducción potencial en el tamaño de las unidades y una concentración mayor de ozono en la mezcla de gases.

La solubilidad del ozono en el agua depende principalmente de la temperatura y la presión parcial del O_3 en la fase gas también el curso y grado de las oxidaciones por ozono puede variar considerablemente de un caso a otro, dependiendo de factores como: La naturaleza y concentración de los reactivos, temperatura, pH y tiempo de contacto.

En la práctica, no puede esperarse una degradación completa de los compuestos poco reactivos tales como hidrocarburos saturados y aún compuestos alifáticos halogenados.

Una amplia gama del ozono se destaca como sigue (Ref. 17).

Mayor capacidad de adsorción del carbón activado en la remoción de materia orgánica disuelta, mayor vida útil del carbón hasta 3 años antes de su regeneración; mayor efectividad en la combinación pre-ozonación-carbón activado-ozonación y por último reduce la demanda de cloro para la desinfección final.

Bases de Diseño

En términos generales, la dosis de ozono recomendable para el tratamiento de agua en combinación con carbón activado es proporcional a la concentración de carbón orgánico disuelto, esta proporción varía de 0.5 a 2.5 mg de ozono por mg de carbón orgánico disuelto.

Es importante insistir que la dosis de ozono necesaria no es la calculada estequiométricamente para la oxidación total de dicho carbón orgánico, pues las reacciones de oxidación buscadas son sólo las necesarias para romper y oxidar parcialmente ciertas moléculas.

Otra opción de tratamiento es colocar la unidad de ozonación entre los procesos de filtración y carbón activado. La ventaja de esta opción es la de reducir la demanda de ozono, pues una parte de los compuestos que demandan ozono serían removidos en los filtros.

Las características de los equipos generadores de ozono, así, como sus costos, varían considerablemente según la tecnología empleada por cada fabricante; algunos conceptos pragmáticos, útiles para evaluar la adquisición de equipo son:

- 1) Para los generadores con dieléctricos de cerámica, el consumo de energía es del orden de 13.8 watts-hr/g ozono generado (algunos de los fabricantes de equipo mencionan eficiencias del orden de 10 watts-hr/g ozono producido).
- 2) El volumen de gas manejado varía considerablemente, en términos generales, si se emplea aire en el generador de ozono, la concentración de ozono en la mezcla es del orden de 18g/h m³, si se emplea oxígeno la concentración puede llegar a ser de 75g ozono/Nm³. La capacidad de los difusores deberá ser por lo tanto ajustada a la concentración de ozono que produzca el equipo escogido. Algunos fabricantes especifican concentraciones del orden de 11 g/m³, otros recomiendan especificaciones aún mayores de 18 g/m³, lo que obviamente, implica menores volúmenes de gas a manejar.

Descripción de la Unidad

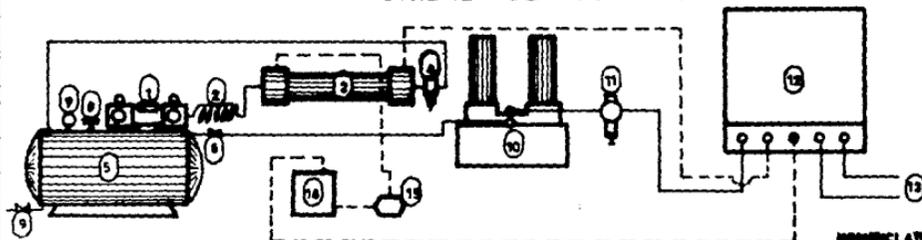
El equipo seleccionado como generador de ozono es de la U. S. Ozonair mod. LF-32, el cual genera 32 gr/hr de ozono al pasar aire seco por unos dieléctricos de cerámica (óxido de titanio), en los cuales se genera una descarga eléctrica de 12,000 volts para descomponer la molécula de aire $O_2 \rightarrow O_3$.

La inyección del ozono en el agua para un buen mezclado se realiza a base de venturis, en el cual se reduce el diámetro de una sección para incrementar la velocidad y crear una presión negativa, por lo que ahí se genera la succión y la mezcla del gas (ozono) con el agua. La unidad cuenta con dos cámaras de contacto circulares de 30 cm de \emptyset y de 3.10 m de longitud cuyo volumen es de 217 lts con un tiempo de retención de 7.20 min., a gasto de diseño de 30 l/mín. ya en la práctica se podrán variar los tiempos de contacto en 7.20 y 14.40 min. (ver figura 14).

La generación del aire se realiza por medio de un compresor que opera a base de grafito como lubricante, para evitar la humedad del aire y la saturación de la alúmina.

En las pruebas experimentales no se variaron las condiciones de operación como pudo haber sido tiempo de contacto y dosis de ozono. Pero si se probó el ozono en dos diferentes efluentes de filtración y de adsorción en carbón activado que es la discusión principal de los resultados.

UNIDAD DE OZONACION.



MONEDCLATURA.

- 1-SISTEMA DE COMPRESION.
- 2-ESPIRAL.
- 3-INTERCAMBIADOR DE CALOR.
- 4-FILTRO ELIMINADOR DE HUMEDAD.
- 5-TANQUE DE ALMACENAMIENTO.
- 6-VALVULA DE REGULACION DE FUJJO.
- 7-MANOMETRO.
- 8-VALVULA DE SEGURIDAD.
- 9-VALVULA DE PURGA.
- 10-SECADOR DE AIRE.
- 11-FILTRO INDICADOR DE HUMEDAD.
- 12-GENERADOR DE OZONO.
- 13-LINEA DE OZONO.
- 14-UNIDAD DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.
- 15-SERVIDOR PARA ENFRIAMIENTO.
- 16-IMPULSIONTE.
- 17-INYECCION DE OZONO.
- 18-CAMARAS DE CONTACTO.
- 19-PURGA DE AIRE.
- 20-SOPORTE DE CAMARAS.
- 21-IMPULSIONTE.
- 22-TUBO DE ACRILICO.

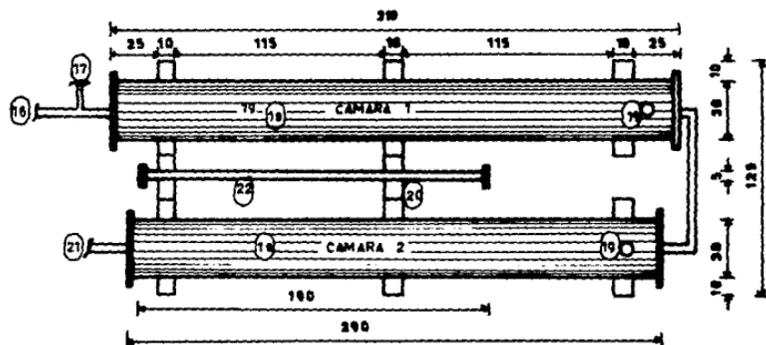


FIGURA 14

ACD:cm.
S/ESCALA.

En caso de emplear oxígeno es importante hacer notar que sólo una fracción pequeña del mismo, aproximadamente 5% es convertido en ozono, por lo que el gas exhausto contendrá cerca de 95% de oxígeno esta situación hace casi necesaria la reinyección del gas que no reaccionó en los generadores de ozono, lo cual debe ser considerado en el estimado de costos.

A continuación se presentan algunas especificaciones de equipos de ozonación:

| T I P O | CLASICO | CLASICO | OPTIMO | CLASICO | OPTIMO | CLASICO |
|---|---------|---------|--------|---------|---------|----------|
| GAS DE ENTRADA | AIRE | AIRE | AIRE | OXIGENO | OXIGENO | AIRE |
| DIELECTRICO | VIDRIO | VIDRIO | VIDRIO | VIDRIO | VIDRIO | CERAMICA |
| FRECUENCIA | 30 HZ | 600 HZ | 600 HZ | 600 HZ | 600 HZ | 600 HZ |
| CONSUMO DE ENERGIA POR UNIDAD DE SUPERFICIE (W/M ²) | 1 400 | 2 800 | 3 260 | 1 600 | 3 080 | 10 000 |
| CONCENTRACION DE OZONO (g O ₃ /Hm ³) | 18 | 18 | 18 | 75 | 70 | 18 |
| PRODUCCION DE OZONO (gO ₃ /hr-m ²) | 76 | 152 | 200 | 116 | 420 | 724 |
| ENERGIA REQUE- RIDA (W-hr/gO ₃) | 18.4 | 18.4 | 16.3 | 13.8 | 7.3 | 13.8 |
| AÑO DE DESARRO LLO DE TECNOLO GIA | 1976 | 1981 | 1983 | 1982 | 1984 | 1986 |

Ref. Coste Ch y F. Fiessinger, "Recent Advances in Ozone Generation" AWWA Preconference Seminar, - Ozonation: Recent Advances and Research Needs-Denver, Co. (EUA) 1986.

Uno de los motivos por lo cual no se probaron diferentes alternativas de operación fue la falta de experiencia en cuanto a la operación de los ozonadores, pues provocó el rompimiento de varios dieléctricos de óxido de titanio, ya que el aire inyectado no estaba seco teniéndose que implementar un sistema de secado de importación consistiendo en un intercambiador de calor, enfriado en ciclo abierto por agua, para disminuir la temperatura del aire comprimido antes de pasar por el propio secador a base de alúmina. También se implementó una válvula solenoide conectada a un timer con ciclos de 15 seg., para el drenado de humedad del tanque del compresor. Finalmente otro problema fue la inyección del gas en el líquido pues era muy difícil disolver el ozono en el agua, por lo que se diseñó un sistema a base un By-Pass y un inyector para regular la caída de presión y evitar pérdidas por fricción y por piezas especiales.

Como una primera prueba preliminar se midieron parámetros de campo (pH, turbiedad, color, alcalinidad y dureza total). Con el efluente de filtración se remueve el 52.6% de turbidez, 66% de color, la alcalinidad y dureza total así como el pH no tienen variación. (Cuadro III.25).

En cuanto al efluente de adsorción la remoción de turbiedad es del 28% considerándose baja justificándose en un momento dado por las bajas concentraciones después de carbón activado. En esta secuencia se removió el 16% y 24% de alcalinidad y dureza total siendo buenos resultados. Aunque no se midió el color se puede esperar buena eficiencia. (Cuadro III.25).

Para corroborar los resultados anteriores además de probar la eficiencia del ozono se procedió a realizar una serie de pruebas con los efluentes anteriores, pero midiendo mayor cantidad de parámetros (40 a 50), cuadros III.26 y III.27.

En el cuadro III.28 se resumen los resultados descritos anteriormente, pero con las eficiencias de remoción para cada parámetro: en cuanto a los parámetros físicos como el color, turbiedad, conductividad y sólidos se tienen mayores remociones después de adsorción, pero tomando en cuenta que el efluente de filtración contiene mayor cantidad de contaminantes, los cuales al oxidarse arrojaran mayor turbiedad y color o bajas remociones. Esto se puede observar en los sólidos volátiles que se remueven en un 37.14%, pero aparecen como sólidos totales y fijos estos podrán ser removidos posteriormente al pasar el agua por adsorción.

Para el nitrógeno amoniacal la remoción es del 28.57% en el efluente de adsorción por su alta concentración 7.4 mg/l., no así en el efluente de filtración, donde el amoníaco es de 0.2 mg/l. Por otro lado los fosfatos se incrementan esto se puede deber a la descomposición de las moléculas de detergentes, pues como se sabe éstos contienen cantidades pequeñas de fosfatos (Ref. 18), obsérvense las remociones del 41 y 75% para el agua de filtración y adsorción.

En los metales solubles se tienen remociones bajas de un 5% para el efluente ozonado proveniente de filtración; éstos al oxidarse se hacen notar en los

| | TURBIEDAD | | pH | | COLOR | | ALCAL. TOT. | | DUREZA TOT. | | |
|---|--------------------------------|------|------|------|-------|------|-------------|------|-------------|-------|-------|
| | INF. | EFL. | INF. | EFL. | INF. | EFL. | INF. | EFL. | INF. | EFL. | |
| TIEMPO DE CONTACTO = 14.40 min. | 0.6 | - | 7.04 | - | - | - | 72 | - | 176 | 171 | |
| | 0.6 | 0.3 | 7.86 | 7.47 | 20 | 5 | 88 | 96 | 137 | - | |
| | 0.6 | - | 6.92 | - | - | - | 88 | 92 | 196 | 192 | |
| | 0.6 | 0.6 | 6.63 | 7.78 | 20 | 5 | 104 | 100 | 176 | - | |
| | 0.7 | - | 6.98 | - | - | - | 108 | - | 165 | 164 | |
| | 0.8 | 0.5 | 6.97 | 7.18 | 25 | 10 | 116 | 120 | 157 | 157 | |
| | 0.8 | 0.3 | 7.24 | - | - | - | 168 | - | - | - | |
| | 0.5 | 0.3 | 7.18 | 7.13 | - | - | 120 | 132 | - | - | |
| | 0.3 | - | 7.03 | - | 30 | 15 | 156 | 160 | 157 | 145 | |
| AGUA PROCEDENTE DEL EFLUENTE DE FILTRACION. | 0.4 | - | 6.97 | 6.90 | - | - | 96 | - | - | - | |
| | 1.3 | - | 6.19 | - | 20 | - | 88 | 102 | 157 | 160 | |
| | 1.3 | 0.9 | 6.34 | 6.75 | 20 | 5 | 100 | - | 157 | - | |
| | 0.8 | 0.4 | 6.53 | - | 20 | 5 | 80 | - | - | - | |
| | 1.4 | 0.5 | 6.54 | - | 30 | 10 | 56 | 56 | - | - | |
| | X = | 0.97 | 0.46 | 6.83 | 7.19 | 23 | 7.86 | 103 | 107.2 | 164.7 | 165.7 |
| | ∇ = | 0.69 | 0.16 | 7.41 | 0.34 | 4.28 | 3.64 | 29.2 | 28.3 | 15.3 | 14.9 |
| | TIEMPO DE CONTACTO = 4.40 min. | 0.9 | 0.5 | 7.86 | 8.13 | - | - | 277 | 240 | 272 | 223 |
| | | 0.5 | 0.5 | 7.75 | 8.20 | - | - | 204 | 224 | 204 | 250 |
| 1.0 | | 0.9 | 8.03 | 8.18 | - | - | 255 | 260 | 257 | 214 | |
| 0.6 | | 0.2 | 7.22 | 7.96 | - | - | 352 | - | 319 | - | |
| 0.5 | | 0.2 | 8.17 | 8.13 | - | - | 279 | 107 | - | - | |
| 0.5 | | 0.4 | 8.91 | 9.22 | - | - | 309 | 286 | - | 221 | |
| 0.5 | | 0.3 | 8.01 | 8.02 | - | - | 240 | 235 | - | 217 | |
| 0.3 | | - | 8.65 | - | - | - | 161 | 171 | 113 | 141 | |
| AGUA PROCEDENTE DEL EFLUENTE DE ADSORCION EN CARBON ACTIVADO. | | X = | 0.6 | 0.43 | 8.07 | 8.26 | - | - | 259.6 | 217 | 233 |
| | ∇ = | 0.22 | 0.22 | 0.49 | 0.40 | - | - | 55.8 | 57.49 | 25.3 | 30.5 |

Nota: INF. - INFLUENTE
EFL. - EFLUENTE

CUADRO III. 25 RESULTADOS PRELIMINARES DE OZONACION CON LOS EFLUENTES DE FILTRACION Y ADSORCION.

| PARAMETRO / DIA. | INF. | EFL. | INF. | EFL. | INF. | EFL. | INF. | EFL. |
|------------------------|--------|-------|--------|------|---------|------|------|-------|
| pH (Unidades) | 8.11 | 7.84 | 7.36 | 7.50 | 7.68 | 7.76 | 7.40 | 7.68 |
| Color (U Pt-Co) | 25 | 15 | 18 | 5 | 20 | 13 | 18 | 13 |
| Turbiedad (UNT) | 1.5 | 3.5 | 1.2 | .8 | 2.2 | 2.4 | 2.0 | 1.5 |
| Alc. total (CaCO3) | 112 | 116 | 54 | 52 | 104 | 100 | 68 | 62 |
| Dureza total (CaCO3) | 168 | 148 | 149 | 150 | 143 | 146 | 163 | 156 |
| Bicarbonatos | 112 | 116 | 54 | 52 | 104 | 100 | 68 | 62 |
| Conduct. (umhos/cm) | 680 | 680 | 660 | 670 | 640 | 650 | 700 | 690 |
| Cloruros | 59 | 59 | 49 | 49 | 49 | 48 | 58 | 58 |
| SrO | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Sólidos totales | 576 | 562 | 502 | 510 | 554 | 518 | 550 | 570 |
| Sólidos totales fijos | 420 | 460 | 358 | 406 | 438 | 416 | 436 | 436 |
| Sólidos totales Vol. | 156 | 102 | 144 | 104 | 116 | 102 | 144 | 134 |
| Sól. disueltos totales | 570 | 552 | 496 | 501 | 549 | 513 | 573 | 565 |
| Sól. disueltos fijos | 420 | 456 | 358 | 397 | 433 | 411 | 436 | 436 |
| Sól. disueltos Vol. | 150 | 96 | 138 | 104 | 116 | 102 | 137 | 129 |
| Sól. Susp. totales | 6 | 18 | 6 | 9 | 5 | 5 | 7 | 5 |
| Sól. Susp. fijos | 4 | 4 | 4 | 9 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| Sól. Susp. Vol. | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 | 4 | 7 | 5 |
| Sól. Sed. (ml/l) | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 | .10 |
| N-NH3 | .2 | .2 | .2 | .2 | .2 | .2 | .2 | .2 |
| N-Total | .9 | 1.1 | .9 | .7 | 1.0 | .9 | .8 | .7 |
| Fósforo total | 1.9 | 2.7 | .8 | .8 | 2.2 | 2.3 | 1.7 | 1.6 |
| Fósforos totales | 5.9 | 8.3 | 2.5 | 2.4 | 6.7 | 7.1 | 5.2 | 4.9 |
| Calcio soluble | 31 | 24 | 30 | 30 | 29 | 29 | 29 | 31 |
| Magnesio soluble | 22 | 19 | 18 | 18 | 17 | 18 | 20 | 19 |
| Sodio soluble | 85 | 81 | 70 | 69 | 74 | 83 | 76 | 76 |
| Potasio soluble | 19 | 17 | 14 | 14 | 16 | 17 | 19 | 16 |
| Calcio total | 31 | 28 | 30 | 30 | 29 | 30 | 33 | 31 |
| Magnesio total | 22 | 19 | 18 | 18 | 17 | 18 | 21 | 19 |
| Sodio total | 85 | 81 | 70 | 69 | 74 | 83 | 76 | 76 |
| Potasio total | 19 | 18 | 14 | 14 | 16 | 17 | 16 | 16 |
| Hierro soluble | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Manganeso soluble | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | .03 | N.D. |
| Plomo soluble | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Cadmio soluble | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Mercurio soluble | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Arsénico soluble | N.D. | .0004 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Cromo soluble | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Hierro total | .07 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Manganeso total | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | .04 | N.D. |
| Plomo total | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | .02 |
| Cadmio total | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Mercurio total | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| Arsénico total | .0005 | .0004 | .0008 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | .0100 |
| Cromo total | .02 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | - |
| C. Tot. (MMP/100 ml) | 24,000 | 63 | 9,300 | 20 | 46,000 | 7 | - | - |
| Cl. Estándar (Col/ml) | 24,000 | 135 | 46,000 | 20 | 110,000 | 2190 | - | - |
| DB5 total | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| DQO total | 23 | 18 | 13 | 10 | 20 | 16 | 15 | 13 |
| Grasas y aceites | 3 | 3 | 3 | 3 | - | - | - | - |
| SAAM | 1.0 | .2 | .8 | .4 | .8 | .5 | 1.0 | .4 |

NOTAS: INF. = INFLUYENTE; EFL. = EFLUYENTE.
 Conc. en mg/l, excepto en donde se indiquen otras unidades.

CUADRO III. 26 RESULTADOS ANALITICOS DE OZONACION PARA EL EFLUYENTE DE FILTRACION.

| PARAMETROS/DIA | INF. EFL. | INF. EFL. | INF. EFL. | INF. EFL. | INF. EFL. | INF. EFL. | INF. EFL. | INF. EFL. |
|-----------------------------------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|
| pH | 7.85 8.82 | 7.75 7.9 | 8.83 8.32 | 7.21 7.8 | 8.17 8.45 | 8.91 8.9 | 8.01 8.3 | 8.05 8.8 |
| Turbiedad (UNT) | .9 0.8 | 0.5 0.3 | 1.8 0.7 | 0.6 0.7 | 0.6 0.3 | .5 0.3 | .5 0.3 | .3 0.2 |
| Alc. total (CaCO ₃) | 277 280 | 204 190 | 295 225 | 352 325 | 79 | 309 300 | 240 214 | 161 146 |
| Dureza total (CaCO ₃) | 272 248 | 204 190 | 257 220 | 319 300 | | | | 113 185 |
| Bicarbonatos | 277 240 | 204 224 | 255 260 | 352 | 79 | 102 182 | 240 235 | 161 171 |
| Cond. (hos/ca) | 813 706 | 770 728 | 738 749 | 963 | 482 889 | 813 781 | 728 786 | 842 653 |
| Cloruros | 54 51 | 52 51 | 52 52 | 55 | 55 47 | 89 54 | 53 58 | 54 52 |
| Sulfatos | 51 46 | 51 51 | | | 53 56 | | 52 51 | |
| Sólidos totales | 524 460 | 34 552 | 540 562 | 536 | 176 430 | 536 528 | 466 516 | 486 526 |
| Sólidos totales F | ---398 | | 430 464 | 442 | 290 344 | 488 416 | 396 430 | 388 406 |
| Sólidos totales Vol | 62 | | 110 98 | 94 | 78 86 | 48 104 | 70 86 | 93 |
| Sól. Disueltos T. | 324 455 | | 531 555 | 521 | | 536 520 | 466 516 | 481 520 |
| Sól. Disueltos Fijos | ---393 | | 430 464 | 427 | | 488 416 | 396 430 | 388 |
| Sól. Disueltos Vol. | 62 | | 101 91 | 94 | | 48 104 | 70 86 | 93 |
| Sól. Susp. Totales | 4 5 | | 9 7 | 15 | | 4 4 | 4 4 | 5 6 |
| Sól. Susp. fijos | 5 | | 4 4 | 15 | | 4 4 | 4 4 | 4 |
| Sól. Susp. Volát. | 4 | | 9 7 | 4 | | 4 4 | 4 4 | 5 |
| Sól. Sed. (al/l) | .10 .10 | .10 .10 | .10 .10 | .10 | .10 .10 | .10 .10 | .10 .10 | .10 .10 |
| N-NO ₃ | 2.1 .7 | 5.6 4.9 | 8.1 7.8 | 9.5 | 9.8 7.5 | 9.9 8.4 | 8.4 3.7 | 5.5 4.3 |
| N-Total | 2.8 1.1 | 5.2 5.4 | 8.7 8.5 | 10.2 | 10.7 8.2 | 10.6 9.3 | 9.1 4.2 | 5.2 5.0 |
| N-NO ₂ | 1.1 .6 | 4.1 6 | 9 1.4 | 5.2 | 1.8 1.5 | 1.1 2.1 | 6 1.5 | 9.3 4.6 |
| Fósforo total | .8 .7 | 4 .7 | .3 .2 | .3 | .1 .1 | .5 .4 | .6 .6 | .3 .4 |
| Fosfatos totales | 2.6 2.1 | 1.2 2.1 | .9 .6 | .9 | .2 .2 | 1.5 1.2 | 1.8 1.8 | 9 1.2 |
| Ortofosfatos | .9 .8 | | | | | | | 2.1 9 1.2 |
| N-Orgánico | .7 .5 | .6 .5 | | | .9 .7 | .7 | .7 | .5 7 .7 |
| N-NO ₂ | .2 .05 | .2 .05 | .3 .05 | .1 | .4 .05 | .6 .05 | .6 .05 | 1.3 .05 |
| Calcio total | 71 51 | 52 68 | 76 60 | 82 | 28 30 | 30 63 | 46 54 | 32 39 |
| Magnesio total | 23 23 | 18 20 | 16 16 | 82 | 8 9 | 27 16 | 13 20 | 8 11 |
| Sodio total | 77 70 | 20 80 | 94 83 | 100 | 146 119 | 75 88 | 81 77 | 80 79 |
| Potasio total | 13 11 | 14 14 | 15 15 | 17 | 30 17 | 26 17 | 15 11 | 14 13 |
| Hierro total | .05 .05 | .05 .05 | .05 .05 | .05 | .05 .26 | .05 .05 | .05 .05 | .05 .05 |
| Manganeso total | .018 .08 | .018 .018 | .018 .01 | .018 | .018 .055 | .018 .020 | .018 .020 | .018 .020 |
| Plomo total | .05 .05 | .05 .05 | .05 .05 | .05 | .05 .05 | .05 .09 | .05 .05 | .10 .05 |
| Cadmio total | .008 .008 | .008 .008 | .008 .008 | .008 | .008 .008 | .008 .008 | .008 .008 | .008 .008 |
| Cromo total | .008 .008 | .008 .008 | .008 .008 | .008 | .008 .008 | .008 .008 | .008 .008 | .008 .008 |
| C. Pecesales (mg/l) | 16,800 7 | | 16,800 7 | 9,300 | 110,000 230 | 240,000 43 | 175,000 | 4,300 |
| C.TOTALES al | 16,800 15 | | 16,800 119,300 | | 110,000 230 | 240,000 43 | 175,000 | 4,300 0 |
| OD Total | 19 | 8 10 | 8 13 | 12 13 | 32 21 | 8 6 | 16 9 | 39 15 |
| Grasas y aceites | 10 12 | 28 34 | 27 24 | 10 | 11 10 | 8 6 | 5 5 | 3 4 |
| SAAR | .2 .0 | .3 .1 | .5 .1 | .1 | .9 .1 | .3 .1 | .4 .0 | .5 .1 |

Notas: INF. - INFLUENTE; EFL. - EFLUENTE
CONCENTRACION EN MG/L., EXCEPTO DONDE SE INDIQUEN OTRAS UNIDADES.

CUADRO III. 27 RESULTADOS ANALITICOS DE OZONACION PARA EL EFLUENTE DE ADSORCION

CUADRO III.28 EFICIENCIAS PROMEDIO DE OZONACION para los EFLUENTES DE FILTRACION Y ADSORCION.

207

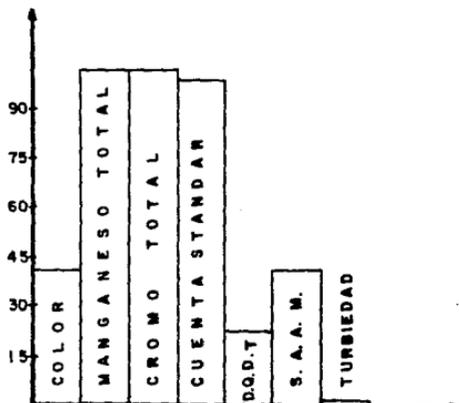
| | INFL. FILTRAC. | EFL. OZONO | η (%) | INFL. ADSORC. | EFL. OZONO | η (%) |
|-------------------------------------|-------------------|---------------|------------|------------------|---------------|------------|
| PH | 7.64 | 7.67 | 0.03 | 8.07 | 8.26 | 0.19 |
| ODOR | 20 | 11.90 | 42.50 | - | - | - |
| TURBIDIDAD | 1.7 | 2.05 | -20.99 | 0.60 | 0.4 | 33.33 |
| ALCAL. TOTAL | 85 | 82 | 3.53 | 235 | 217 | 7.66 |
| SURESA TOTAL | 156 | 150 | 3.85 | 233 | 211 | 9.44 |
| CONDUCTIVIDAD | 670 | 672 | - 0.30 | 734 | 609 | 6.13 |
| CLORURO | 49 | 48 | 2.04 | 54 | 52 | 3.70 |
| SORO | 0.23 | 0.21 | 8.69 | - | - | - |
| SULFATOS | - | - | - | 52 | 51 | 1.92 |
| SOLIDOS SEDIIMENTABLES | 0.10 | 0.10 | 0.0 | 0.10 | 0.10 | 0.0 |
| SOLIDOS TOTALES | 553 | 413 | 25.32 | 512 | 509 | 0.50 |
| SOLIDOS TOTALES FIJOS | 413 | 429 | - 3.87 | 407 | 410 | -0.74 |
| SOLIDOS TOTALES VOLATILES | 140 | 88 | 37.14 | 190 | 93 | 7.00 |
| SOLIDOS DISUELTOS TOTALES | 547 | 533 | 2.56 | 527 | 513 | 2.66 |
| SOLIDOS DISUELTOS FIJOS | 412 | 425 | -3.15 | 426 | 426 | 0.0 |
| SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES | 135 | 108 | 20.00 | 101 | 86 | 14.85 |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | 6 | 7 | -0.17 | 7 | 5 | 28.57 |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS | 4 | 5 | -25.0 | 6 | 4 | 33.33 |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES | 6 | 5 | 0.17 | 5 | 5 | 0.0 |
| N- NH_3 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 7.4 | 5.3 | 28.30 |
| NITROGENO TOTAL | 0.9 | 0.85 | 5.55 | 8.1 | 6.0 | 25.92 |
| NITROGENO N- NO_3 NITRATOS | - | - | - | 1.9 | 1.9 | 0.0 |
| FOSFORO TOTAL | 1.7 | 1.85 | -0.82 | 0.4 | 0.4 | 0.0 |
| FOSFATOS TOTALES | 5.1 | 5.67 | -11.10 | 1.2 | 1.3 | -0.33 |
| ORTOFOSFATOS | - | - | - | 0.9 | 1.4 | -55.55 |
| N-ORGANICO | - | - | - | 0.7 | 0.6 | 14.28 |
| N- NO_2 | - | - | - | 0.5 | 0.85 | 90.00 |
| CALCIO SOLUBLE | 30 | 29 | 3.33 | - | - | - |
| MAGNESIO SOLUBLE | 19 | 18 | 5.26 | - | - | - |
| SODIO SOLUBLE | 76 | 77 | 1.31 | - | - | - |
| POTASIO SOLUBLE | 17 | 16 | 5.88 | - | - | - |
| CALCIO TOTAL | 31 | 30 | 3.22 | 53 | 52 | 1.88 |
| MAGNESIO TOTAL | 17 | 18 | -5.00 | 17 | 16 | 5.88 |
| SODIO TOTAL | 76 | 77 | 1.31 | 83 | 85 | -2.41 |
| POTASIO TOTAL | 16 | 16 | 0.0 | 18 | 14 | 22.22 |
| PIERRO SOLUBLE | - | N.D | N.D | - | - | - |
| MANGANESO SOLUBLE | 0.03 | N.D | 100 | - | - | - |
| PLOMO SOLUBLE | - | N.D | - | - | - | - |
| CADMIO SOLUBLE | - | N.D | - | - | - | - |
| MERCURIO SOLUBLE | - | N.D | - | - | - | - |
| ARSENICO SOLUBLE | - | N.D | - | - | - | - |
| CRONO SOLUBLE | - | N.D | - | - | - | - |
| PIERRO TOTAL | 0.09 | 0.1 | -11.11 | 0.05 | 0.00 | -60.0 |
| MANGANESO TOTAL | 0.04 | N.D | 100 | 0.010 | 0.024 | -33.33 |
| PLOMO TOTAL | - | 0.02 | - | 0.06 | 0.06 | 0.0 |
| CADMIO TOTAL | - | N.D | - | 0.008 | 0.008 | 0.0 |
| MERCURIO TOTAL | - | N.D | - | - | - | - |
| ARSENICO TOTAL | 0.0007 | 0.0053 | -6.57 | - | - | - |
| CRONO TOTAL | 0.02 | N.D | 100 | 0.008 | 0.008 | 0.0 |
| COLIFORMES TOTALES | - | 35 | - | 75800 | 20 | 99.97 |
| COLIFORMES FECALES | 26433 | - | - | 103514 | 18 | 99.98 |
| CTA. ESTANDAR | 60000 | 778 | 98.70 | - | - | - |
| D.B.D. ₅ TOTAL | 2 | 3 | -50.0 | - | - | - |
| D.O.O. TOTAL | 18 | 14 | 22.22 | 16 | 11 | 31.25 |
| GRASAS Y ACEITES | 3 | 3 | 0 | 13 | 14 | -7.69 |
| S. A. A. M. | 0.9 | 0.37 | 41.11 | 0.4 | 0.10 | 75.00 |

metales totales como es el fierro y manganeso que sufren mayor oxidación. Ya en metales como plomo, mercurio, arsénico y cromo no hay remoción para las dos series de pruebas.

Por último se observan remociones de bacteriológicos del 99% en promedio para las dos pruebas comprobando su acción bactericida en especial pues se tienen concentraciones del orden de 26,000 a 103,000 colonias. Aunado a esto se entreliga la remoción de materia orgánica medida como D.Q.O. soluble pues la remoción es del 22 y 31% para el agua procedente de filtración y adsorción respectivamente. En las gráficas III.23.A, B, y C se esquematizan las remociones más importantes para el proceso de ozonación.

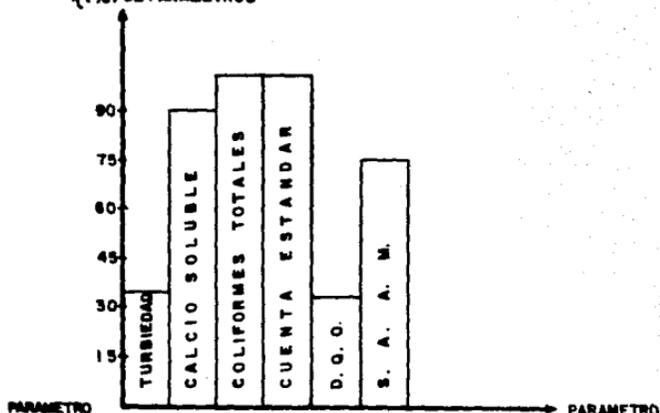
GRAFICA III.23 EFICIENCIAS DE REMOCION EN OZONACION

η (%) DE PARAMETROS



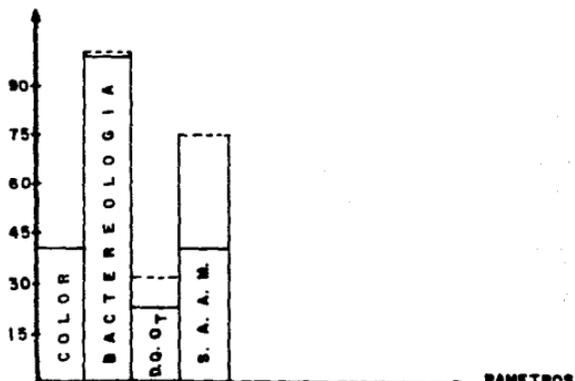
(a) EFICIENCIAS CON AGUAS DE FILTRACION

η (%) DE PARAMETROS



(b) EFICIENCIAS CON AGUAS DE ADSORCION

η (%) DE PARAMETROS



(c) EFICIENCIAS CON AGUAS DE (FILTRACION Y ADSORCION).

----- EFIC. DE ADSORCION
 _____ EFIC. DE FILTRACION

111.8 Osmosis Inversa

La ósmosis inversa se aplica en sistemas de baja presión para potabilizar aguas contaminadas. Como pretratamiento antes de intercambio iónico, para aguas salobres, de mar en barcos, en plataformas marinas, en aguas para calderas y procesos. Ultimamente se está dando auge en las aguas residuales ya sean domésticas o industriales. Utilizándose como pulimiento del agua previamente tratada con procesos convencionales, controlando el contenido de sales disueltas, trazas orgánicas, virus, color, turbiedad, metales, etc.

Su desventaja es el alto costo del equipo y de operación, pero es mejor en comparación con otros procesos como la electrodiálisis y el intercambio iónico. Pues la ósmosis inversa remueve del 85 al 99% de contaminantes.

En la ósmosis inversa se aplica presión para extraerle agua a una solución concentrada a través de una membrana semipermeable al ir aplicando presión hasta llegar el flujo a ser cero denominándose presión osmótica, el agua de alimentación se divide en dos flujos; producto (agua purificada) con baja concentración de sales y el rechazo con alta concentración de sales.

En la ósmosis inversa se conoce como recuperación de agua a la relación que hay entre el flujo producto y el flujo de alimentación en porcentaje.

$$R = \frac{q}{Q}$$

R = % de recirculación

q = Caudal producido (L/min)

Q = Caudal de Alimentación (L/min.)

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{Flujo Producto}}{\text{Flujo de Alimentación}} \times 100$$

Es decir: un porcentaje del agua alimentada pasa a través de las membranas ya sin contaminantes (agua producto) por ejemplo 10% y el otro porcentaje 90% se elimina con los contaminantes (concentrado ó salmuera), así sucesivamente según el número de membranas se incrementará el agua producto ésto se describe con la ecuación anterior.

Por otro lado el fenómeno de transporte de sales a través de una membrana semipermeable se describe con la ecuación siguiente:

$$q = K_m (\Delta p - A) \dots (2); \quad q = \text{Flujo de agua (l/min.)}$$

K_m = Coef. de permeabilidad de la membrana en función del espesor tipo y composición

Δp = Diferencia de presión aplicada

A = Diferencia de presión osmótica en las soluciones de los lados de las membranas

El paso de sales a través de las membranas nos dice que al aplicar mayor presión se incrementa el flujo de agua producto (ecuación (3)), pero no el de sales siendo de mejor calidad el agua producto.

$$S = K_s \Delta C_i \dots (3) \quad K_s = \text{cte. de permeabilidad de las sales}$$

ΔC_i = Diferencia de concentración de la sal en ambos lados de la membrana

S = Flujo de sales

Las membranas actúan como una barrera al flujo de moléculas o iones, éstas membranas se constituyen por polímeros que forman áreas amorfas y áreas cristalinas. Los espesores de las membranas varían, pero algunas tienen espesores de 100 micrones (0.10 mm). Siendo del tipo asimétricas como las de acetato de celulosa; poliamidas aromáticas a base de fibras huecas; etc.

La alteración de las membranas al estar expuestas a la alta presión produce la compactación de éstas, por lo que disminuirá el flujo de agua producto al paso del tiempo. Otro factor que daña a las membranas es la acumulación de sales rechazadas, formando una capa estable que se llama efecto de polarización de la concentración denominada como la relación de la concentración de sales en la superficie de las membranas y en el seno de la solución incrementándose la presión osmótica y reduciendo la tasa de producción de permeado.

Las membranas al paso del tiempo pierden capacidad de producción por el efecto de la hidrólisis del acetato de celulosa. Para reducir éste efecto se debe de trabajar el sistema a pH de 5 unidades y no más de 5.5 (Ref. 19). Como se muestra en la siguiente relación:

| <u>pH de Operación</u> (Adim.) | <u>Vida Util de la</u> <u>Membrana (hr.)</u> |
|-----------------------------------|---|
| 1.5 | 80 |
| 3.5 | 8 000 |
| 5.5 | 80 000 |
| 7.5 | 8 000 |
| 9.5 | 80 |

Para ajustar el pH al requerido se utiliza ácido sulfurico ó ácido muriático (clorhídrico) grado industrial.

Otro factor importante es el depósito excesivo de partículas de sulfato de calcio, ya que este se incrusta en las membranas ocasionando taponamiento. Para evitar ésto se inyecta hexameta-fosfato de sodio para mantener en suspensión dichas partículas.

Al inyectar ácido sulfúrico al agua se forma ácido carbónico o ácido sulfhídrico. Este se removerá mediante aereación del agua y además se estabilizará el pH del agua de 5.5 a 6.5.

Al pasar el agua por ósmosis inversa esta será pura; dependiendo de su utilidad final se diluirá con agua que no ha pasado por éste proceso realizando un balance de masas para obtener las concentraciones requeridas de la composición del agua.

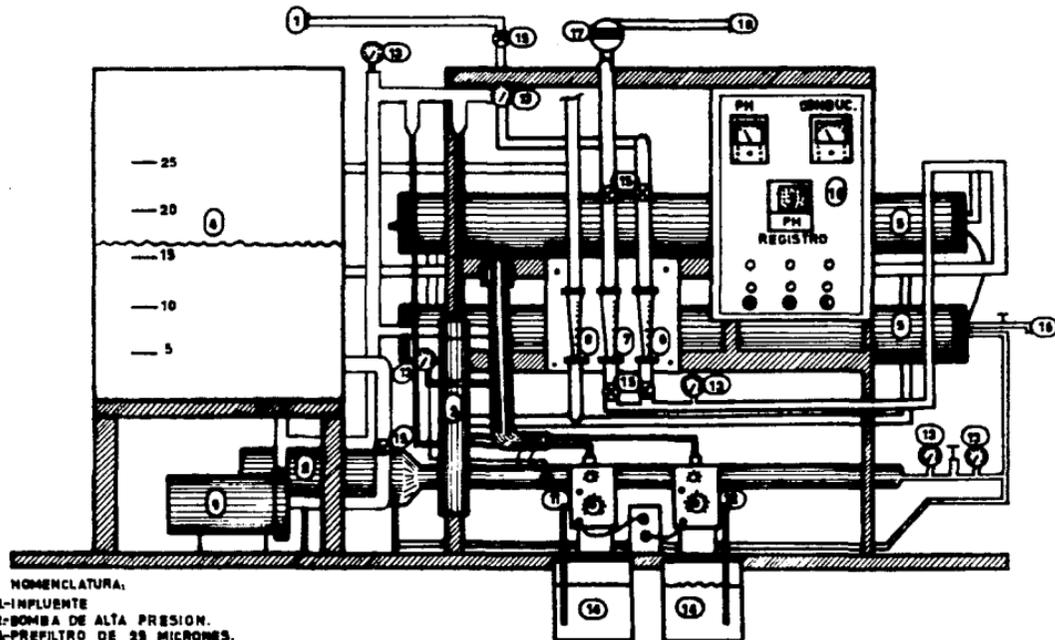
Bases de Diseño

Se utilizó un equipo para producir 0.2 l/seg. (12 l/mín.)(Figura 15) con membranas de acetato de celulosa (utilizadas últimamente para la remoción de salmuera y aguas residuales)(Ref. 20). El equipo consta de 4 elementos pudiendose experimentar el paso de cuatro tratamientos con diferentes porcentajes de recuperación al variar la recirculación y el rechazo. (Fig. 16).

La unidad cuenta con una bomba de alta presión de 40 psi; una bomba para el lavado de las membranas de 5 h.p., una serie de manómetros para controlar y regular las presiones así también se tienen tres rotámetros para la medición del permeado, concentrado y la recirculación. Además el equipo cuenta con un sensor para medir el pH y la conductividad eléctrica.

El sensor de pH está conectado al sistema automático, de tal manera que si se incrementa el pH el sistema se para. Cabe mencionar que si le falta agua de alimentación o presión de entrada el sistema se para por succión de baja presión.

UNIDAD DE OSMOSIS INVERSA



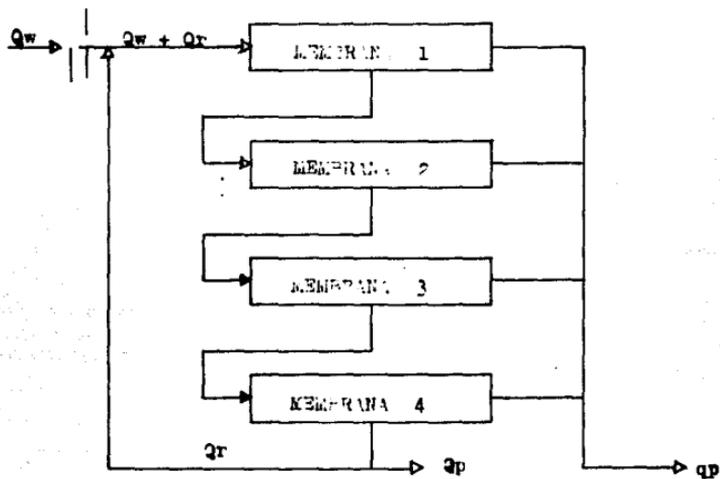
NOMENCLATURA:

- 1-INFLUENTE
- 2-BOMBA DE ALTA PRESION.
- 3-PREFILTRO DE 25 MICRONES.
- 4-TANQUE DE FORMALDEHIDO.
- 5-MEMBRANAS DE 4".
- 6-ROTAMETRO RECIRCULACION.
- 7-ROTAMETRO PERMEADO.
- 8-CONCENTRADO ROTAMETRO.
- 9-BOMBA DE LAVADO DE MEMBRANAS.
- 10-TABLERO DE CONTROL.
- 11-BOMBA DOSIFICADORA DE ACIDIFICANTE.
- 12-BOMBA DOSIFICADORA DE ANTI-INCRUSTANTE.

- 13-MANOMETROS.
- 14-TANQUES DE REACTIVOS.
- 15-VALVULAS.
- 16-EFLUENTE DE MEMBRANA.
- 17-CONTADOR GAL/DIA.
- 18-EFLUENTE.

ESCALA

FIGURA 15



DE DONDE: Q_w = Caudal de Agua de Entrada
 Q_r = Caudal de Agua de Recirculación
 Q_p = Caudal de Recirculación (concentrada)
 Q_p = Caudal Producto (permeado)

Figura III.16 ESQUEMA DE TRATAMIENTO DE OSMOSIS INVERSA

La unidad cuenta con un filtro cartucho que funciona como prefiltro para eliminar las impurezas del agua y que no dañen las membranas. A la salida del equipo se tiene un totalizador para cuantificar el agua tratada.

La medición de caudales se hace por medio de rotámetros:

Permeado: Agua producto que pasa a través de las membranas

Concentrado: Agua que rechazan las membranas. Esta se manda al drenaje

Recirculación: Agua que se recircula por el sistema que depende del % de recirculación requerido

Por último se tiene una columna de 3.60 m de altura empacada con material sintético modular, un extractor para eliminar el ácido sulfhídrico y estabilizar el pH; a ésta operación se le conoce como descarbonatación.

En el cuadro III.29 se describen los parámetros de operación de ósmosis inversa con y sin recirculación. En cuanto a sitio de medición, caudal, duración, agua producto, presiones manométricas.

Programa de Pruebas

El programa de pruebas consistió básicamente en variar el % de recirculación (0, 28, 45 y 77) cuya finalidad es mejorar las remociones de contaminantes e incrementar el agua producto (permeado) y reducir el agua contaminada (concentrado).

En los cuadros III.29 A y B se resumen los resultados de operación promedio por día (caudal, agua producto, presiones y recirculación) y las concentraciones promedio por día de los parámetros de interés (temperatura, pH, conductividad, color, alcalinidad y dureza total); ya en el cuadro III.30 se resumen las eficiencias de remoción agrupando por porcentajes de recirculación para el caudal de entrada, producto (permeado) y contaminado (concentrado) con sus incrementos de presión y el agua producida a diferentes tiempos de operación.

En la gráfica III.24 se aprecian mejor estos resultados:

Al incrementar la recirculación del caudal hasta en un 77% el agua producto no sufre variación significativa con respecto a un 0% de recirculación, pero si se incrementa la presión de trabajo del equipo de 13.5 a 48.9 kg/cm² ocasionando mayor consumo de energía, menos durabilidad de las membranas debido a una mayor recirculación de contaminantes a la entrada del sistema al recircular más caudal es decir las concentraciones de entrada

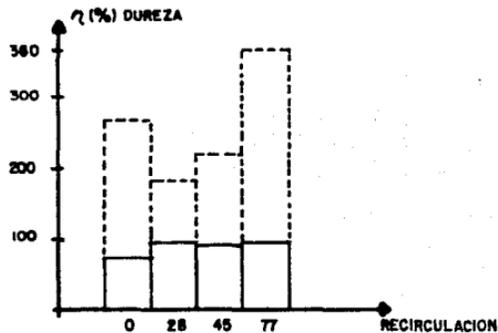
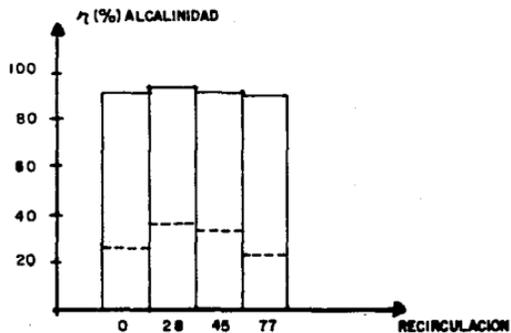
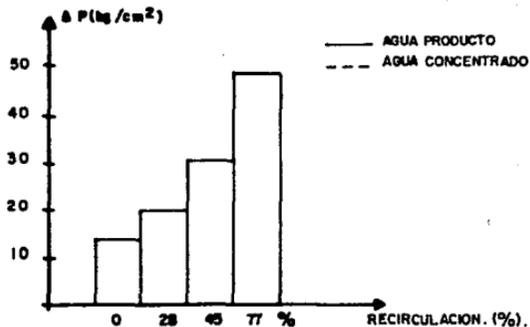
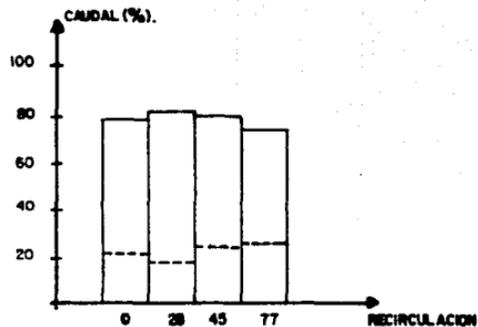
| FECHA | RECIRCULACION % | SITIO DE MUESTREO | CAUDAL l/min. | DURACION hr. | AGUA PRODUCTO l. | P4 Kg/cm ² | P5 Kg/cm ² | P4- P5 Kg/cm ² | TEMP. °C | PH | CONDUC. TIVIDAD μ S/cm | COLOR Pt/Co. | TURBIDEZ U.T.N. | ALCALINIDAD TOTAL | DUREZA TOTAL |
|--------|-----------------|-------------------|---------------|--------------|------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------|------|----------------------------|--------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | | | | | | | | | | | mg/l. (Ca Cog). | mg/l. (Ca Cog). |
| 15-DIC | 78.0 | a | 13.75 | 9.50 | 9817.5 | | | | 16 | 7.37 | 590 | 18 | 0.7 | 170 | 203 |
| | | P | 14.5 | 9.50 | 7395.0 | 417.5 | 362.5 | 55 | 57.5 | 5.35 | 20.25 | 0 | 0.17 | 18 | 26 |
| | | C | 4.75 | 9.50 | 2422.5 | | | | 18 | 6.09 | 2000 | 65 | 0.38 | 92 | 798 |
| | | r | 15 | 9.50 | 7650 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 13-DIC | 73.0 | E | 19.45 | 13.0 | 15171 | | | | 12 | 6.99 | 645.5 | 40 | 0.57 | 165 | 188 |
| | | P | 14.65 | 13.0 | 11427 | 417 | 363.5 | 53.5 | 59.7 | 5.41 | 22 | 0 | 0.28 | 13 | 1.3 |
| | | C | 4.3 | 13.0 | 3744 | | | | 15 | 5.86 | 1953 | 80 | 0.56 | 196 | 701 |
| | | r | 14.55 | 13.0 | 11349 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 22-DIC | 75.0 | E | 18.84 | 2.70 | 3052 | | | | 12 | 7.33 | 640 | 45 | 0.50 | 182 | 229 |
| | | P | 14.40 | 2.70 | 2332.8 | 351 | 325.4 | 25.6 | 65.8 | 4.26 | 18.8 | 0 | 0.17 | 19 | 2 |
| | | C | 4.34 | 2.70 | 713.2 | | | | 13 | 6.27 | 2065 | 105 | 0.65 | 121 | 1700 |
| | | r | 14.70 | 2.70 | 39.7 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 21-DIC | 77.0 | E | 14.31 | 10.40 | 9241.4 | | | | 11 | 7.84 | 706 | 48 | 0.55 | 167 | 206 |
| | | P | 10.81 | 10.40 | 6745.4 | 323.75 | 262.5 | 61.25 | 67.37 | 3.65 | 33.37 | 0 | 0.22 | 17 | 12 |
| | | C | 4.0 | 10.40 | 2496 | | | | 16 | 6.30 | 1940 | 99 | 0.68 | 122 | 595 |
| | | r | 11.5 | 10.40 | 7176 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 22-DIC | 0.0 | E | 15.91 | - | - | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| | | P | 11.72 | - | - | 223.07 | 213.0 | 10.07 | 63.25 | 4.25 | 27.25 | 0 | - | - | - |
| | | C | 4.19 | - | - | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| | | r | 0 | - | - | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 23-DIC | 43.0 | E | 21.75 | 9.70 | 1258.5 | | | | 23 | 7.50 | 766 | 30 | 0.66 | 191 | 196 |
| | | P | 17.62 | 9.70 | 1025.8 | 464.37 | 428.75 | 35.62 | 66.25 | 5.51 | 21.62 | 0 | 0.10 | 17 | 10 |
| | | C | 4.0 | 9.70 | 2328 | | | | 24 | 6.25 | 3697 | 105 | 0.65 | 147 | 750 |
| | | r | 9.37 | 9.70 | 5453.4 | | | | - | - | - | - | - | - | - |

Cuadro III. 29.A. RESULTADOS DE LA OPERACION DE OSMOSIS INVERSA (Valores Medios).

| FECHA | RECIRCULACION % | SITIO DE MUESTREO | CAUDAL l/min. | DURAC. hr. | AGUA PRODUCTO l. | P4 kg/cm ² | P5 kg/cm ² | P4 - P5 kg/cm ² | TEMP. °F | PM | CONDUCTIVIDAD (30°C) µmhos/cm | COLOR Pt/Co | TURBIDEZ UTN | ALCAL. TOTAL | DUREZA TOTAL |
|--------|-----------------|-------------------|---------------|------------|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------|------|-------------------------------|-------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | | mg/l. (CaCO ₃) | mg/l. (CaCO ₃) |
| 24-DIC | | E | 21.25 | 5.5 | 7012.5 | | | | 18 | 7.25 | 715 | 30 | 0.46 | 118 | 220 |
| | | P | 17.25 | 5.5 | 5692.5 | 471.25 | 451.87 | 19.4 | 59.5 | 5.57 | 21.75 | 0 | 0.15 | 15 | 10 |
| | | C | 4.0 | 5.5 | 1320 | | | | 20 | 6.39 | 3158 | 135 | 0.65 | 117 | 520 |
| 26-DIC | 28.0 | r | 6.0 | 5.5 | 1980 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| | | E | 18.75 | 4.0 | 4500 | | | | 17 | 7.38 | 665 | 45 | 0.60 | 264 | 280 |
| | | P | 14.87 | 4.0 | 3568.8 | 457.5 | 428.75 | 28.75 | 56.5 | 5.50 | 17.25 | 0 | 0.20 | 22 | 10 |
| 27-DIC | 18.0 | C | 5.37 | 4.0 | 1408.8 | | | | 19 | 6.34 | 2850 | 105 | 0.62 | 158 | 760 |
| | | r | 3.0 | 4.0 | 2160.0 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| | | E | 22.41 | 7.30 | 3815.6 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 28-DIC | 0.0 | P | 17.71 | 7.30 | 7757.0 | 477.5 | 445 | 32.5 | 62.67 | 4.65 | 24.08 | - | - | - | - |
| | | C | 5.60 | 7.30 | 2452.8 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| | | r | 0 | 7.30 | 0 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 29-DIC | 0.0 | E | 21.12 | 9.80 | 12418.6 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| | | P | 16.59 | 9.80 | 3755 | 497.3 | 437.06 | 10.29 | 62.12 | 5.40 | 13 | - | - | - | - |
| | | C | 4.54 | 9.80 | 2669.5 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 30-DIC | 0.0 | r | 0 | 9.80 | 0 | | | | - | - | - | - | - | - | |
| | | E | 21.47 | 14.0 | 18034.8 | | | | 19 | 7.55 | 804 | 45 | 0.75 | 130 | - |
| | | P | 16.97 | 14.0 | 14254.8 | 492.3 | 430.9 | 11.5 | 53.70 | 5.60 | 18.93 | 0 | 0.19 | 11 | - |
| 31-DIC | 0.0 | C | 4.5 | 14.0 | 3780 | | | | 25 | 6.19 | 3051 | 97 | 0.64 | 164 | - |
| | | r | 0 | 14.0 | 0 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| | | E | 19.63 | 13.80 | 16253.6 | | | | 21 | 7.78 | 662 | 39 | 1.0 | 136 | - |
| 1-DIC | 0.0 | P | 15.14 | 13.80 | 12535.9 | 493.45 | 486.36 | 7.1 | 63.00 | 4.52 | 17.1 | 5 | 0.27 | 17 | - |
| | | C | 4.5 | 13.80 | 3726.0 | | | | 221 | 6.0 | 2440 | 93 | 0.60 | 116 | - |
| | | r | 0 | 13.80 | 0 | | | | - | - | - | - | - | - | - |
| 2-DIC | 0.0 | E | 20.17 | 5.30 | 6414.1 | | | | 15 | 7.44 | 502 | 49 | 0.50 | 180 | 256 |
| | | P | 15.67 | 5.30 | 4983.1 | 435.0 | 485.0 | 10.0 | 58.00 | 5.43 | 17.7 | 7.5 | 0.30 | 22 | 56 |
| | | C | 4.50 | 5.30 | 1431 | | | | 16 | 6.6 | 1700 | 127 | 0.50 | 126 | 936 |
| | | r | 0 | 5.30 | 0 | | | | - | - | - | - | - | - | |

| SITIO | CAUDAL | AGUA | CAUDAL | AP | TEMP. | PH. | | CONDUCTIVIDAD | | COLOR | | TURBIDIDAD | | ALCALINIDAD | | DUREZA | | TOT. |
|-------|--------|----------------------------|--------|--------------------|-------|-----|------|---------------|-------|-------|------|------------|------|-------------|------|--------|------|------|
| | L/min. | PRODUCTO m ³ | % | Kg/cm ² | °C | C | Δ(%) | C | Δ(%) | C | Δ(%) | C | Δ(%) | TOTAL C | Δ(%) | C | Δ(%) | |
| E | 17.1 | 17.1 | - | - | 18.3 | 7.6 | - | 656 | - | 44.3 | - | 0.75 | - | 185 | - | 256 | - | |
| P | 18.0 | 9.4 | 77.7 | 13.6 | 16.3 | 5.0 | 2.6 | 20.5 | 97 | 6.2 | 44 | 0.25 | 67 | 15 | 92 | 56 | 78 | |
| C | 1.0 | 2.0 | 22.1 | - | 21.0 | 6.2 | 1.3 | 2397 | 265 | 105.7 | 139 | 0.58 | 23 | 135 | 27 | 936 | 266 | |
| r | 3.0 | - | 0.0 | - | | | | | | | | | | | | | | |
| E | 21.2 | 7.0 | - | - | 18 | 7.2 | - | 715 | - | 30 | - | 0.46 | - | 218 | - | 220 | - | |
| P | 17.2 | 5.7 | 31.7 | 19.4 | 15.3 | 5.6 | 1.6 | 21.8 | 97 | 0 | 100 | 0.15 | 67 | 15 | 93 | 10 | 95 | |
| C | 4.0 | 1.3 | 18.9 | - | 20 | 6.4 | 0.8 | 3158 | 342 | 135 | 350 | 0.65 | 41 | 137 | 37 | 620 | 182 | |
| r | 6.0 | 2.0 | 28.0 | - | | | | | | | | | | | | | | |
| E | 20.2 | 3.5 | - | - | 20 | 7.6 | - | 715.5 | - | 37.5 | - | 0.63 | - | 229 | - | 228 | - | |
| P | 16.7 | 6.8 | 80.2 | 32.2 | 16.3 | 5.5 | 2.1 | 19.4 | 97 | 0.0 | 100 | 0.15 | 75 | 19.5 | 91 | 13 | 94 | |
| C | 1.9 | 2.1 | 24.3 | - | 21.5 | 6.3 | 1.3 | 3273 | 457 | 105 | 180 | 0.64 | ? | 152 | 34 | 755 | 217 | |
| r | 9.2 | 3.9 | 45.0 | - | | | | | | | | | | | | | | |
| E | 18.09 | 9.4 | - | - | 13 | 7.4 | - | 645 | - | 37.8 | - | 0.57 | - | 171.1 | - | 206 | - | |
| P | 13.59 | 7.1 | 75.1 | 43.9 | 16.4 | 4.7 | 2.7 | 23.7 | 96 | 0.0 | 100 | 0.21 | 63 | 16.2 | 90 | 10.3 | 95 | |
| C | 4.50 | 2.3 | - | - | 15.5 | 6.1 | 1.2 | 1983 | 208.0 | 87.2 | 131 | 0.57 | 2.0 | 133 | 23 | 948 | 260 | |
| r | 11.44 | 5.3 | 77.0 | - | | | | | | | | | | | | | | |

Cuadro III.30 RESUMEN EFICIENCIAS MEDIAS DE REMOCION DE OSMOSIS INVERSA.



Gráfica III. 24 REMOCION DE PARAMETROS EN OSMOSIS INVERSA.

serían las del agua cruda más las del agua recirculada que contiene la parte proporcional del concentrado.

Al pasar el agua por el sistema se reduce ligeramente la temperatura y el pH se reduce en 2.6 unidades como máximo a un pH de 4.0 a 5.5 para proteger las membranas de la hidrólisis (gráfica III.25), para la alcalinidad la remoción se mantiene en el 90% al variar la recirculación y el % en el concentrado se mantiene cte. En la dureza al incrementar la recirculación de 0 a 77% únicamente hay diferencia del 21% en cuanto a remoción, incrementándose el concentrado del 266 al 360% (gráfica III.24).

En la gráfica III.25 se observa la variación en turbiedad y conductividad manteniéndose prácticamente cte. 70 y 97% respectivamente. Finalmente en el color si se tiene variación de 0 a 23% de remoción, pues la remoción pasa del 44 al 100%. (Cuadro III.30).

De los comentarios anteriores se concluye que no es benéfico el recircular agua al sistema, ya que no se tienen grandes ventajas, esto puede servir tal vez en equipos de más capacidad o en tipos de membranas que requieran mayor diferencia de presión.

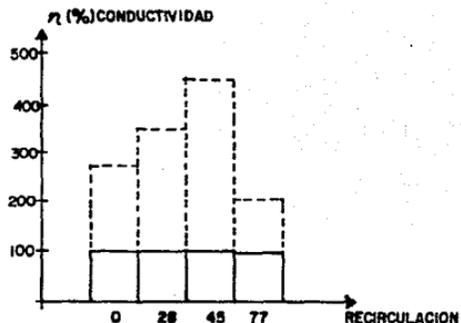
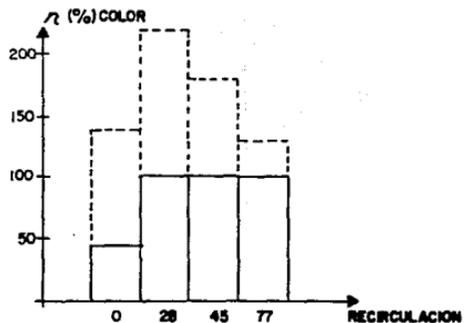
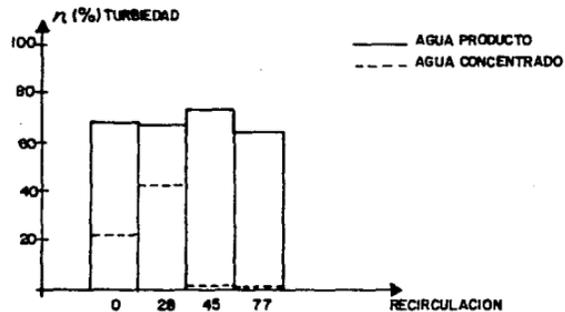
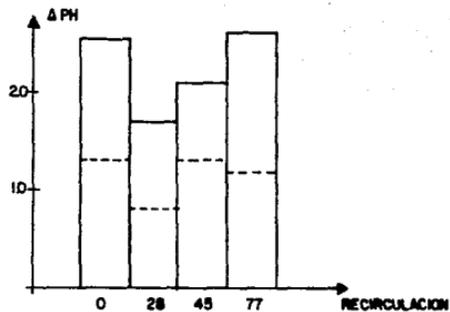


Gráfico III. 25 REMOCION DE PARAMETROS EN OSMOSIS INVERSA .

III.9 Cloración

El cloro se ha aplicado ampliamente tanto en el tratamiento de agua residual como de agua potable, ya que puede ejercer acción bactericida y oxidante, lo cual permite remover contaminantes biológicos, orgánicos e inorgánicos.

De las muy diferentes aplicaciones el cloro continúa siendo la más importante la desinfección, si bien en la actualidad existen serias dudas sobre la conveniencia de la cloración de los efluentes en general.

En el cuadro III.31 se presentan las diversas aplicaciones de la cloración y dosis recomendadas de acuerdo al uso destinado. Para el caso particular de la desinfección, el cloro es quizá el más utilizado en todo el mundo, ya que reúne la mayoría de las características de un desinfectante ideal.

| CARACTERISTICAS | DESINFECTANTE IDEAL | C L O R O | HIPOCLORITO DE SODIO | HIPOCLORITO DE CALCIO | BIOXIDO DE CLORO | O Z O N O |
|---|--|---|----------------------------|----------------------------|--|--|
| TOXICIDAD HACIA LOS MICROORGANISMOS | DEBERA SER ALTAMENTE TOXICO A ALTAS DILU-CIONES | ALTA | ALTA | ALTA | ALTA | ALTA |
| SOUBILIDAD | DEBERA SER SOLUBLE EN AGUA O EN LOS TEJIDOS DE LAS CELULAS | LIGERA-MENTE | ALTA | ALTA | ALTA | ALTA |
| ESTABILIDAD | LA PERDIDA DE ACCION GERMICIDA A LO LARGO DEL TIEMPO DEBERA SER BAJA | ESTABLE | LIGERAMENTE ESTABLE | RELATIVAMENTE ESTABLE | INESTABLE DEBE GENE-RARSE CON-FORME SE USA | INESTABLE DEBE GENE-RARSE CON-FORME SE USA |
| NO TOXICO HACIA LAS FORMAS SUPERIORES DE VIDA | DEBERA SER TOXICO HACIA LOS MICROORGANISMOS Y NO TOXICO HACIA EL HOMBRE Y ANIMALES | ALTAMENTE TOXICO HACIA LAS FORMAS SU-PERIORES DE VIDA | TOXICO | TOXICO | TOXICO | TOXICO |
| INTERACCION CON MATERIAL EXTRANO | NO DEBERA SER ABSORVI-DO POR MATERIA ORGANICA DIFERENTE A LAS CELULAS BACTERIANAS | OXIDA A LA MATERIA OR-GANICA | OXIDANTE ACTIVO | OXIDANTE ACTIVO | ALTA | OXIDA A LA MATERIA OR-GANICA |
| TOXICIDAD A TEM- PERATURA AMBIENTAL | DEBERA SER EFECTIVO EN EL AMBITO DE TEMPERATU- RA AMBIENTE | ALTA | ALTA | ALTA | ALTA | MUY ALTA |
| CAPACIDAD DE DESO- DORIZAR | DEBERA DESODORIZAR MIENTRAS DESINFECTA | ALTA | MODERADA | MODERADA | ALTA | ALTA |
| DISPONIBILIDAD | EN GRANDES CANTIDADES Y TENER UN PRECIO RA- ZONABLE | COSTO BAJO | COSTO MODE- RADAMENTE BAJO | COSTO MODE- RADAMENTE BAJO | COSTO MODERA- DO | COSTO ALTO |
| NO CORROSIVO Y NO COLORANTE | NO DEBERA ATACAR A METALES O MANCHAR ROPA | ALTAMENTE CORROSIVO | ALTAMENTE CORROSIVO | CORROSIVO | ALTAMENTE CORROSIVO | ALTAMENTE CORROSIVO |

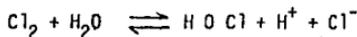
CUADRO III.31 APLICACIONES DE LA DESINFECCION

Los compuestos del cloro mas frecuentemente utilizados son el hipoclorito de sodio, de calcio y gas cloro. La elección del método de desinfección se efectúa en base a las medidas de seguridad que deben seguirse, la disponibilidad, el costo y la capacidad de almacenamiento.

Mecanismo de la Cloración

Cuando el cloro gaseoso (Cl_2) se adiciona al agua, tienen lugar dos reacciones: Hidrólisis e ionización.

La hidrólisis puede expresarse:

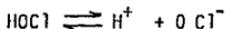


Por lo que la constante de equilibrio será:

$$K_{eq} = \frac{(HOCl)(H^+)(Cl^-)}{(Cl_2)} = 4.5 \times 10^{-4} \quad (\text{a } 25^\circ C)$$

Dada la gran magnitud de este coeficiente, la solubilidad del cloro en el agua es bastante grande.

En tanto que la ionización puede definirse como:



Siendo la constante de ionización

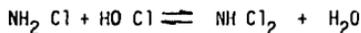
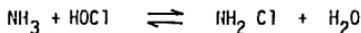
$$K_i = \frac{(H^+) (OCl^-)}{(HOCl)} = 2.7 \times 10^{-8} \text{ (a } 25^\circ \text{ C)}$$

K_i puede variar con la temperatura, por lo que los valores observados son:

| | | | | | | |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temperatura ($^\circ\text{C}$) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| $K_i \times 10^8$ (mole/l) | 1.5 | 1.7 | 2.0 | 2.2 | 2.5 | 2.7 |

Las concentraciones de HOCl presentes en el agua se denomina cloro libre disponible, la distribución relativa de estas dos especies es muy importante, ya que la eficiencia de la mortandad del HOCl es de 40 a 80 veces la del (OCl^-), ya que a temperatura constante, a mayor pH, menor porcentaje de HOCl.

De igual manera, puede añadirse al agua cloro libre en forma de hipoclorito de calcio ($Ca(OCl)_2$). El cloro libre en solución reaccionará con el amoníaco del agua para formar cloraminas, las cuales sirven igualmente como desinfectantes aunque reaccionen de una manera sumamente lenta; las reacciones más importantes pueden expresarse:



Las dos formas que predominan en la mayoría de los casos (NH_2Cl y NHCl_2) se les denomina cloro combinado disponible.

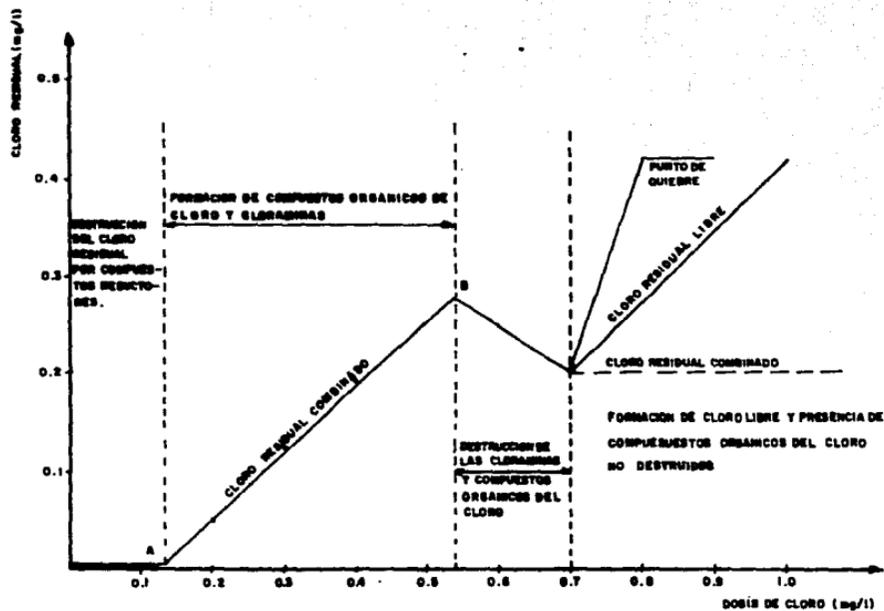
Cloración al Punto de Quiebre

Debido a que el cloro libre reacciona con el amoníaco, además de que es un fuerte oxidante, complica el mantenimiento de una cantidad residual (combinado o libre) para efectuar la desinfección.

Cuando se añade cloro, las sustancias fácilmente oxidables tales como Fe^{3+} , Mn^{2+} , H_2S y la materia orgánica reaccionan con el cloro reduciendo la mayor parte a ion cloruro (punto a), al satisfacer esta demanda inmediata, el cloro continuará reaccionando con el amoníaco para formar cloramínas entre los puntos A y B. Entre el punto B y el punto de quiebre algunas de las cloramínas se convierten en NCl_3 , mientras que las restantes se oxidarán a óxido nítrico y nitrógeno reduciéndose el cloro a ion cloruro.

La adición de cloro más allá del punto de quiebre, dará como resultado un aumento directamente proporcional del cloro libre disponible. La razón principal para añadir cloro suficiente hasta obtener cloro residual libre, es que la desinfección se logrará con toda seguridad. (Gráfica III.26).

La presencia de compuestos adicionales que reaccionen con el cloro puede alterar mucho la forma de ésta curva, la cantidad de cloro que debe



GRAFICA III.26 CLORACION AL PUNTO DE QUIEBRE

añadirse para alcanzar un nivel deseado de cloro residual se llama demanda de cloro. (Ref. 21).

En base a estas consideraciones, podemos afirmar que la función principal de la presencia de cloro residual es preservar la calidad bacteriológica del agua desde su tratamiento hasta los puntos de aplicación y durante su conducción.

Bases de Diseño

La capacidad de los equipos de cloración se seleccionan de acuerdo a los criterios que sancionen la concentración de cloro residual en el efluente o al número final de bacterias coliformes, la cantidad real de cloro deberá determinarse experimentalmente.

Algunos valores pragmáticos para el cálculo de equipo de esta naturaleza se pueden observar en la siguiente relación.

DOSIS DE CLORO TIPICAS PARA DESINFECCION

| <u>EFLUENTE DE:</u> | <u>DOSIS (mg/l)</u> |
|--|---------------------|
| Agua residual sin tratar (precloración) | 6-25 |
| Sedimentación primaria | 5-20 |
| Planta de precipitación química | 2-6 |
| Planta de filtros percoladores | 3-15 |
| Planta de lodos activados | 2-8 |
| Filtros multicapa a continuación de plantas de lodos activados | 1-5 |

Para el caso de la planta piloto "Cerro de la Estrella", la concentración del cloro residual presente en el efluente debe ser 0.5 mg/l (criterio DGCOH).

Descripción de la Unidad

La unidad cuenta con dos columnas circulares de 30 cm de \emptyset cuyo tiempo de retención es de 15 min. pudiéndose operar en serie y paralelo. El equipo dosificador es a base de hipoclorito de sodio en solución, el cual se inyecta en línea mediante un Venturi para garantizar un buen mezclado; figura 17.

Programa de Pruebas

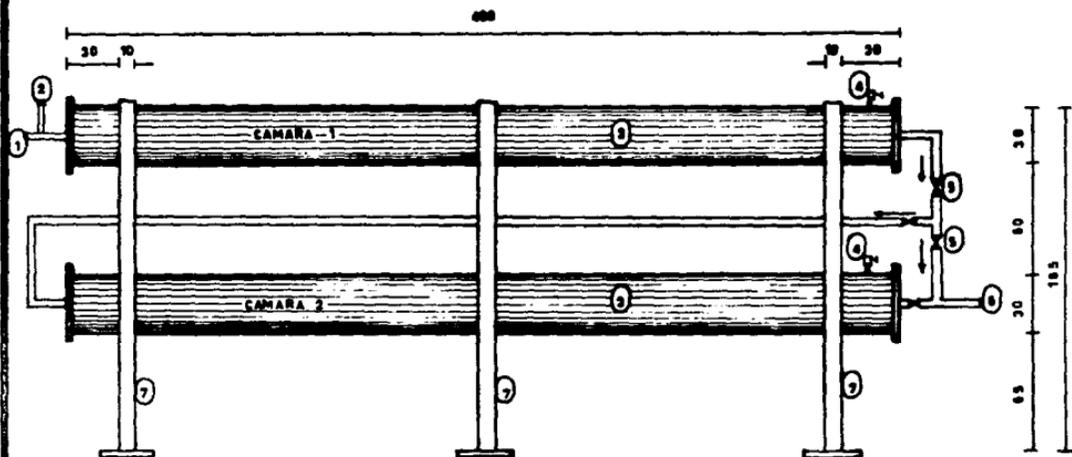
En la figura 18 se muestra el esquema de pruebas, en el cual se utilizaron dos tiempos de retención y dos dosis de hipoclorito de sodio con un 13% de cloro disponible. En el cuadro III.32 se resumen los valores medios de las concentraciones en los parámetros y en el cuadro III.33 se presentan las eficiencias de remoción. Para el tiempo de retención de 15 min. y dosis de 5.7 mg/l hay remoción de turbiedad 14%, coliformes de 84% y un residual de 0.10 mg/l, el cual es bajo pues se consideran 0.30 a 0.50 mg/l para garantizar que no habrá crecimiento de coliformes hasta el destino final del agua tratada. En la dosis de 10 mg/l se remueve el 33 y 50% para la turbiedad y el color esto se debe principalmente a la oxidación de compuestos del agua con el cloro, el residual se mantiene en 0.10 mg/l y no hay remoción de coliformes, tal vez debido a interferencias al analizar las muestras.

| QW | DOSIS CLORO l./min. mg./l. | TIEMPO RETENC. min. | P H | | TURBIEDAD | | COLOR | | COLIFORMES TALES | | CLORO RESID. mg/l. |
|----|-------------------------------------|---------------------------|------|------|-----------|------|-------|------|---------------------|--------|--------------------------|
| | | | Inf. | Ef. | Inf. | Ef. | Inf. | Ef. | Inf. | Ef. | |
| | | | | | | | | | | | |
| 30 | 5.7 | 15 | 8.27 | 8.47 | 1.0 | 1.0 | 5 | 5 | | | |
| 30 | 5.7 | 15 | 8.27 | 8.37 | 1.0 | 1.0 | 5 | 5 | 11,000 | 11,000 | 0.10 |
| 30 | 5.7 | 15 | 8.27 | 8.28 | 1.0 | 1.0 | 5 | 5 | 11,000 | 24,000 | - |
| | | Σ | 8.29 | 8.37 | 1.75 | 1.5 | 3.33 | 3.23 | 11,000 | 17,500 | 0.10 |
| | | σ | 0.25 | 0.25 | 0.75 | 0.5 | 2.36 | 2.36 | 0 | 6,500 | 0.0 |
| 30 | 10.0 | 15 | 7.77 | 8.17 | 1.0 | 1.0 | - | - | 9,300 | 9,300 | 0.10 |
| 30 | 10.0 | 15 | 7.52 | 8.04 | 2.0 | 1.0 | 10 | 5 | - | - | 0.10 |
| | | Σ | 7.79 | 8.10 | 1.5 | 1.0 | 10 | 5 | 9,300 | 9,300 | 0.10 |
| | | σ | 0.22 | 0.37 | 0.5 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.20 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.91 | 7.98 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | - | - | 0.50 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.17 | 8.0 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 1,500 | 900 | 0.60 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.82 | 8.47 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 4,300 | 2,100 | 0.60 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.54 | 8.75 | 1.5 | 1.5 | 0 | 0 | 930 | 930 | - |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.84 | 8.90 | 0.5 | 1.5 | 0 | 0 | 390 | 930 | - |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.20 | 8.25 | 0.5 | 0.5 | 5 | 0 | 24,000 | - | 0.30 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.13 | 8.17 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 24,000 | 1,500 | - |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.13 | 8.17 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 9,300 | 1,500 | - |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.52 | 8.45 | 1.0 | 1.0 | - | - | 900 | 4,300 | 0.30 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.09 | 8.06 | 0.5 | 1.0 | 0 | 5 | 24,000 | - | 0.30 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.32 | 8.27 | 0.5 | 0.5 | - | - | 4,300 | - | 0.20 |
| 30 | 5.7 | 30 | 8.14 | - | 1.0 | 1.0 | 5 | 5 | 43,000 | 1,100 | 0.10 |
| 30 | 5.7 | 30 | 7.71 | - | 1.5 | 1.5 | 7.5 | - | 24,000 | 11,000 | 0.10 |
| 30 | 5.7 | 30 | - | - | 0.5 | 0.5 | - | - | 24,000 | 11,000 | 0.10 |
| 30 | 5.7 | 30 | 7.76 | 7.57 | 1.0 | 1.0 | 5 | 5 | 24,000 | 24,000 | - |
| 30 | 5.7 | 30 | 7.80 | 8.10 | 0.5 | 0.5 | 5 | 5 | 24,000 | 11,000 | 0.10 |
| 30 | 5.7 | 30 | 7.73 | 7.74 | 1.8 | 1.5 | 0 | 0 | 24,000 | 24,000 | - |
| 30 | 5.7 | 30 | - | - | - | - | - | - | 430,000 | 11,000 | - |
| | | Σ | 7.67 | 8.00 | 1.39 | 1.10 | 1.96 | 3.52 | 40,389 | 7,518 | 0.20 |
| | | σ | 1.35 | 0.34 | 1.11 | 0.5 | 2.7 | 2.92 | 93,145 | 7,908 | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 8.20 | 8.20 | 1.0 | 1.0 | 5 | 5 | 1,500 | 930 | 0.30 |
| 30 | 10 | 30 | 8.10 | 8.4 | 0.5 | 0.5 | - | - | 2,200 | 4,300 | 0.30 |
| 30 | 10 | 30 | 8.27 | 8.48 | 0.0 | 1.0 | 5 | 0 | - | - | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 8.55 | 8.55 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 46,000 | 46,000 | - |
| 30 | 10 | 30 | 8.44 | 8.43 | 0.0 | 1.0 | 10 | 5 | - | - | - |
| 30 | 10 | 30 | 8.54 | 8.4 | 0.0 | 1.0 | 10 | 5 | 24,000 | 700 | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 8.58 | 8.53 | 0.0 | 1.0 | 10 | 10 | - | - | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 8.49 | 8.27 | 1.5 | 1.5 | 5 | 5 | 21 | 4 | 0.20 |
| 30 | 10 | 30 | 8.76 | 8.70 | 0.5 | 0.5 | 5 | 5 | - | - | 0.50 |
| 30 | 10 | 30 | 7.98 | 8.17 | 1.0 | 1.0 | 5 | 5 | - | - | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 8.05 | 8.26 | 1.0 | 1.0 | 10 | 5 | - | - | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 7.85 | 7.85 | 0.5 | 0.5 | 10 | 10 | 24,000 | 11,000 | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 8.34 | 8.00 | 0.0 | 1.0 | 20 | 20 | 7,500 | 2,300 | 0.10 |
| 30 | 10 | 30 | 8.08 | 8.10 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 11,000 | 110 | 0.10 |
| | | Σ | 8.39 | 8.42 | 1.43 | 1.21 | 7.21 | 1.77 | 14,540 | 8,168 | 0.20 |
| | | σ | 0.11 | 0.25 | 0.84 | 0.92 | 5.04 | 6.13 | 24,338 | 14,608 | 0.20 |

| QW L/min. | RETENC. min. | DOSIS Cl(mg/L) | PH | | A (%) | TURBIEDAD | | A (%) | COLOR | | A (%) | COLIFORMES TOT. | | A (%) | CLORO RESID. mg/l. |
|--------------|-----------------|-------------------|------|------|-------|-----------|------|-------|-------|------|-------|-----------------|--------|-------|-----------------------|
| | | | Inf. | Efl. | | Inf. | Efl. | | Inf. | Efl. | | Inf. | Efl. | | |
| 30 | 15 | 5.7 | 8.29 | 8.37 | 0.08 | 1.75 | 1.5 | 14.3 | 3.33 | 3.33 | 0 | 110,000 | 17,500 | 84.1 | 0.10 |
| 30 | 15 | 10 | 7.79 | 8.10 | 0.31 | 1.5 | 1.0 | 33.33 | 10 | 5 | 50.0 | 9,300 | 9,300 | 0.0 | 0.10 |
| 30 | 30 | 5.7 | 7.67 | 8.20 | 0.53 | 1.39 | 1.10 | 20.86 | 1.96 | 3.53 | 80.1 | 40,309 | 7,510 | 81.4 | 0.29 |
| 30 | 30 | 10 | 8.39 | 8.42 | 0.03 | 1.43 | 1.21 | 15.38 | 7.31 | 5.77 | 21.1 | 14,540 | 8,160 | 43.8 | 0.23 |

Cuadro III. 33. RESUMEN EFICIENCIAS MEDIAS DE REMOCION EN DESINFECCION.

UNIDAD DE DESINFECCION



- NOMENCLATURA:**
 1- INFLUENTE.
 2- INYECCION DE HIPOCLORITO DE SODIO.
 3- CAMARAS DE CONTACTO
 4- VALVULA DE ALIVIO.
 5- VALVULAS DE OPERACION.
 6- EFLUENTE.
 7- SOPORTE.

FIGURA 17

ACOTIEM.
 ESCALA. 1:25

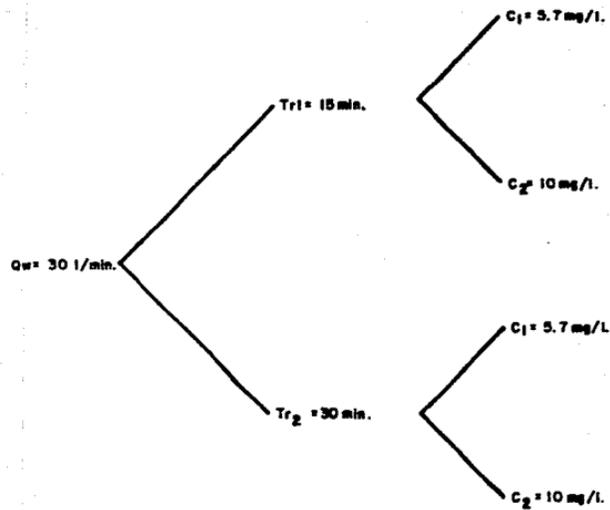
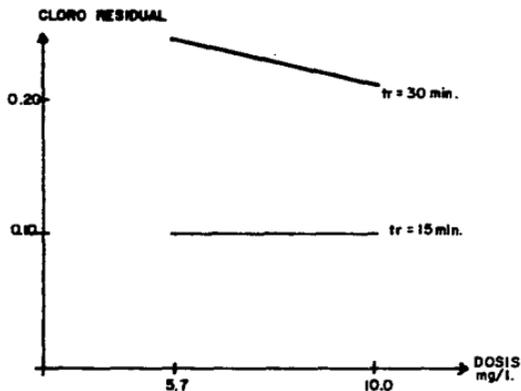
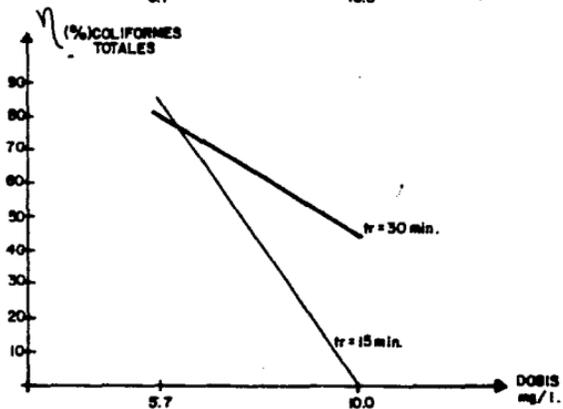
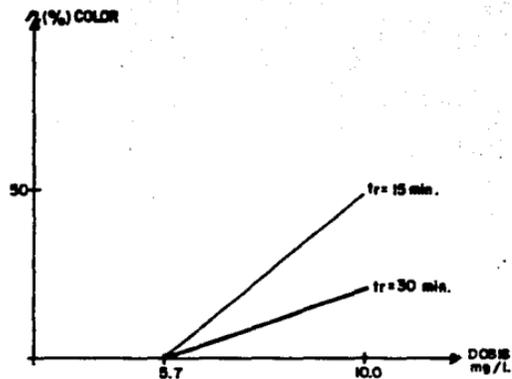
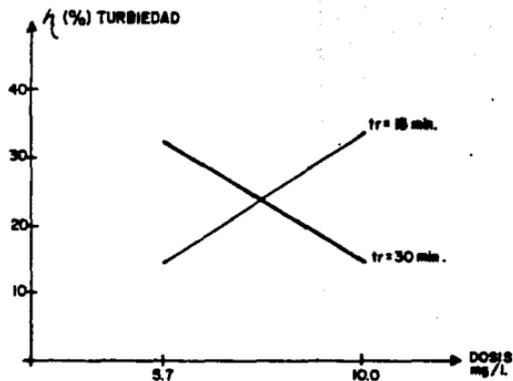


Fig. 18

DIAGRAMA DE PRUEBAS DE DESINFECCION

Finalmente para el tiempo de retención de 30 min. se incrementa el residual a 0.29 mg/l considerándose aceptable. Además la remoción de coliformes es del 81%, 21% para turbiedad y un incremento en el color para la dosis de 5.7 mg/l en cuanto a la dosis de 10 mg/l los resultados son poco ambiguos teniéndose algunas causas como deficiencias en los análisis o mala esterilización de recipientes de muestreo en la gráfica III.27 se esquematizan los resultados obtenidos. Considerándose como óptimo la dosis de 5.7 mg/l y el tiempo de contacto de 15 min.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CAPITULO III

- 1 DDF/DGCON/U. DESARROLLO. Evaluación de Sistemas Biológicos de Tratamiento de Aguas Residuales.
- 2 DDF/DGCON. Experimentación en Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales. DHTA, S. A. México 1985
- 3 Advanced Waste Treatment Research, Summary Report U. S. Department of Health, Education and Welfare. April 1965
- 4 Romero León M. A. Evaluación Económica y Social de Proyectos I (Curso) Fac. de Ingeniería UNAM, México, D. F. 1987
- 5 WPCF, Manual of Practice No. 8. Wastewater Treatment Plant Design, Water Pollution Control Federation, 1977, (Second Printing 1982), Lancaster, Pa, E.U.A.
- 6 Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de Calidad de Agua para Consumo Humano. Submodulo Floculación Manual de Instrucción. Brasil 1981
- 7 WPCF/ASCE. Waste Treatment Plant Design. Lancaster Press (1977)
- 8 Metcalf & Eddy Inc. Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse Mc. Graw-Hill Book Co., N. Y. 1981
- 9 Azevedo Neto N. Manual de Hidráulica
- 10 Weber W. Jr. Control de la Calidad del Agua, Procesos Físicoquímicos

- 11 EPA Process Design Manual for Suspended Solids Removal U. S. Environmental Protection Agency EPA 625/1-75-003 (1975)
- 12 Perry, R H Perry's Chemical Engineer's Handbook, 6a Edición, Mc. Graw-Hill Book Co. N. Y. 1984
- 13 Mintz D. M. Modern Theory of Filtration. Special Report No. 10 International Water Supply Congress. Barcelona, España 1966
- 14 Arboleda, U. J. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. CEPIS-OPS Serie Técnica 13 (1972)
- 15 Wastewater Treatment Plant Design, Water Pollution Control Federation, Manual of Practice No. 8, Washington D. C. 1977
- 16 EPA Process Design Manual for Carbon Adsorption U.S. Environmental Protection Agency Technology Transfer, Cincinnati, Oh., 1973
- 17 An Assessment of Ozone and Chlorine Dioxide Technologies for Treatment of Municipal Water Supplies. Municipal Environmental Research Lab; Water Supply Research Div; U.S. Department of Commerce, PB-285 972, August 1988
- 18 Navarro B. F., Flores M. T., Espinoza V. R., López M. V. Estudio de la Degradación de Detergentes Contenidos en Algunos Productos de Uso Cotidiano. Memorias del IV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Morelia, Mich. 1985
- 19 Ryley, R. L. y G. G. Pique. "Manual Práctico de Osmosis Inversa, Fluid System, Inc., UOP, San Diego CA. 1984

- 20 Saltech Corp. Reverse Osmosis Engineering. El Paso Texas 1983
- 21 Metcalt & Eddy Inc. "Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse Mc Graw-Hill Book Co. U.S.A. 1979
- 22 Ayanequi M. S. Desinfección, Métodos, Mecanismos, Cloración, Decoloración Aplicación. Notas del Curso "Tratamiento de Aguas Residuales, Municipales, Industriales y Reusos. DECFI, UNAM 1985

BIBLIOGRAFIACOMPLEMENTARIA

- Mendoza M. H. Tratamiento Avanzado, Operaciones y Procesos Unitarios, Descripción y Aplicaciones DECFI UNAM, 1985
- Water Pollution Control Federation. Manual of Practice for Water Pollution Control Wastewater Treatment Plant Design. Washington D. C. EUA, 1977
- Fair, G. M. and J. C. Geyer, Water Supply and Wastewater Disposal, John Wiley and Sons Inc. Fourth Printing. New York, N Y 1961
- Arboleda, V. J. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. CEPIS Serie Técnica 13, OPS/OMS. Lima, Perú 1972
- Walpole, R. E and R. H Myers. Probability and Statistics for Engineers and Scientists. Collier Mc Millan Editions, Nueva York, 1978
- WPCF Chlorination of Wastewater. MOP-4 (1976)

IV. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos después de dos años de operación de los Dispositivos Experimentales de Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales se comprobó la factibilidad técnica y económica de reutilizar las aguas de desecho en actividades que no requieran calidad similar a la potable; pero, si se continúa la investigación en este campo se podrá obtener a mediano plazo un efluente apto para usos que impliquen contacto directo con seres humanos tales como natación y hasta la ingestión de este líquido, previa dilución en los sistemas de distribución a la población, ya que actualmente los costos de importación de agua potable de cuencas cada vez mas alejadas se ha hecho comparable con los costos de construcción, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento terciario de aguas residuales (cuadro IV.1), además del impacto ambiental y social a las zonas afectadas por este hecho.

Para asegurar la calidad físico-químico-bacteriológica de estos efluentes debe continuarse con bioensayos con organismos tanto acuáticos como terrestres (mamíferos), ya que podrían presentarse efectos nocivos a la salud del hombre a largo plazo por bioacumulación de metales pesados, compuestos orgánicos, sintéticos u otras sustancias causantes de efectos cancerígenos o mutagénicos.

Además, la experiencia obtenida en la experimentación permitió incrementar las eficiencias de los procesos estudiados modificando, hasta cierto punto, algunas variables de operación, ya que el campo del tratamiento avanzado es una actividad nueva en México, por lo que fue necesario adaptar la tecnología a

información proveniente de otros países a las condiciones prevalcientes en nuestro país, por lo que no se podrían generalizar determinados sistemas de tratamiento para cualquier tipo de agua residual, sino que debe estudiarse cada caso en particular. Pero sí se pueden considerar como una herramienta para el diseño de plantas a nivel prototipo pues en épocas pasadas la metodología para el diseño de plantas era a base de referencias bibliográficas.

Con los resultados obtenidos a la fecha es factible liberar volúmenes de primer uso utilizados en la industria para enfriamiento de calderas, generación de vapor; usos municipales (servicios, uso indirecto del hombre); usos recreativos (lagos artificiales); recarga artificial de acuíferos; riego de cultivos de consumo crudo; abrevaderos, etc., es decir el nivel de calidad deseado estará en función de las combinaciones que se quieran dar a los procesos; tomando como base las eficiencias de remoción y las que la tecnología empleada se considera de bajo costo y con un 20% de tecnología de importación.

Finalmente cabe mencionar que los resultados obtenidos en esta experimentación son aceptables, recomendándose analizar cada caso en particular de acuerdo al objetivo que se persiga y realizar pruebas de tratabilidad para el diseño de nuevas plantas a nivel prototipo en otras zonas del país.

ABASTECIMIENTO EN PESOS DE 1987

COSTO POR m³ DE AGUA POTABLE

| FUENTE | INVERSION DE LA OBRA | INVERSION DE LA OBRA | INVERSION DE LA OBRA | OPERACION MANTENIMIENTO | ENERGIA | CAUDAL APORTADO | COSTO TOTAL x m ³ \$ |
|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------|---------------------|--|
| | MILES DE | m ³ /seg MILES DE | \$ | \$ | \$ | m ³ /seg | |
| Jerma * | 141.45 | 15.72 | 82.12 | 5.09 | 39.93 | 9.0 | 127.14 |
| Cutzamala 1a. Etapa * | 137.71 | 34.42 | 110.08 | 8.04 | 51.92 | 4.0 | 170.64 |
| Cutzamala 2a. Etapa * | 239.10 | 34.16 | 107.51 | 8.5 | 70.65 | 7.0 | 186.66 |
| Cutzamala 3a. Etapa | 263.48 | 32.93 | 105.88 | 8.52 | 145.33 | 8.0 | 254.73 |
| Libres/Oriental | 237.98 | 33.93 | 151.69 | 5.09 | 63.84 | 7.0 | 220.62 |
| Alto Amacuzac | 443.43 | 34.11 | 152.17 | 8.52 | 180.42 | 13.0 | 341.11 |
| Medio Amacuzac | 1 493.51 | 31.11 | 138.82 | 12.65 | 217.78 | 48.0 | 369.25 |
| Tecolutla | 523.51 | 33.77 | 155.71 | 8.52 | 146.06 | 15.5 | 310.29 |
| Taxhimay Tlautla | 151.21 | 30.24 | 134.97 | 8.52 | 21.28 | 5.0 | 164.77 |
| Taxhimay | 80.99 | 16.19 | 144.61 | 8.52 | 21.28 | 5.0 | 174.41 |
| Sistema de Pozos * | 41.6 | 1.89 | 6.07 | 5.04 | 39.95 | 22.0 | 51.11 |
| Refo | 31.5 | 6.3 | 20.25 | 45.83 | 191.52 | 5.0 | 257.60 |
| PUEDA | 210 | 45.65 | 146.77 | | | 4.6 | 146.77 |
| PPIz | 4.0 | 13.33 | 42.86 | 5.09 | 17.80 | 0.3 | 65.75 |
| PTA. AR | 6.0 | 20.00 | 64.30 | 5.09 | 19.93 | 0.3 | 89.32 |

* Sistema de Operación

Ref. Moreno M. S. "La Ciudad de México: Evaluación Técnico-Económica de Diferentes Fuentes Subterráneas y Superficiales de Suministro. Ponencia para el Simposio Internacional sobre la Economía del Agua Subterránea. México 1986.

ANEXO A

1. Determinación de la Curva de Ajuste de los Resultados del Proceso de Espumación.

Para determinar el tipo de curva que mejor describe el fenómeno de espumación, se calculó el coeficiente de correlación, que permite definir si los datos siguen una relación lineal o no, siendo:

$$r^2_{xy} = \frac{(\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n})^2}{(\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}) (\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n})}$$

Donde:

Y_i = Componente i de la variable dependiente

X_i = Componente i de la variable independiente

n = Número de datos

Sustituyendo con los resultados del cuadro I (burbuja gruesa)

$$r^2_{xy} = 0.3822 \quad r_{xy} = 0.6183$$

Si el coeficiente resultase muy cercano a 1.00, se podría decir que la relación de los datos es lineal, pero como es menor, se busca otro tipo de curva que más se ajuste (exponencial, logarítmica o potencial).

Probando con la ecuación de una curva de tipo exponencial se obtiene:

$$r^2 = \frac{(\sum X_i \ln Y_i - \frac{1}{n} \sum X_i \sum \ln Y_i)^2}{(\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}) (\sum (\ln Y_i)^2 - \frac{(\sum \ln Y_i)^2}{n})} = 0.4636$$

$$r = 0.681$$

Para un ajuste logarítmico:

$$r^2 = \frac{(\sum Y_i \ln X_i - \frac{1}{n} \sum \ln X_i \sum Y_i)^2}{(\sum (\ln X_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \ln X_i)^2) (\sum Y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum Y_i)^2)} = 0.188$$

$$r = 0.436$$

Ahora, para una curva de tipo potencial

$$r^2 = \frac{(\sum (\ln X_i) (\ln Y_i) - \frac{(\sum \ln X_i) (\sum \ln Y_i)}{n})^2}{(\sum (\ln X_i)^2 - \frac{(\sum \ln X_i)^2}{n}) (\sum (\ln Y_i)^2 - \frac{(\sum \ln Y_i)^2}{n})} = 0.466$$

$$r = 0.681$$

Analizando los resultados anteriores, se puede observar que la curva que mejor representa el fenómeno es de tipo exponencial, ya que su coeficiente de correlación es el más cercano a 1.00 (0.681).

Una vez determinada la curva de ajuste, se procede a evaluar las constantes "a" y "b" de la ecuación exponencial (cuadro 1).

$$b = \frac{\sum X_i \ln Y_i - \frac{1}{n} (\sum X_i) (\sum \ln Y_i)}{\sum X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum X_i)^2} =$$

$$a = \exp \left(\frac{\sum \ln Y_i}{n} - b \frac{\sum X_i}{n} \right) = e^{-1.485}$$

$$a = 0.226$$

Por lo que, si la ecuación exponencial es:

$$y = a e^{bx}$$

Sustituyendo

$$Y = 0.226 e^{0.081 X}$$

| rh | $\frac{CO-C}{F}$ | x^2 | y^2 | Ln XY | LnX | Ln(X) ² | Y LnXi | LnY ₁ | (LnY ₁) ² | Yi LnY ₁ | Ln Xi LnYi |
|--------|------------------|---------|-------|--------|-------|---------------------|--------|------------------|----------------------------------|---------------------|------------|
| X | Y | | | | | | | | | | |
| 4.6 | 0.316 | 21.16 | 0.10 | 1.454 | 1.526 | 2.329 | 0.482 | -1.15 | 1.32 | -5.29 | -1.755 |
| 6.32 | 0.264 | 39.94 | 0.07 | 1.668 | 1.844 | 3.40 | 0.487 | -1.331 | 1.77 | -8.417 | -2.45 |
| 7.72 | 0.627 | 59.60 | 0.39 | 4.84 | 2.044 | 4.177 | 1.281 | -0.4667 | 0.218 | -3.604 | -0.954 |
| 8.00 | 0.614 | 64.00 | 0.38 | 4.912 | 2.079 | 4.329 | 1.276 | -0.488 | 0.238 | -3.902 | -1.014 |
| 8.05 | 0.339 | 64.80 | 0.11 | 2.729 | 2.085 | 4.35 | 0.707 | -1.082 | 1.171 | -8.708 | -2.256 |
| 10.08 | 0.327 | 101.61 | 0.11 | 3.296 | 2.31 | 5.338 | 0.755 | -1.118 | 1.249 | -11.27 | -2.582 |
| 10.61 | 0.626 | 112.57 | 0.39 | 6.642 | 2.36 | 5.578 | 1.478 | -0.468 | 0.219 | -4.97 | -1.104 |
| 11.00 | 0.547 | 121.00 | 0.30 | 6.017 | 2.397 | 5.749 | 1.311 | -0.63 | 0.364 | -6.636 | -1.445 |
| 11.40 | 0.833 | 129.96 | 0.69 | 12.23 | 2.434 | 5.922 | 2.027 | -0.183 | 0.033 | -2.086 | -0.445 |
| 12.04 | 0.434 | 144.96 | 0.19 | 5.225 | 2.488 | 6.191 | 1.080 | -0.835 | 0.697 | -10.050 | -2.077 |
| 13.19 | 0.886 | 173.98 | 0.78 | 11.686 | 2.58 | 6.653 | 2.285 | -0.121 | 0.015 | -1.596 | -0.312 |
| 13.51 | 0.851 | 182.52 | 0.72 | 11.497 | 2.603 | 6.778 | 2.215 | -0.161 | 0.026 | -2.180 | -0.419 |
| 14.00 | 0.726 | 196.0 | 0.53 | 10.164 | 2.639 | 6.964 | 1.916 | -0.32 | 0.102 | -4.48 | -0.844 |
| 15.20 | 0.771 | 231.04 | 0.59 | 11.719 | 2.72 | 7.40 | 2.097 | -0.26 | -0.068 | -3.953 | -0.707 |
| 15.33 | 0.525 | 235.01 | 0.27 | 8.048 | 2.73 | 7.45 | 1.433 | -0.644 | 0.415 | -9.878 | -1.758 |
| 161.05 | 8.686 | 1878.15 | 5.62 | 102.12 | 34.84 | 82.603 | 20.83 | -9.23 | 7.905 | -87.029 | -20.122 |

CUADRO 1 PARAMETROS CALCULADOS PARA EL AJUSTE DE CURVAS

| X | Y | $(X_j - \bar{X})^2$ | Y_c | $(Y - Y_c)$ | $(Y - Y_c)^2$ | EFIC. CALC. |
|-------|-------|---------------------|-------|-------------|---------------|-------------|
| 4.6 | 0.316 | 37.66 | 0.328 | -0.012 | 0.0001 | 0.247 |
| 6.32 | 0.264 | 19.51 | 0.377 | -0.113 | 0.0127 | 0.274 |
| 7.72 | 0.627 | 9.10 | 0.422 | 0.205 | 0.042 | 0.297 |
| 8.00 | 0.614 | 7.49 | 0.432 | 0.182 | 0.033 | 0.302 |
| 8.05 | 0.339 | 7.22 | 0.434 | -0.095 | 0.0090 | 0.303 |
| 10.08 | 0.327 | 0.432 | 0.511 | -0.184 | 0.0335 | 0.338 |
| 10.61 | 0.626 | 0.016 | 0.534 | 0.092 | 0.0084 | 0.348 |
| 11.00 | 0.547 | 0.069 | 0.551 | -0.004 | 0.00001 | 0.355 |
| 11.40 | 0.833 | 0.4396 | 0.569 | 0.264 | 0.0697 | 0.363 |
| 12.04 | 0.434 | 1.698 | 0.599 | -0.165 | 0.027 | 0.375 |
| 13.19 | 0.886 | 6.017 | 0.658 | 0.228 | 0.052 | 0.397 |
| 13.51 | 0.851 | 7.689 | 0.675 | 0.176 | 0.031 | 0.403 |
| 14.00 | 0.726 | 10.647 | 0.702 | 0.2001 | 0.040 | 0.412 |
| 15.20 | 0.771 | 19.918 | 0.774 | -0.003 | 0.000 | 0.436 |
| 15.33 | 0.525 | 21.096 | 0.782 | -0.257 | 0.066 | 0.439 |
| | | 149.00 | 8.348 | 0.519 | 0.424 | |

CUADRO 2 CALCULOS PARA LA OBTENCION DE LA TABLA ANOVA

ANALISIS DE VARIANZA EN REGRESION LINEAL

Existen dos aspectos distintos complementarios en el estudio de la asociación entre variables. El llamado análisis de regresión en el cual se establece la naturaleza de la relación entre las variables; es decir se estudia la relación funcional entre las variables a fin de predecir el valor de una con base en las otras llamandose variable dependiente a la predicha e independiente a las basicas de predicción.

Para realizar el análisis de varianza se ajusta una regresión de la forma $E(Y) = a + b x$ usando n parejas de valores (x_j, y_j) ($J=1,2,3 \dots n$)

$$\text{De donde: } b = \frac{(X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{(X_j - \bar{X})^2}$$

$$A = \bar{Y} - B \bar{X}$$

Por lo que el modelo de regresión puede escribirse como

$$Y_j = a + b X_j + Z_j; \quad Z_j = \text{condiciones del análisis de varianza}$$

Con los datos anteriores se construye la tabla ANOVA presentándose en forma resumida las formulas a utilizar en el análisis de varianza en regresión lineal:

| FUENTE | G. DE L. | SUMA DE CUADRADOS | MEDIA DE CUADRADOS | FC |
|---------------------------------------|----------|------------------------------|-------------------------------------|----|
| REGRESION LINEAL | 1 | $B^2 \sum (x_j - \bar{x})^2$ | $B^2 \sum (x_j - \bar{x})^2$ | F |
| RESIDUAL (AL REDEDOR DE LA REGRESION) | n - 2 | $\sum (x_j - A - Bx_j)^2$ | $(\sum (y_j - A - Bx_j)^2) / (n-2)$ | |
| TOTAL | n-1 | $\sum (y_j - \bar{y})^2$ | | |

- A y B Se sacan del ajuste de curvas
- n Es el número de parejas ordenadas

Posteriormente se calcula la estadística "F" de Fisher.

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{(n-2) B^2 \sum (x_j - \bar{x})^2}{\sum (y_j - A - Bx_j)^2}$$

El resultado se compara con la distribución $F_{\alpha, 1, n-2}$ a un intervalo de confianza por ejemplo el 95%; se formula la hipótesis $H_0: b=0$ contra $H_1: b \neq 0$ dando como resultado la independencia entre las variables

X y Y de la población de datos

X ; se determina mediante la denotación de la variable del sistema.
Por ejemplo el tiempo de retención

Y ; se obtiene de los resultados medidos. Por ejemplo la eficiencia de remoción del color o la concentración del color en el proceso.

CALCULO DIFUSOR DE BURBUJA GRUESA

En el cuadro No. 2 se presentan los cálculos necesarios para la construcción de la tabla anova quedando:

CUADRO 3. TABLA ANOVA. DIFUSOR DE BURBUJA GRUESA

| FUENTE | GRADOS DE LIBERTAD | SUMA DE CUADRADOS | MEDIA DE CUADRADOS | Fc |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------|
| Regresión | 1 | <u>0.977</u> | <u>0.8903</u> | 10.752 |
| Residual (al rededor de la regresión) | n-2=15-2 =13 | <u>1.077</u> | <u>0.0828</u> | |
| T O T A L | 14 | 2.054 | | |

$$(x_j - \bar{x})^2 = 149.00$$

$$B^2 (x_j - \bar{x})^2 = (0.0810)^2 (149) = 0.977$$

Para un nivel de significancia $L = 0.05$, es decir una confianza del 95% $F_{0.05, 1, 14} = 4.66$

F Teórica F calc.

4.66 10.752 Se rechaza H_1 implicando que si hay dependencia entre las variables con una significancia del 95%.

CALCULO DIFUSOR DE BURBUJA FINA

Los resultados obtenidos para el difusor de burbuja fina se analizan estadísticamente en forma similar a los anteriores, obteniéndose lo siguiente:

CALCULO DEL COEFICIENTE DE CORRELACION

En el cuadro 4 se presentan los cálculos para el ajuste de curvas:

EXPONENCIAL

$$r^2 = 0.990$$

$$r = 0.994$$

LOGARITMICA

$$r^2 = 0.61$$

$$r = 0.781$$

POTENCIAL

$$r^2 = 0.984$$

$$r = 0.992$$

Cálculo de las constantes de la Ecuación exponencial que es la que más se ajusta:

$$b = 0.457$$

$$a = e^{-5.958}$$

Por lo que la ecuación que representa el fenómeno es:

$$Y = a e^{bx} = 0.0026 e^{0.457 x}$$

Análisis de Varianza

En el cuadro 5 se presentan los cálculos para la construcción de la tabla ANOVA. (Cuadro 6)

CUADRO 6. TABLA ANOVA DIFUSOR DE BURBUJA FINA

| FUENTE | GRADOS DE LIBERTAD | SUMA DE CUADRADOS | MEDIA DE CUADRADOS | FC |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------|
| Regresión | 1 | 4.92 | 4.92 | 132.97 |
| Residual (al rededor de la regresión) | n-2=6 | 0.256 | 0.037 | |
| T O T A L | 8 | 5.176 | | |

$$\sum (x_j - \bar{x})^2 = 23.56$$

$$B^2 (\sum (x_j - \bar{x})^2) = (0.457)^2 (23,56) = 4.92$$

Para un nivel de significancia del 95% $L = 0.05$

$$F_{0.05, 1, 14} = 3.38$$

Por lo tanto $F_{\text{Teórica}} < F_{\text{calc.}}$

$$3.38 < 132.97$$

Por lo que se rechaza H_1 implicando que sí hay dependencia entre las variables con una significancia del 95%.

| rh | Co-C c | | | | | | | | | | |
|------|-----------|----------------|----------------|--------|------|--------------------|-------|---------|----------------------|----------|----------|
| X | Y | X ² | Y ² | X Y | Ln X | (LnX) ² | Yi Xi | Ln Yi | (Ln Yi) ² | Yi Ln Yi | LnXiLnYi |
| 7.2 | 0.09 | 51.84 | 0.008 | 0.648 | 1.97 | 3.88 | 0.177 | -2.407 | 5.793 | -0.216 | -4.742 |
| 9.0 | 0.27 | 81.0 | 0.073 | 2.43 | 2.19 | 4.79 | 0.591 | -1.309 | 1.713 | -0.353 | -2.867 |
| 7.2 | 0.033 | 51.84 | 0.00109 | 0.237 | 1.97 | 3.88 | 0.065 | -3.410 | 11.628 | -0.112 | -6.718 |
| 9.0 | 0.102 | 81.0 | 0.0104 | 0.918 | 2.19 | 4.79 | 0.223 | -2.280 | 5.198 | -0.232 | -4.993 |
| 9.6 | 0.246 | 92.16 | 0.060 | 2.36 | 2.26 | 5.107 | 0.555 | -1.402 | 1.965 | -0.344 | -3.168 |
| 12.0 | 0.250 | 144.0 | 0.0625 | 3.00 | 2.48 | 6.15 | 0.620 | -1.386 | 1.920 | -0.346 | -3.437 |
| 9.6 | 0.188 | 92.16 | 0.035 | 0.336 | 2.26 | 5.107 | 0.424 | -1.671 | 2.792 | -0.314 | -3.776 |
| 12.0 | 0.322 | 144.0 | 0.103 | 1.236 | 2.48 | 6.15 | 0.798 | -1.133 | 1.283 | -0.428 | -2.810 |
| 75.6 | 1.501 | 738.0 | 0.353 | 11.165 | 17.8 | 39.85 | 3.453 | -14.998 | 32.92 | -2345 | 32.511 |

CUADRO 4. PARAMETROS CALCULADOS PARA EL AJUSTE DE CURVAS

| X | Y | $(x_j - \bar{x})^2$ | Y_c | $(Y - Y_c)$ | $(Y - Y_c)^2$ | EFICIENCIA CALCULADA |
|------|-------|---------------------|--------|-------------|---------------|----------------------|
| 7.2 | 0.09 | 5.06 | 0.0700 | 0.02 | 0.0004 | 6.52 |
| 9.0 | 0.27 | 0.20 | 0.159 | 0.11 | 0.012 | 13.71 |
| 7.2 | 0.033 | 5.06 | 0.070 | 0.037 | 0.0013 | 6.52 |
| 9.0 | 0.102 | 0.20 | 0.159 | 0.057 | 0.0032 | 13.71 |
| 9.6 | 0.246 | 0.02 | 0.21 | 0.036 | 0.0013 | 17.29 |
| 12.0 | 0.25 | 6.50 | 0.63 | 0.38 | 0.144 | 38.50 |
| 9.6 | 0.188 | 0.02 | 0.21 | 0.022 | 0.0005 | 17.29 |
| 12.0 | 0.322 | 6.50 | 0.63 | 0.308 | 0.095 | 38.5 |
| | | 23.56 | 2.14 | 0.962 | 0.256 | |

CUADRO 5. CALCULOS PARA LA OBTENCION DE LA TABLA ANOVA