

125

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS DEL DISEÑO DE LOS PROCESOS DE
OZONACIÓN
Y BIOADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO
EN UNA PLANTA POTABILIZADORA

288029

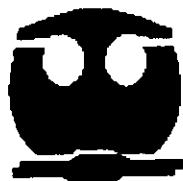
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A :

WILSON ROBERTO MAYA VELASCO



MÉXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUÍMICA

200



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.

JURADO ASIGNADO:

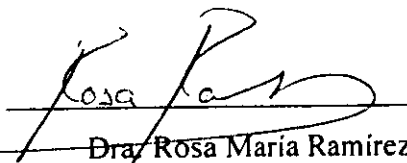
UNAM
ADJUTANCIA GENERAL

Presidente Prof. LANDY IRENE RAMIREZ BURGOS.
Vocal Prof. JOSE SABINO SAMANO CASTILLO.
Secretario Prof. ROSA MARIA RAMIREZ ZAMORA.
1er. Suplente Prof. BALDOMERO PEREZ GABRIEL.
2do. Suplente Prof. ALFONSO DURAN MORENO.


Sitio donde se desarrolló el tema:

Instituto de Ingeniería , Coordinación de Ingeniería Ambiental, UNAM.

Asesor del tema:


Dra. Rosa María Ramírez Zamora.

Sustentante:


Wilson Roberto Maya Velasco.

AGRADECIMIENTOS:

- A la Universidad Nacional Autónoma de México por formarme como Ingeniero Químico.
- A la Facultad de Química y sus profesores por la educación que he recibido de ella. y compartir sus conocimientos sin esperar remuneración alguna.
- Al Instituto de Ingeniería de la UNAM y su personal que labora en el. por las facilidades y apoyo otorgadas en la realización de este trabajo.
- A la Dra. Rosa María Ramírez Zamora por el apoyo, dirección, y asesoría otorgada en la realización en este trabajo.
- Al Dr. Alfonso Durán Moreno por la confianza que depositó en mi persona para la realización de este trabajo.
- A mis profesores sinodales, por sus valiosos comentarios para mejorar este trabajo.
- A la M en B Arodí Bernal por su orientación y apoyo en la realización de este trabajo.
- A todos mis compañeros de la Facultad de Química y del Instituto de Ingeniería. por brindarme su amistad, así como los gratos momentos que compartimos juntos.
- Por ultimo, a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para la realización de esta tesis.

DEDICATORIA.

- **A Dios Padre.**

Gracias señor, por iluminar mi camino que continúo recorriendo en esta vida.

- A mi padres Jorge y Elsa:

Que me han enseñado a afrontar los retos y dificultades de la vida con sabiduría, y que gracias a su apoyo y cariño he logrado salir adelante en las metas que me he propuesto.

- A la memoria de mi padre Jorge Maya Galicia.

Que aunque no te encuentres físicamente conmigo, siempre estas presente en mi pensamiento y compartes conmigo esta meta.

- A mi abuela Profesora Cristina Vera Olvera que siempre me ha dado su apoyo incondicional, su cuidado y cariño.

- A Cecilia, con todo mi cariño

Mi amiga y compañera que me ha dado su ayuda, todo su amor y paciencia a lo largo de este periodo de mi vida.

- A mis hermanos, Julián, Germán y Jorge, que siempre me han alentado y apoyado en mis decisiones que he tomado, su ayuda siempre ha sido un gran estímulo para continuar adelante.

- A todos mis amigos, que han compartido generosamente su tiempo conmigo, que me han dado su ayuda y consejos en los tiempos difíciles y hemos reído juntos en los tiempos de júbilo.

- A todas las personas que han contribuido en mi formación y desarrollo.

Gracias, Wilson R. Maya Velasco.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	IV
NOMENCLATURA.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1. ESTUDIO BIBLIOGRAFICO: PROCESOS FISICOQUIMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.....	3
1.1 OZONACIÓN.....	3
1.1.1 Tratamiento de aguas mediante O ₃	4
1.1.2 Factores que influyen el proceso de ozonación.....	4
1.1.3 Componentes de los sistemas de ozonación.....	4
1.1.4 Generación de ozono.....	5
1.1.4.1 Generación de ozono por descarga de corona.....	7
1.1.4.2 Métodos Alternativos.....	10
1.1.4.3 Tipos de generadores.....	11
1.1.4.4 Selección del gas de alimentación.....	11
1.1.4.5 Calidad del gas de alimentación al generador.....	14
1.1.4.6 Sistemas para la preparación del gas de alimentación.....	15
1.1.5 Cámaras de contacto y sistemas de difusión.....	16
1.1.5.1 Consideraciones Generales.....	16
1.1.5.2 Difusores convencionales de burbuja fina.....	17
1.1.5.3 Difusores tipo tubo / barra.....	19
1.1.5.4 Difusores tipo disco.....	20
1.1.5.5 Contactores de turbina.....	21
1.1.5.6 Contactores de tubo en U.....	22
1.1.5.7 Selección de contactores.....	23
1.1.6 Destrucción.....	25
1.1.6.1 Destrucción térmica.....	25
1.1.6.2 Destrucción catalítica y catalítica-térmica.....	26
1.1.6.3 Instrumentación y sistemas de control.....	26
1.2 BIO-ADSORCIÓN EN COLUMNAS DE CARBÓN ACTIVADO.....	26
1.2.1 Importancia del proceso biológico en el tratamiento de aguas.....	26
1.2.2 Estudios Realizados.....	29
1.2.3 Microorganismos en las columnas de CAG.....	30
1.2.3.1 Estudios generales.....	30
1.2.3.2 Velocidad de crecimiento.....	31
1.2.3.3 Modelos matemáticos que describen la degradación biológica en las columnas de CAG.....	34
CAPITULO 2 . ANALISIS DEL DISEÑO Y OPERACIÓN DE LOS PROCESOS DE OZONACIÓN Y BIOADSORCIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.....	35
2.1 Estudio de Factibilidad.....	35
2.1.1 Datos de Construcción del pozo.....	36

2.1.2 Ubicación de la planta	36
2.1.3 Tamaño de la planta de tratamiento	36
2.2 Estudios preliminares de Ingeniería	37
2.2.1 Caracterización del agua cruda	37
2.2.2 Objetivos de la calidad del agua tratada	37
2.2.4 Criterios de diseño y operación – Diseño preliminar de los procesos.....	38
2.2.5 Manejo de los residuos generados en la planta.....	40
2.2.6 Evaluación del impacto ambiental	40
2.3. Ingeniería básica de una planta potabilizadora.....	40
CAPITULO 3. CASO DE ESTUDIO.....	45
3.1 Análisis de las características físico-operacionales de los equipos de ozonación y bioadsorción de una planta potabilizadora	46
3.1.1 Sistema de ozonación.....	46
3.2 Análisis de la eficiencia de tratamiento de los equipos de ozonación y bioadsorción de una planta potabilizadora	63
3.2.1 Programa de muestreo de agua y aforo	63
3.3 Análisis estadístico de los resultados de caracterización fisicoquímica del agua cruda y tratada en cada etapa del tren de tratamiento.....	66
3.3.1 Evolución de la calidad del agua tratada en los procesos de ozonación y bioadsorción	76
3.3.2 Proceso de ozonación.....	82
3.3.3 Proceso de bio-adsorción	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	87

ANEXOS:

ANEXO I.- Estudio fotográfico de los equipos.

ANEXO II.- Estudio fotográfico del muestreo de aguas.

ANEXO III.- Resultados del muestreo del agua marzo 2000.

ANEXO IV.- Resultados de caracterización del agua.

ANEXO V.- NOM-127-SSA1-1994, De agua para uso y consumo humano-limites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1	Propiedades físicas del ozono.....	3
TABLA 1.2	Gases de alimentación para los generadores de ozono (Langlais et al. 1991).....	12
TABLA 1.2	Gases de alimentación para los generadores de ozono(continuación Langlais et al. 1989).	12
TABLA 3.1	Características y condiciones de operación determinadas en campo del generador de ozono.	47
TABLA 3.1	Características y condiciones de operación determinadas en campo del generador de ozono (continuación).....	47
TABLA 3.2	Comparación de las características del generador de ozono instalado y del propuesto con base en criterios técnico-económicos generales (Langlais et al. 1991)	49
TABLA 3.2	Comparación de las características del generador de ozono instalado y del propuesto con base en criterios técnico-económicos generales (continuación Langlais et al. 1991).....	49
TABLA 3.3	Características y condiciones de operación determinadas en campo del equipo del sistema de difusión de ozono.	52
TABLA 3.3	Características y condiciones de operación determinadas en campo del equipo del sistema de difusión de ozono (continuación).....	53
TABLA 3.4	Características y observaciones realizadas sobre el diseño y especificación de equipo del Tanque de contacto de ozono.	53
TABLA 3.5	Comparación de las características del generador de ozono instalado y del propuesto con base en criterios técnico-económicos generales (Langlais et al. 1991)	54
TABLA 3.6	Características y condiciones de operación del destructor de ozono.	56
TABLA 3.7	Características y observaciones realizadas del equipo de la columna empacada de carbón activado biológico.....	57
TABLA 3.7	Características y observaciones realizadas del equipo de la columna empacada de carbón activado biológico (continuación).	58
TABLA 3.8	características y observaciones realizadas del retrolavado de la columna de bioadsorción.....	60
TABLA 3.9	Calendario de toma de muestras.	63
TABLA 3.10	Parámetros fisicoquímicos a determinar en campo.	64
TABLA 3.11	Número de muestras (muestreo compuesto 24 Horas).....	65
TABLA 3.12	Parámetros fisicoquímicos a determinar en el laboratorio.	65
TABLA 3.13	Parámetros estadísticos calculados para la temperatura y pH del agua cruda (Punto 1). en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada	75
TABLA 3.14	Parámetros estadísticos calculados para la conductividad y color del agua cruda (Punto 1). en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada	75
TABLA 3.15	Parámetros estadísticos calculados para la turbiedad y SDT del agua cruda (Punto 1). en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada	75
TABLA 3.16	Parámetros estadísticos calculados para el oxígeno disuelto del agua cruda (Punto 1). en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Planta generadora de Ozono con separación de O_2/O_3 por Adsorción oscilante de presión (Riquarts y Leitgeb, 1985).....	7
FIGURA 1.2	Esquematación de la descarga en corona.....	9
FIGURA 1.3	Sistemas para la preparación de aire de alta presión.	14
FIGURA 1.4	Sistema para la preparación del gas de alimentación.	16
Fuente: MWDC (1988).....		18
FIGURA 1.5	Contactador de ozono de la planta de filtración acueducto en los Angeles. California.	18
Fuente:LePage (1981).....		18
FIGURA 1.6	Contactador de ozono en el Monroe Water Works, Monroe, Michigan.....	18
FIGURA 1.7	Detalle difusor de ozono de tipo tubo / barra.	20
Fuente:Trailigaz (1990).....		20
FIGURA 1.8	Detalle de un difusor de ozono tipo de disco.	20
Fuente:Trailigaz (1990).....		21
FIGURA 1.9	Ejemplo de una turbina sumergida de succión.....	21
FIGURA 1.10	Esquema de un contactador profundo en forma de U.	23
FIGURA 1.12	Unidad de destrucción catalítica / térmica.	26
Fuente: Fuente:Sontheimer H. et al. (1978).....		31
FIGURA 1.13	Datos microbiológicos en función de la profundidad del lecho.....	31
FIGURA 1.14	Aumento del número total de células como función del tiempo de incubación en muestras de agua en diferentes puntos de plantas de tratamiento que emplean ozonación y GAC.	32
Fuente:Sontheimer H. et al. (1978).....		33
FIGURA 1.15	Resultados del crecimiento bacteriano.	33
FIGURA 3.1	Plano general de la planta potabilizadora a pie de pozo.....	45
FIGURA 3.2	- Esquemas de los tanques de ozonación y filtro de carbon activado.....	47
FIGURA 3.3	Relación dosis de ozono aplicada / velocidad del agua para diferentes concentraciones iniciales de ozono en el gas (Langlais et al. 1991).	55
FIGURA 3.4	Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	66
FIGURA 3.5	Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	66
FIGURA 3.6	Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	67
FIGURA 3.7	Evolución de la turbiedad del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	67
FIGURA 3.8	Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	67
FIGURA 3.9	Evolución del oxígeno disuelto del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	68
FIGURA 3.10	Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	68
FIGURA 3.11	Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	68
FIGURA 3.13	Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	69
FIGURA 3.14	Evolución de la turbiedad del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	69
FIGURA 3.15	Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	70

FIGURA 3.16 Evolución del oxígeno disuelto del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	70
FIGURA 3.17 Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	70
FIGURA 3.18 Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	71
FIGURA 3.19 Evolución de la conductividad eléctrica del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	71
FIGURA 3.20 Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	71
FIGURA 3.21 Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	72
FIGURA 3.22 Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	72
FIGURA 3.23 Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	72
FIGURA 3.24 Evolución de la conductividad eléctrica del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	73
FIGURA 3.25 Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	73
73	
FIGURA 3.26 Evolución de la turbiedad del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	73
FIGURA 3.27 Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	74
FIGURA 3.28 Evolución del oxígeno disuelto del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	74
FIGURA 3.29 Evolución de la temperatura del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	76
FIGURA 3.30 Evolución de pH del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	76
FIGURA 3.31 Evolución de la conductividad del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	77
FIGURA 3.32 Evolución de color la del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	77
FIGURA 3.33 Evolución de la turbiedad del agua en función de la etapa del tren de la planta potabilizadora evaluada.	77
FIGURA 3.34 Evolución de los sólidos disueltos totales del agua en función de la etapa del tren de la planta potabilizadora evaluada.	78
FIGURA 3.35 Evolución de la dureza total del agua en función de la etapa del tren de la planta potabilizadora evaluada.	78
FIGURA 3.36 Evolución de la alcalinidad del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	78
FIGURA 3.37 Evolución de la DQO del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	79
FIGURA 3.38 Evolución del COD del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	79
FIGURA 3.39 Evolución de O ₂ disuelto del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	79
FIGURA 3.40 Evolución de los nitritos del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.	80

FIGURA 3.41 Evolución de los nitratos del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	80
FIGURA 3.42 Evolución de Nitrógeno proteico del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	80
FIGURA 3.43 Evolución de Nitrógeno amoniacal del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	81
FIGURA 3.44 Evolución de Hierro total del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	81
FIGURA 3.45 Evolución de Manganeso total del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	81
FIGURA 3.46 Evolución de Sulfatos del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.....	82

NOMENCLATURA

ATP	Adenosin trifosfato
CAB	Carbón activado biológico
CAG	Carbón activado granular
CFE	Compuesto de fondo equivalente
CO ₂	Bióxido de Carbono
COD	Carbón orgánico disuelto
COT	Carbón orgánico total
d	Distancia
DQO	Demanda química de oxígeno
dg	Espesor de la garganta del gas
EBCT	Tiempo de contacto del lecho vacío
ET	Eficiencia de transferencia
K _s	Constante media de la velocidad de crecimiento
LOX	Oxígeno líquido de alta pureza
μ	Velocidad de crecimiento
μ _{máx}	Velocidad máxima de crecimiento
NH ₄ ⁺	Amonio
NO ₂ ⁻	Nitritos
NO ₃ ⁻	Nitratos
NTP	Condiciones normales de presión y temperatura
O ₂	Oxígeno disuelto
O ₃	Ozono
P	Presión absoluta del gas
pH	Potencial de Hidrógeno
PM	Peso molecular
Q	Tasa de caudal de producción m ³ /h
Q _g	Flujo del gas
Q _L	Flujo del líquido
r _e y r _i	Radios exteriores e interiores
ROM	Reportes de operación mensual
S	Concentración de sustrato
SDT	Sólidos disueltos totales
UTN	Unidades de turbiedad nefelométricas
UV	Luz Ultravioleta
V	Frecuencia
V _o	Potencial pico de la corriente aplicada
Y1	Concentración de ozono en fase gas en la entrada al contactor
Y2	Concentración de ozono en fase gas en la salida del contactor
LAAFP	Planta de filtración del acueducto de Los Angeles

INTRODUCCIÓN

El deterioro de la calidad de las fuentes de extracción de agua destinada a la producción de agua potable que se presenta en el país, como consecuencia de la contaminación y sobreexplotación de estos cuerpos, ha originado la necesidad de implementar tecnologías avanzadas para la remoción eficiente de la gran variedad y cantidad de contaminantes orgánicos presentes.

Dentro de los procesos avanzados más eficientes y comúnmente utilizados en plantas potabilizadoras se encuentran la ozonación y la adsorción. Estos tratamientos son instrumentos muy útiles para la potabilización de aguas. Al principio, la ozonación se utilizaba para la eliminación de olor y sabor contenido en aguas (Langlais et al, 1988). Recientemente, algunos estudios han demostrado la acción benéfica del ozono sobre compuestos orgánicos recalcitrantes, como los plaguicidas ó los derivados fenólicos, la cual aumenta su remoción sobre carbón activado "biológico" (DeLaat, 1988). El ozono oxida estas moléculas de tal manera que cambia sus características fisicoquímicas y toxicológicas, haciendo que los subproductos, en función del grado de oxidación, sean más adsorbibles y biodegradables que la molécula inicial (Ramírez Zamora R.M., 1996). Estos dos últimos fenómenos se combinan en unidades de adsorción con carbón activado que presenta actividad biológica (Durán Moreno A., 1997), produciéndose el proceso de bioadsorción.

El diseño y operación de estos procesos son complejos por lo que es necesario seguir una metodología, la cual se basa principalmente en realizar pruebas de tratabilidad para determinar los principales parámetros de diseño y, en aplicar criterios propuestos para el diseño y operación de los equipos correspondientes a la ozonación y la bioadsorción. La falta de aplicación de estos dos elementos básicos puede repercutir negativamente en un mal funcionamiento de los procesos, es decir, en bajas eficiencias de remoción de contaminantes clave.

Con base en lo expuesto, en este trabajo se propone una metodología general para diseñar y operar, hasta la etapa de la ingeniería básica, los procesos de ozonación y de bioadsorción para el tratamiento de agua potable. La metodología propuesta se aplica a un caso real para realizar el análisis funcional de estos dos procesos instalados en una planta potabilizadora.

Esta tesis se constituye de tres capítulos principales. El capítulo 1 resume una revisión bibliográfica sobre los aspectos más importantes del principio, diseño y funcionamiento de los procesos de ozonación y bioadsorción con carbón activado.

El capítulo 2 presenta una metodología propuesta para diseñar y seleccionar los parámetros de operación de los sistemas de ozonación y de bioadsorción de una planta potabilizadora.

En el capítulo 3, aplicando parte de la metodología, se hace un análisis funcional de los equipos de estos dos procesos instalados en una planta potabilizadora. El análisis funcional se realizó, por una parte, mediante la caracterización de equipos y la determinación en

campo de sus condiciones de operación. Por otra parte, a través de muestreos y caracterizaciones fisicoquímicas del influente y efluente los reactores de ozonación y de bioadsorción.

Los resultados obtenidos permitieron identificar los puntos correctos y la deficiencias de las características y condiciones de operación de cada uno de los equipos integrantes de los sistemas de ozonación y de bioadsorción de la planta potabilizadora evaluada. En el caso de las deficiencias, se elaboraron una serie de recomendaciones para aumentar la eficiencia de los procesos.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones que se elaboraron durante el desarrollo de este trabajo.

CAPITULO 1

ESTUDIO BIBLIOGRAFICO: PROCESOS FISICOQUIMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

1.1 Ozonación

El ozono (O_3) es una forma alotrópica del oxígeno que se produce al pasar oxígeno seco o aire por una descarga eléctrica (5000 a 20,000 voltz, 50 a 500 Hz). El ozono, descubierto en 1878 por M. Von Marum. Es un gas azul inestable y altamente tóxico con un olor picante de heno recién cortado.

Es un poderoso agente oxidante así como un desinfectante con una gran tendencia a transformarse en oxígeno mediante una fuerte reacción exotérmica que frecuentemente tiene lugar con violencia explosiva. Es uno de los componentes del smog y es extremadamente corrosivo. Se forma en el espacio cercano al de las descargas eléctricas en la estratósfera, en las que se forma como consecuencia de la acción de la luz ultravioleta sobre el aire. En la tabla 2.1 se muestran las propiedades físicas del ozono.

TABLA 1.1 *Propiedades físicas del ozono.*

Peso molecular	48 gr/mol
Punto de ebullición (760 mm Hg)	111.9°C
Punto de fusión (760 mm Hg)	192.7+/- 2°C
Temperatura crítica	-12.1°C
Presión crítica	53.6 Kg/cm ²
Densidad crítica	0.437 g/l
volumen crítico	0.143
Densidad del gas (0°C)	2.144 g/l
Densidad del líquido (-183°C)	1.511 g/ml
(a-195.4°C)	1.614 g/ml
Tensión superficial(-183°C)	49.4 dinas/cm
Capacidad calorífica (-100°C)	43.4 KJ/ml°C
(a - 173°C)	32.2KJ/ml°C)
Constantes de Vander Waalls	a=3.545 Kg F/cm ² L ² mol ⁻² b=0.04903 L/mol

Es útil en la eliminación de color y en la remoción de sabores y olores. Como el oxígeno es ligeramente soluble en el agua se pierde rápidamente no dejando residuales de oxígeno en la misma. Lo que no sucede con el ozono.

1.1.1 Tratamiento de aguas mediante O₃

La utilización apropiada del ozono para el tratamiento del agua, permite obtener concretamente los siguientes resultados.

Eliminación de los sabores y olores, del complejo de hierro y manganeso.
Decoloración completa del agua.
Eliminación completa de los fenoles.
Disminución considerable del contenido de detergentes.
Esterilización completa del agua.
Inactivación de los virus.

1.1.2 Factores que influyen el proceso de ozonación

Características del agua a tratar:

Alcalinidad
pH
Sales (cloruros)
Temperatura
Dosis de reactivo
Tiempo de contacto
Tipo de reactor (batch, columna a contracorriente).

Debido a la ausencia de residuales de ozono en el sistema de distribución, puede haber un crecimiento biológico con sus problemas de color, sabor y olor. Tales crecimientos en el sistema de distribución se pueden evitar si se agrega una pequeña dosis de cloro después de la ozonación.

1.1.3 Componentes de los sistemas de ozonación

Los tres principales componentes de un sistema de ozonación son 1) La preparación y tratamiento del gas de alimentación al generador de ozono, 2) El generador de ozono incluyendo la fuente de poder y 3) Disolución del gas ozonizado en el agua de tratamiento. Existen otras consideraciones importantes como son la destrucción del gas de salida, materiales de construcción .

La selección del gas de alimentación puede estar regida por el proceso, disolución y otros requerimientos. El sistema de preparación del gas debe ser capaz de entregar un gas seco, libre de contaminantes al generador de ozono. Los componentes del sistema de preparación deben ser cuidadosamente seleccionados para tener un sistema que entregue un gas con la calidad requerida, a pesar del amplio rango de condiciones ambientales que puedan existir a lo largo del período de operación.

El generador de ozono y la unidad de fuente de poder son generalmente vendidos en paquete. Aunque los generadores de ozono que existen comúnmente en el mercado utilizan el mismo principio de generación, los detalles de los sistemas varían en el tipo y tamaño de módulos individuales de generación de ozono. El difusor de burbujas finas con multicompartimientos es el tipo más común que se emplea.

Tanto los costos iniciales de construcción como los de operación a largo plazo deben ser evaluados en la selección del sistema de disolución. La reducción de la concentración de ozono del gas de salida de las unidades de disolución debe ser considerada para proteger el personal, los componentes de la planta y el ambiente en general. Lo anterior es logrado mediante la instalación de un sistema de destrucción de ozono. La instrumentación y el control de sistemas de ozono se logran utilizando equipo y conceptos comunes de control. Sin embargo, es necesaria la instalación de sistemas para la medición de parámetros específicos como es el punto de rocío del gas de alimentación, la concentración de ozono en el gas a la entrada y a la salida, etc.

1.1.4 Generación de ozono

La generación de ozono se realiza mediante una descarga eléctrica, frecuentemente llamada descarga corona. Esta descarga es mantenida entre dos electrodos separados por un material dieléctrico (regularmente de vidrio y a veces de cerámica) y una corriente de aire, mediante la aplicación de un alto voltaje a través de los electrodos. A la frecuencia utilizada, el voltaje es mantenido a un valor de ionización del oxígeno lo que produce ozono.

El diseñador se enfrenta a la selección de un generador de ozono dentro de una gran variedad de tipos de unidades. Los generadores de ozono pueden ser descritos sobre la base de un gran número de parámetros.

Como son:

- Tipo de dieléctrico
- Frecuencia
- Modo del sistema de enfriamiento.

Los dieléctricos incorporados en generadores de ozono a gran escala incluyen a los de platos de vidrio, tubos de vidrio metalizado, y platos de cerámica. La frecuencia del generador ha sido generalmente agrupada en tres grandes categorías.

Frecuencia baja: 50 ó 60 Hz.

Frecuencia media: 60 a 1000 Hz

Frecuencia alta: > 1000 Hz.

En los de frecuencia baja se utiliza la frecuencia de la línea eléctrica normal como fuente de poder. Por ejemplo, esta podría ser de 60 Hz en Norte América y de 50 Hz en Europa. El modo de enfriamiento del generador es principalmente basado en agua pero puede ser también con aire, aceite y freón.

Los diferentes tipos de generadores de ozono pueden ser:

- Tubo horizontal, enfriamiento con agua, frecuencia baja.
- Tubo horizontal, enfriamiento con agua, frecuencia media
- Tubo vertical, enfriamiento con agua, frecuencia baja.
- Tubo vertical, enfriamiento agua, alta frecuencia.
- Plato vertical enfriamiento con agua, frecuencia baja.
- Plato vertical, enfriamiento con aire, frecuencia alta.

Los primeros generadores fueron los de tipo plato los cuales han caído en desuso por las siguientes razones:

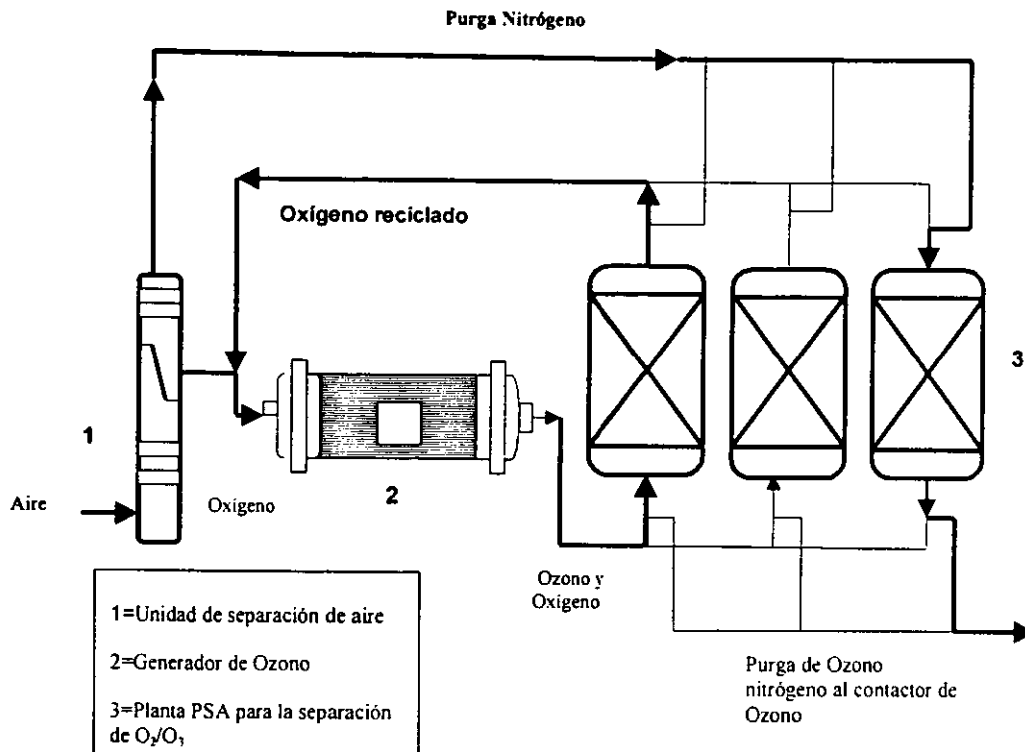
Baja producción por unidad de área de electrodo;
Dificultades de enfriamiento;
Construcción no confiable;

Hoy los generadores son de forma tubular ya sea de tubo abierto o tubo cerrado. El ozono es producido a partir de aire u oxígeno (o una mezcla de ambos) entre dos electrodos en el que hay un potencial de corriente alterna. Para asegurar una completa descarga, uno de los electrodos o ambos es cubierto con un material dieléctrico para formar una superficie equipotencial. La diferencia de potencial aplicado entre los dos electrodos dependerá de la naturaleza y espesor del dieléctrico usado y de la separación de los electrodos (garganta) y la presión de operación, el voltaje aplicado generalmente es de 6000 a 18000 Voltz.

Para una diferencia de potencial dado, la eficiencia del generador principalmente dependerá de la forma geométrica, de sus partes componentes de la temperatura y presión del plasma.

Para un generador, la producción de ozono dependerá de la potencia aplicada y del flujo del gas de alimentación. Bajo condiciones normales de presión y temperatura, la energía específica requerida para producir un Kg de ozono es de 13 a 18 KWh/Kg Para una concentración de 18 mg/L para aire y de 6 KWh/Kg para una concentración de 70 mg/L para oxígeno.

Una gran parte de esta energía es liberada como calor, la temperatura aumentará provocando la descomposición del ozono en oxígeno. Por esta razón es importante que el generador tenga un buen sistema de enfriamiento, que generalmente es agua. En la figura 2.1 se muestra una planta de generación de ozono.



Fuente: Riquarts y Leitgeb (1985)

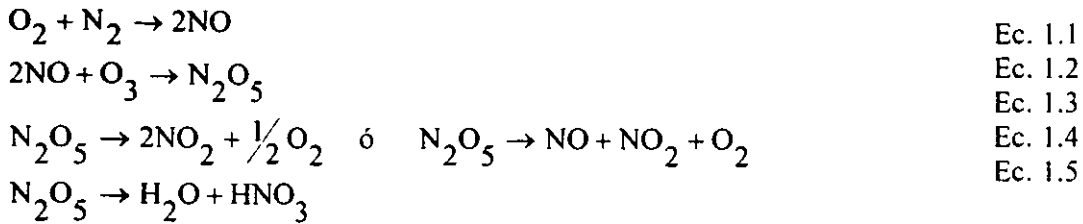
FIGURA 1.1 Planta generadora de Ozono con separación de O_2/O_3 por Adsorción oscilante de presión (Riquarts y Leitgeb, 1985).

1.1.4.1 Generación de ozono por descarga de corona

En el área de tratamiento de aguas, el método de descarga de corona es la técnica más común que se utiliza para la generación de ozono, a partir de una corriente seca de oxígeno. Una línea clásica de producción de ozono está compuesta por las siguientes unidades de proceso: fuente de gas (compresor); filtros de polvo, secadores, generadores de ozono, unidades de contacto y destrucción del gas de salida.

Es de vital importancia que se aplique un gas seco para el proceso de descarga de corona. Es importante limitar la generación de ácido nítrico para proteger los generadores, y para incrementar la eficiencia del proceso de generación. Con aire como gas de alimentación, y bajo varias condiciones de operación, una mol. de N_2O_5 puede producir hasta 100 moles de ozono.

El proceso se describe de acuerdo a las siguientes reacciones:



en operación normal, un sistema bien diseñado, produce máximo de 3 a 5 gramos de HNO_3 por Kg de ozono producido por aire. Si se incrementa el vapor de agua, se forman grandes cantidades de óxidos de nitrógeno cuando la descarga ocurre; también se forman radicales hidróxilo de la combinación de radicales oxígeno y ozono. Esto se indica por las siguientes reacciones, ambas reducen la eficiencia de generación de ozono



Las reacciones directas con NO_2 son posibles también:



Consecuentemente, el secado del gas de proceso, es de relevante importancia para obtener un rendimiento de producción de ozono. Más aún con aire, los óxidos de nitrógeno pueden formar HNO_3 , el cual puede causar corrosión.

La presencia de impurezas orgánicas en el gas de alimentación deber ser evitada, incluidas las impurezas que son arrastradas por la maquinaria; fugas en el sistema de enfriamiento, etc. A concentraciones de 1% en volumen prácticamente no se forma ozono. CFE (compuesto de fondo equivalente) e H_2 tienen efectos negativos en el rendimiento de la producción de ozono, otros gases como CO y N_2 pueden producir compuestos corrosivos (p ej. HNO_3), cuando se presentan en bajas concentraciones e incrementan ligeramente el rendimiento (del 3 al 10%).

La formación de ozono a través de una descarga eléctrica en el gas de proceso, se basa en una corona de descarga no homogénea en aire ó en oxígeno, donde hay numerosas microdescargas por las cuales se genera el ozono. Cada microdescarga sólo toma unos nanosegundos; el tiempo es más largo en aire que en el oxígeno (de 2.5 a 3 veces más), los rangos de densidad de corriente, van de 100 a 1000 A/cm^2 .

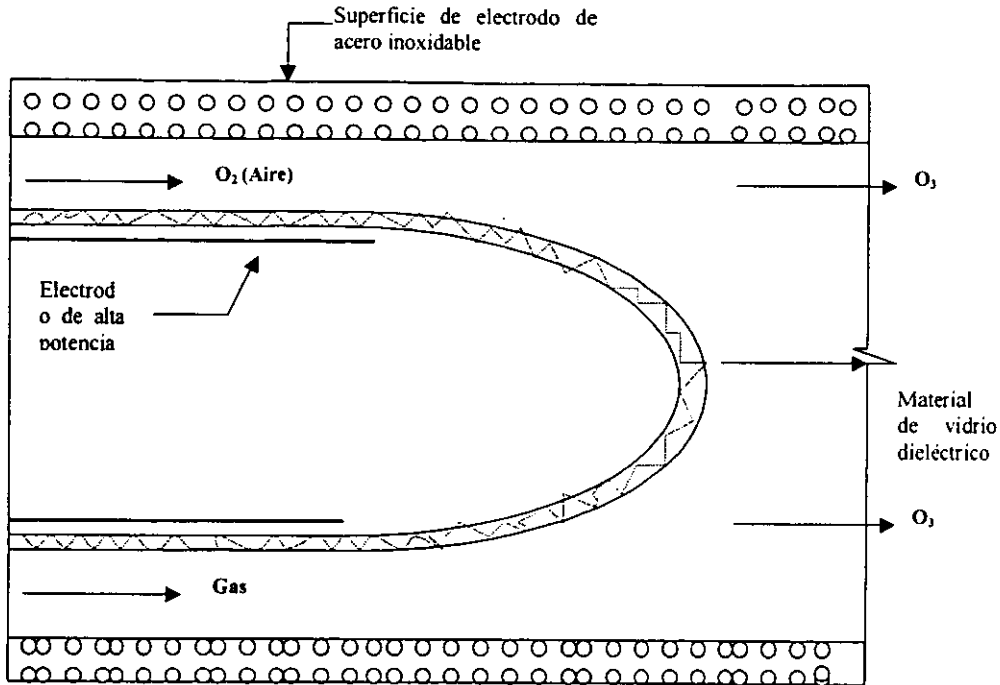
Las celdas de coronas industriales tienen un capacitor, debido a la abertura de la descarga y al material dieléctrico de la unidad (figura 1.2). La ecuación para la capacitancia total de la celda esta dada por:

$$\begin{array}{ll} C(f) = (2\pi \epsilon \epsilon_0 L) / \ln(r_e/r_i) & \text{y} \quad c(f) = \epsilon \epsilon_0 A/d \\ \text{geometría cilíndrica} & \text{planos paralelos} \end{array} \quad \text{Ec. 1.10}$$

donde:

r_e, r_i = radios exteriores e interiores del electrodo

- d = distancia entre electrodos
 L = distancia del electrodo
 A = Área del electrodo
 ϵ = Constante dieléctrica relativa
 C = Capacitancia (f)



Fuente: Langlais B. et al (1991)

FIGURA 1.2 Esquematización de la descarga en corona

El potencial conductor es función de la frecuencia (ν); por lo tanto:

$$V = V_0 \sin(2\pi \nu t)$$

Ec. 1.11

En la cual, V_0 = Potencial pico de la corriente aplicada

A un valor, V_s , la corona cae cuando empieza a hacer contacto (chispas). Valores para este caso se reportan en la literatura en V_s (voltz).

Para aire $V_s = 29.64 P_{dg} + 1350$

Para oxígeno $V_s = 26.55 P_{dg} + 1480$

Donde:

P = presión absoluta del gas, kPa

d_g = espesor de la garganta del gas, mm

La energía tomada por la corona de descarga es incrementada por dieléctricos delgados con altas constantes dieléctricas. Esto se logra incrementando el voltaje pico (máximo) e incrementando la frecuencia.

Las expresiones para calcular el rendimiento de la producción de ozono, pueden ser de diferentes tipos. Ciertas ecuaciones están en función de las moles consumidas de oxígeno, o en función de la energía consumida. Teóricamente, 2960 J (o 82 KW) pueden producir 1 g de ozono. El rendimiento es expresado a veces como G, este término es el número de moléculas producidos por 100 voltios consumidos de energía.

Valores de referencia para rendimientos del 100 %, son de 142.3 KJ/mol O₃, 2965 J/gO₃, 0.803 Wh/gO₃. La distancia en la garganta del gas de descarga es importante, los generadores clásicos de ozono (aire) tienen un espacio de 2.5-3.2 mm: En el caso de utilizar oxígeno a alta y media frecuencia el gas tiene un espacio de 1.0-1.5 mm de espesor.

Varios parámetros deben de ser considerados al diseñar un generador de ozono, basado en la corona de descarga, los parámetros relacionados con el gas de proceso son:

Secado y pureza

Presión

Temperatura

Tiempo de residencia en el espesor de la garganta

Los parámetros dieléctricos incluyen:

Voltaje

Intensidad

Frecuencia

1.1.4.2 Métodos Alternativos

Generación Fotoquímica de ozono

La formación de ozono a partir de oxígeno expuesto a luz UV a 140-190 nm fue estudiado en 1909 por Goldstein. Fue aprobado que la longitud de onda adecuada para la generación por esta técnica de los 200 nm; por ejemplo, a 185 nm de la línea de resonancia del Hg. Considerando la energía requerida para la formación endotérmica del ozono a partir de oxígeno (142 KJ/mol); teóricamente la luz de la longitud de onda menor de 842 nm puede formar ozono a partir de oxígeno .

Generación electroquímica de ozono

La generación electroquímica de ozono fue realizada por primera vez por Schönbein en 1840, cuando efectuaba la electrólisis de ácido sulfúrico. La simplicidad del equipo pueden hacer atractivo este proceso, para aplicarlo en plantas pequeñas ó para usuarios de áreas remotas. Muchas ventajas potenciales se pueden asociar a este sistema:

- el uso de corriente directa de bajo voltaje,
- no es necesaria una preparación del gas de alimentación,
- tamaño reducido del equipo,
- posible generación de ozono a altas concentraciones y,

Algunos problemas y desventajas asociados con este sistema son:

- Corrosión y erosión de los electrodos.
- sobrecarga térmica debida a un sobre voltaje anódico y a altas densidades de corriente,
- necesidad de electrodos especiales,

- para la generación *in situ*, formación de depósitos e incrustaciones.

Generación radioquímica de ozono

La irradiación de oxígeno a alta energía, mediante el uso de rayos radioactivos, puede promover la formación de ozono. El rendimiento de la generación de ozono es independiente de la fuente de ionización: α y β o neutrones emitidos por isótopos sencillos. El isótopo ^{137}C residual, producto de la fisión es una fuente potencial de irradiación que es aplicable en la generación de ozono en el tratamiento de aguas; pero el ^{60}Co y el ^{90}Sr pueden también ser utilizados. En sistemas estáticos con oxígeno a presión atmosférica y a $-78\text{ }^\circ\text{C}$, 0.5% en volumen de ozono (10 g/m^3 CNPT) puede ser obtenidos con una energía que va de 10 a 15 KWh/Kg

En un sistema cerrado de agua enfriada, en el cual el aire es circulado e irradiado: se obtiene un estado permanente de la concentración de ozono que es una función directa de la intensidad de irradiación. El sistema es operado a presiones mayores de 60 bar (870 psi), enfriando ($-20\text{ }^\circ\text{C}$) mejora el rendimiento del ozono. Un pequeño porcentaje de inyección de nitrógeno en el circuito aumenta el rendimiento. Concentraciones tan altas como 500 ppm en peso o 6 g/L (líquido) son obtenidas con un tratamiento térmico que mejora el procedimiento en un 10-12 %. Los mejores problemas en el proceso son la dificultad de remover los productos de fisión y la dificultad de condicionar la corriente gaseosa que contiene el ozono, haciendo la tecnología compleja.

Aún con el rendimiento termodinámico del proceso y el interesante manejo del tratamiento de fusión de isótopos. El proceso de generación quiminuclear de ozono no se ha vuelto de aplicación significativa en el tratamiento de aguas. Este hecho se confirma con sus complicados requerimientos.

1.1.4.3 Tipos de generadores

El ozono debe manufacturarse en el sitio (*in situ*) con el paso del aire seco por una descarga eléctrica de alto voltaje y alta frecuencia. Hay dos tipos principales de ozonadores, el tipo de placa con electrodos planos y dieléctricos de vidrio y el tipo tubo con electrodos cilíndricos coaxiales con cilindros de vidrio dieléctrico. El lado de alta tensión se enfría por convección y el lado de baja tensión por agua. El oxígeno pasa entre los electrodos y se ioniza por la descarga.

La producción de ozono es normalmente hasta un 4% del peso del aire, con una demanda de energía de 25 KWh/Kg de ozono producido. El ozono reacciona con la materia orgánica para formar ozónidos en ciertas condiciones.

1.1.4.4 Selección del gas de alimentación

Existe una gran variedad de gases de alimentación que pueden ser considerados para la generación de ozono: aire, oxígeno de alta pureza, oxígeno reciclado de alta pureza y aire enriquecido de oxígeno. Cada uno de estos gases posee sus ventajas dependiendo de los objetivos de la aplicación de ozono. La Tabla 1.2 siguiente resume las ventajas y desventajas de los diferentes gases de alimentación:

Ciertos factores deben ser considerados en la selección del gas de alimentación:

La producción proyectada a lo largo del período de operación.

Los aspectos específicos de la aplicación, entre los que se incluye:

- El agua cruda con una demanda inicial de ozono
- La oxidación de un compuesto clave
- Conservar una concentración residual durante un periodo específico.

La capacidad inicial y crecimiento proyectado de la planta.

La filosofía financiera de la agencia de operación.

TABLA 1.2 Gases de alimentación para los generadores de ozono (Langlais et al. 1991).

Gas	Ventajas	Desventajas
Aire	Sistema más común. Aplicabilidad para pequeños y grandes sistemas	Alto consumo de energía (Joule/KgO ₃). El mayor requerimiento de manejo de gas.
Oxígeno alta Pureza (General)	Dobla aproximadamente la capacidad de producción (Menor energía específica) Concentración de ozono más alta (5-8% en peso), por lo tanto mayor fuerza de transferencia de ozono. Menor requerimiento de manejo de gas.	Sensibilidad general (público y operadores) con respecto a la aplicación de oxígeno Requiere más atención en la seguridad y selección de materiales. Requiere especial atención en el diseño del contactor debido a los flujos bajos para el mezclado. Sistema posiblemente patentado.
Oxígeno alta pureza (Separación criogénica de aire)	Más factible para aplicaciones a gran escala.	Inversión importante para el sistema de preparación de gas. El sistema de preparación del gas es complejo para operación y mantenimiento

TABLA 1.2 Gases de alimentación para los generadores de ozono (continuación Langlais et al. 1989).

Gas	Ventajas	Desventajas
Oxígeno líquido alta pureza (LOX)	Es el más simple de todos los sistemas de alimentación. Menores costos de capital de todas las alternativas con generadores de alta eficiencia.	Costos variables de operación debido a la compra de LOX

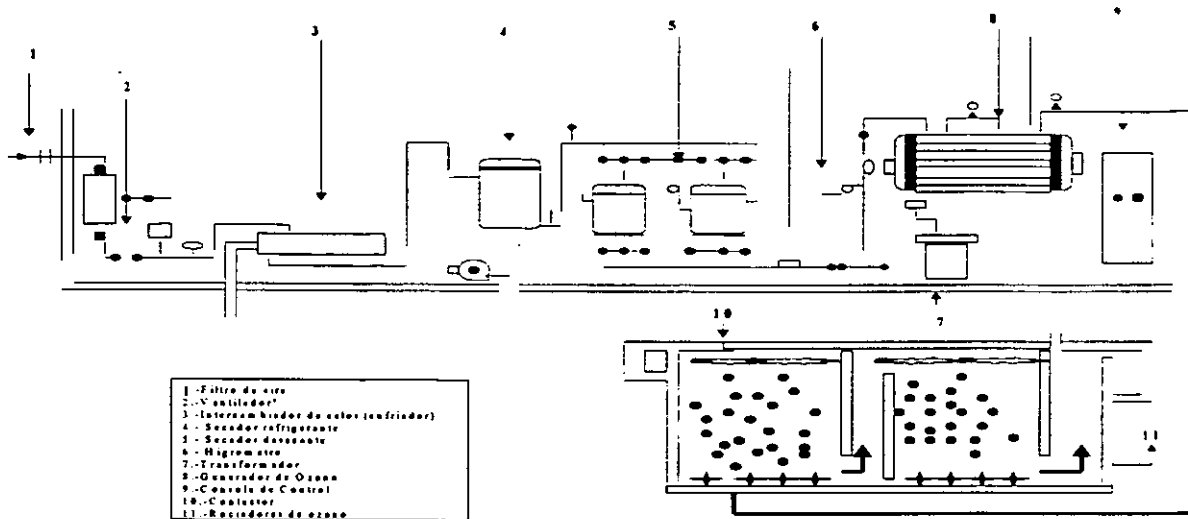
Oxígeno de alta pureza externamente reciclado.	Ahorros debido a la recirculación de oxígeno alta pureza. Energía específica media.	Consideraciones especiales en la preparación del gas para el manejo de contaminantes recirculados y altas concentraciones (O ₂) asociadas con costos de capital y de operación
Oxígeno de alta pureza internamente reciclado	Potencialmente concentraciones altas de ozono (> 10%)	
Aire enriquecido de oxígeno.	Costos de capital reducidos para picos a corto plazo de la demanda de ozono.	Hace más compleja la operación de la planta.

Aire

El aire seco y filtrado es el gas de alimentación más comúnmente utilizado en los sistemas de ozonación en todo el mundo. En Europa más del 99% de los sistemas de ozonación de agua potable emplean aire como gas de alimentación (Langlais, 1991).

Los factores que un diseñador debe tomar en cuenta en los sistemas de aire, como gas de alimentación son: el intervalo de la temperatura ambiente, la elevación de la zona, los intervalos de humedad, el contenido de partículas en el aire y las concentraciones de los hidrocarburos.

Estos sistemas de aire contienen un equipo de compresión de aire que descarga aire presurizado al equipo de secado. La presión de descarga depende del diseño completo del sistema de ozonación. El equipo de secado debe proveer el aire al punto de rocío de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-76\text{ }^{\circ}\text{F}$), dependiendo de la producción del generador de ozono y de los costos del ciclo de vida del equipo de secado. La mezcla de aire ozonado es posteriormente utilizado en el subsistema de disolución. El gas de salida es ventilado a un destructor de ozono, en donde el ozono remanente es transformado en oxígeno. Cabe mencionar que existe un sistema de instrumentación de monitoreo asociado al proceso y un equipo de control. En la figura 1.3 se ilustra uno de los diferentes sistemas para la preparación de aire típico en un sistema de ozonación.



Fuente: Miller et al (1978)

FIGURA 1.3 Sistemas para la preparación de aire de alta presión.

Oxígeno de alta pureza

La producción de ozono se incrementa con el aumento de la concentración de oxígeno del gas de alimentación y podría reducir el número de generadores de ozono o, en su defecto, el tamaño de los generadores que son requeridos para el sistema. Sin embargo, el capital o los costos de operación para los sistemas de alimentación de oxígeno deben ser incluidos en el análisis de costos.

A medida que el tamaño del sistema de ozonación aumenta, un punto puede ser alcanzado en donde los costos totales de un sistema que funcione con oxígeno de alta pureza sean menores a los de un sistema que emplee aire.

El uso de oxígeno permite obtener concentraciones de ozono en el gas de dos a cuatro veces mayores a las obtenidas con aire. Lo anterior tiene un efecto importante sobre el diseño del sistema de disolución de ozono. Una atención especial debe darse al equipo de enfriamiento del generador, ya que si no se tiene un buen intercambio de calor, es difícil alcanzar altas concentraciones de ozono con razonables niveles de energía específica de corona.

1.1.4.5 Calidad del gas de alimentación al generador

La calidad del gas de alimentación es crítica para el buen desempeño de cualquier sistema de generación de ozono. Para una exitosa operación, con un mínimo mantenimiento, el gas de alimentación ya sea aire u oxígeno, debe ser extremadamente seco, libre de partículas, hidrocarburos, y otros contaminantes, y relativamente frío. Esa es la función del sistema de preparación del gas de alimentación.

La humedad tiene un impacto importante sobre la producción de ozono, ya que puede reaccionar con los óxidos de nitrógeno para formar ácido nítrico y causar un daño al generador por corrosión. El contenido de humedad se expresa por el punto de rocío (temperatura a la cual la humedad empieza a condensar fuera del gas). Puesto que un gas

frío tiene menor capacidad de retención de humedad a un punto de rocío bajo, éste tendrá un menor contenido de humedad.

El punto de rocío deber ser establecido a presión ambiente. debido a que la capacidad de retención de humedad varía inversamente con la presión. En aplicaciones de ozono, el punto de rocío deber ser extremadamente bajo. Hoy los sistemas de ozono estén siendo diseñados y operados a -80°C , para propósitos prácticos. -60°C se consideran como aceptables y para propósitos de diseño, un valor más pequeño que éste debe obtenerse. La remoción de humedad se realiza a través de una compresión, enfriamiento y secado.

Las partículas y otros contaminantes (ya sea orgánicos o inorgánicos) causan problemas en diferentes puntos a lo largo del sistema de ozonación; los compresores deber ser protegidos con filtros, los desecadores deben ser protegidos de polvo e hidrocarburos los cuales bloquearían los poros, por lo tanto, se reduciría la capacidad de retención de humedad, y puesto que el generador actúa como un precipitador electrostático, partículas e hidrocarburos atacarían la superficie dieléctrica. Finalmente los difusores de burbujeo (en caso de ser usados) deben ser protegidos para evitar que se tapen.

Típicas partículas de origen inorgánico son: arena, polvo, hollín, etc.; en cuanto a las de origen orgánico tenemos el polen, semillas de algodón y otras partículas similares. Los hidrocarburos pueden estar presentes en la atmósfera de grandes áreas metropolitanas. El mejor método para eliminar partículas es el uso de filtros. Estos sistemas deben colocarse antes del compresor, y antes y después de los desecantes; para eliminar partículas entre 0.05 y $0.1 \mu\text{m}$.

1.1.4.6 Sistemas para la preparación del gas de alimentación

Los sistemas de preparación de gas de alimentación se clasifican de acuerdo a la presión de operación en el punto de descarga del compresor:

Presión negativa

Baja presión (menor de 1 bar)

Presión media (menor de 4 bar)

Presión alta (más de 4 bar)

Los sistemas más comunes son los de baja presión. Los sistemas de presión negativa son diseñados para operar en conjunto con cotactores de turbina, donde el mecanismo de inyección crea un vacío sobre el sistema de gas de alimentación, para lo cual se utiliza un eductor o un inyector. La decisión de usar un sistema de baja o alta presión depende de una evaluación cualitativa de los requerimientos de mantenimiento en adición a los costos de capital.

En la figura 1.4 se presentan los componentes de un sistema de preparación del gas de alimentación. El enfriador y el secador por refrigerante son mecanismos de enfriamiento y sirven para remover humedad y pueden ser usados indistintamente. El gas comprimido y enfriado es dirigido a un prefiltro desecante el cual es usado para remover polvo y partículas de 3 a 5 micras de diámetro, esto reduce el taponamiento en el medio desecante. El componente más importante del proceso de tratamiento es el desecador el cual consiste de dos columnas conteniendo un medio que absorbe humedad. Una columna opera mientras la otra esta siendo regenerada. Los filtros después del desecador son instalados

para remover partículas más pequeñas de 0.3 a 0.4 micras de diámetro. La diferencia entre los sistemas de baja y media presión es el uso de una válvula de reducción de presión en la línea de alimentación entre el post-filtro y el generador, y la diferencia entre los sistemas de baja y alta presión es el método de regeneración en el desecador.

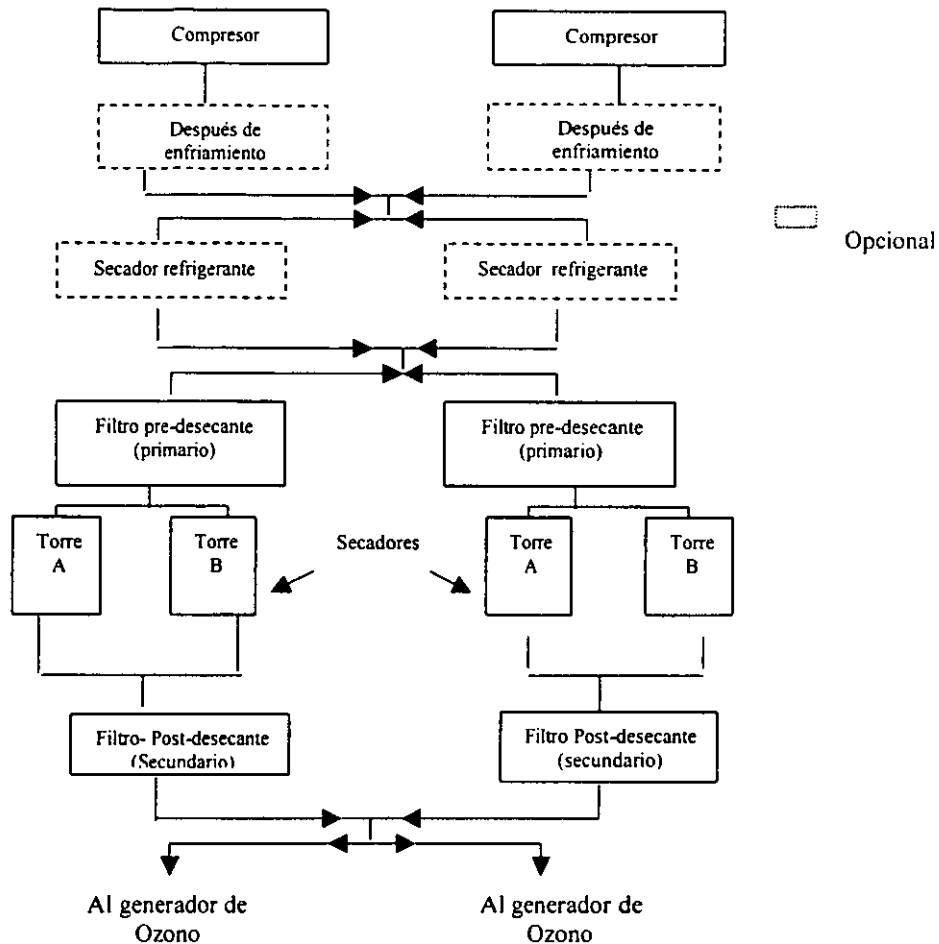


FIGURA 1.4 Sistema para la preparación del gas de alimentación.

1.1.5 Cámaras de contacto y sistemas de difusión

1.1.5.1 Consideraciones Generales

El ozono se encuentra generalmente presente en el gas de "acarreo" en concentraciones relativamente bajas. Este oxidante debe ser transferido de la fase gaseosa a la líquida para poder realizar su acción sobre los contaminantes. En este proceso se debe de maximizar la transferencia para que sea económicamente viable.

Las unidades de disolución / contacto varían, en función de la aplicación, en el diseño, condiciones de operación, funciones específicas del ozono en los diferentes puntos de aplicación etc. En algunos casos, incluso el tipo de generador condicionara el tipo de contactor. Sin embargo, es más lógico que el propósito de la ozonación determine la selección del generador de ozono y el gas de alimentación.

El tipo de reacción en la que esta involucrado el ozono determina la selección del tipo de contactor. La etapa limitante del mecanismo de transferencia de masa normalmente determina la transferencia de la máxima cantidad de ozono, en el mínimo de tiempo, para la viabilidad económica de la operación y construcción del sistema.

Difusión de altas concentraciones de ozono (entre 6 – 8% (87.6 a 116.8 g/m³ NTP)) requiere un diseño muy cuidadoso del contactor para realizar una distribución uniforme del gas ozonado dentro de la masa de agua.

Técnicas de disolución de ozono.

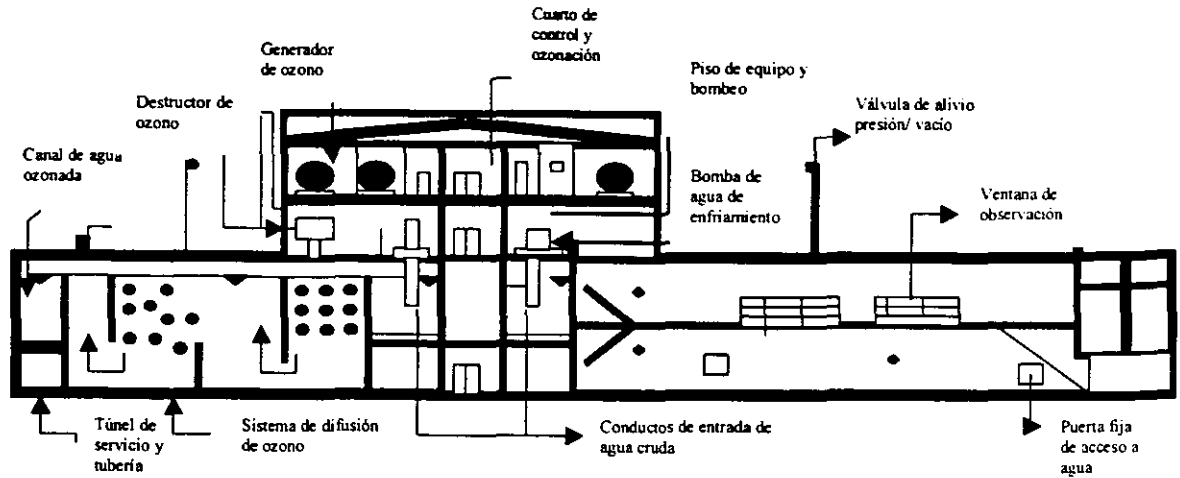
Un gran número de técnicas están disponibles para la disolución de ozono en el agua a tratar; entre algunas de estas se incluyen:

1. - Difusores convencionales de burbuja fina.
2. - Mezcladores de turbina.
 - Presión de gas positiva.
 - Presión de gas negativa.
3. - Inyectores.
 - Presión de gas positiva.
 - Presión de gas negativa.
4. - Columnas empacadas.
6. - Técnicas desarrolladas recientemente.
 - Contactores de tubo en U.
 - Contactores con difusores de plato poroso.
 - Mezcladores estáticos (altamente eficaces para la transferencia de ozono).

1.1.5.2 Difusores convencionales de burbuja fina

El contactor con difusores convencionales de burbuja fina, es el tipo más ampliamente utilizado en sistemas de transferencia de ozono, debido a que opera sin adición extra de energía a la requerida para la compresión del gas. Esta técnica no es nueva ya que este tipo de difusores ha sido utilizado durante muchos años para la transferencia de oxígeno, tanto en tratamiento de aguas potable e industrial, para la aireación de reactores. Hasta el momento, 34 plantas de agua potable en los Estados Unidos de Norteamérica cuentan con difusores de burbuja fina para la disolución de ozono.

En Europa, donde la ozonación ha sido aplicada desde hace más años que en los Estados Unidos de Norteamérica, el contactor con difusores de burbuja es el tipo más utilizado. Existe un gran número de configuraciones para este tipo de contactores, encontrando reactores desde una hasta seis etapas. Las figuras 1.5 y 1.6 ilustran el diseño de difusores de burbuja fina en las plantas de tratamiento de aguas en los Estados Unidos.

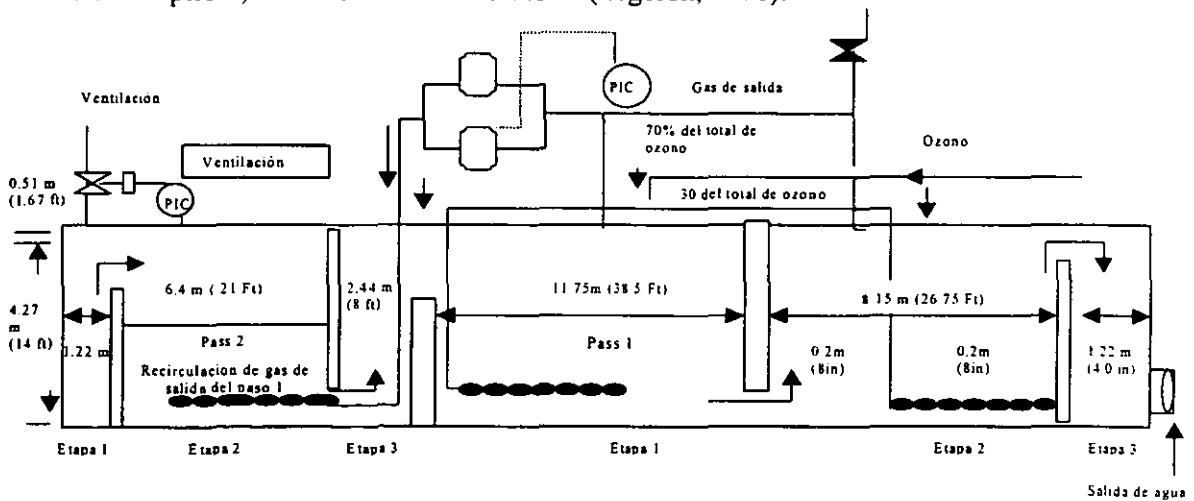


Fuente: MWDSC (1988)

FIGURA 1.5 Contactor de ozono de la planta de filtración acueducto en los Angeles, California.

En los Estados Unidos de Norteamérica, los contactores de ozono usados para el tratamiento de aguas cuentan con dos o tres cámaras de oxidación por unidad, dependiendo del objetivo de la ozonación. Entre las “reglas de dedo” que existen, se encuentra:

- Si el objetivo de la ozonación es realizar una reacción de transferencia limitada de masa, como la oxidación de hierro y manganeso, se recomienda instalar mínimo dos cámaras por contactor. Estas reacciones pueden ser muy rápidas y el tiempo óptimo (mínimo) de contacto debe ser necesariamente determinado a partir de pruebas en un sistema piloto, mínimo a nivel laboratorio (Legeron, 1978).



Fuente: LePage (1981)

FIGURA 1.6 Contactor de ozono en el Monroe Water Works, Monroe, Michigan

Una de las ventajas más importantes de los sistemas con difusores convencionales de burbuja fina, es su alta eficiencia de transferencia y oxidación. Adicionalmente, no requiere energía adicional para operar ya que el gas ozonado es normalmente descargado a

una presión de 10-15 psig (0.69 a 1.03 bares), la cual es suficiente para vencer la carga hidrostática y las pérdidas de fricción provocadas por el transporte del gas a través de las tuberías y los difusores.

Los difusores son de dos tipos: tubulares y de disco, ambos de acero inoxidable.

Ventajas y Desventajas de los Sistemas con Difusores de Burbuja

Una de las mayores ventajas para utilizar un sistema de difusión de burbuja convencional para la ozonación, es que ha sido ampliamente utilizado en la tecnología, y por varios años ha sido demostrada su eficiencia. Además de que no se requiere del empleo de energía adicional para una operación efectiva. El gas ozonado es normalmente descargado del generador de ozono a una presión de 10 a 15 psig (0.69 a 1.03 bar), el cual es suficiente para sobrellevar la pérdida de fuerza hidrostática, debido a una distribución del gas caliente en los difusores.

-No presentan partes móviles: Los requerimientos de mantenimiento son mínimos: porque no hay partes móviles asociadas con este tipo de sistemas de difusión.

-Efectivo medio de transferencia de ozono: Presentan gran eficiencia de transferencia de ozono del 99%, esta generalmente asociada con el sistema de difusión de burbuja.

-El escalamiento no es problema. Porque los difusores de burbuja fina convencionales son ampliamente usados y están basados en una tecnología conocida, el escalamiento del contactor del tamaño de demostración al escalamiento industrial (aproximadamente 94.635 m³/h) no presentaría problemas en su diseño.

Pérdida de carga hidráulica baja: El diseño puede estar estructurado para disponer una comparativamente la pérdida de fuerza baja a través de los tanques.

Desventajas

La profundidad del reactor de contacto es de 5.49 a 7.31m es requerida para realizar una efectiva transferencia de ozono.

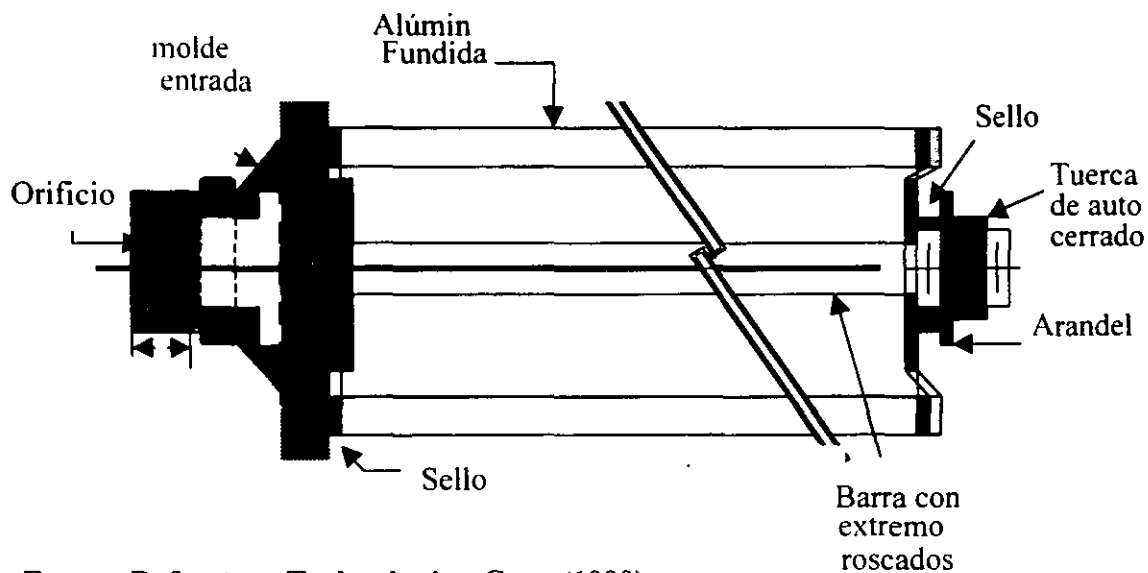
- Es posible el taponamiento de los poros de los difusores, particularmente cuando el flujo de agua y aplicando una dosis de ozono es intermitente o cuando la oxidación de hierro y manganeso son requerida. Dependiendo de la calidad del agua, el taponamiento de los poros del difusor, por la precipitación de los metales representa un problema potencial.

-El canal vertical de las burbujas es posible. Dependiendo del flujo del gas a través del difusor y el espacio de los difusores, el canal vertical de las burbujas puede presentarse, afectando adversamente el contacto entre el gas-líquido.

1.1.5.3 Difusores tipo tubo / barra

Los difusores de ozono tubulares o de barra frecuentemente utilizan contactores para la ozonación de burbuja fina.

La figura 1.7 muestra un difusor típico de barra.

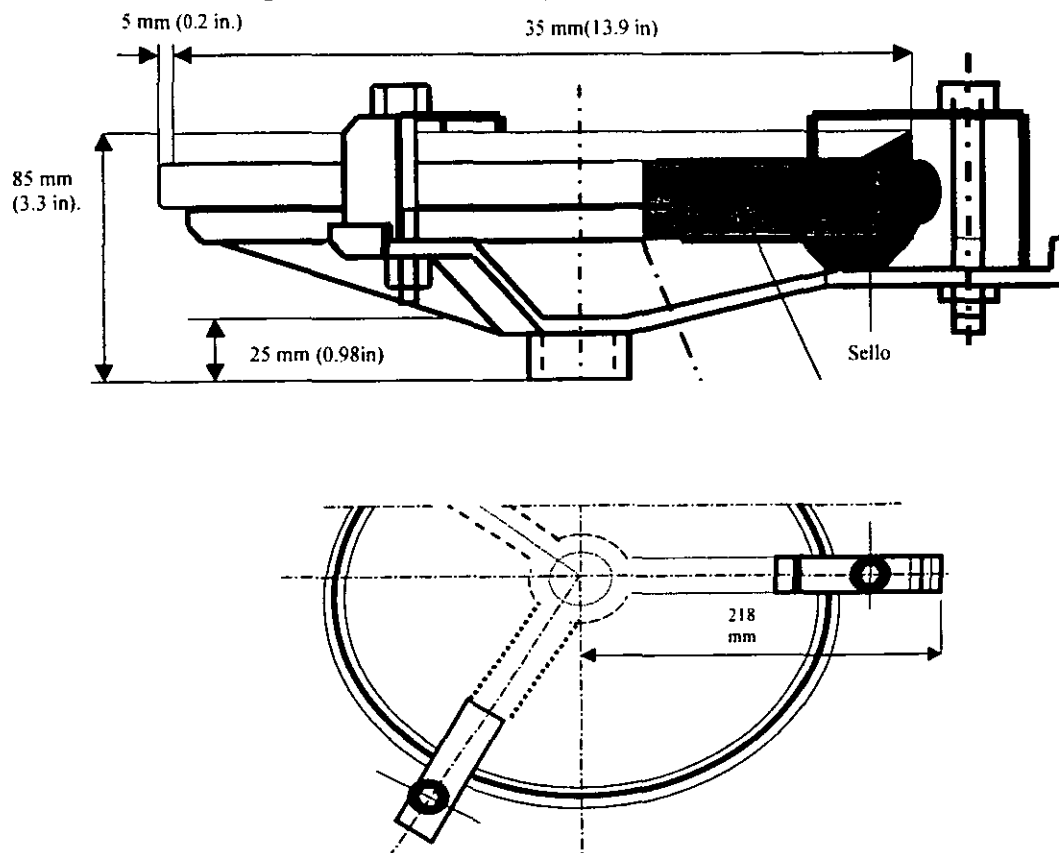


Fuente: Refractron Technologies Corp.(1990)

FIGURA 1.7 Detalle difusor de ozono de tipo tubo / barra.

1.1.5.4 Difusores tipo disco

Los difusores tipo disco, se presenta como una alternativa común de los difusores tubulares de ozono. La figura 1.8 muestra un típico difusor de disco.

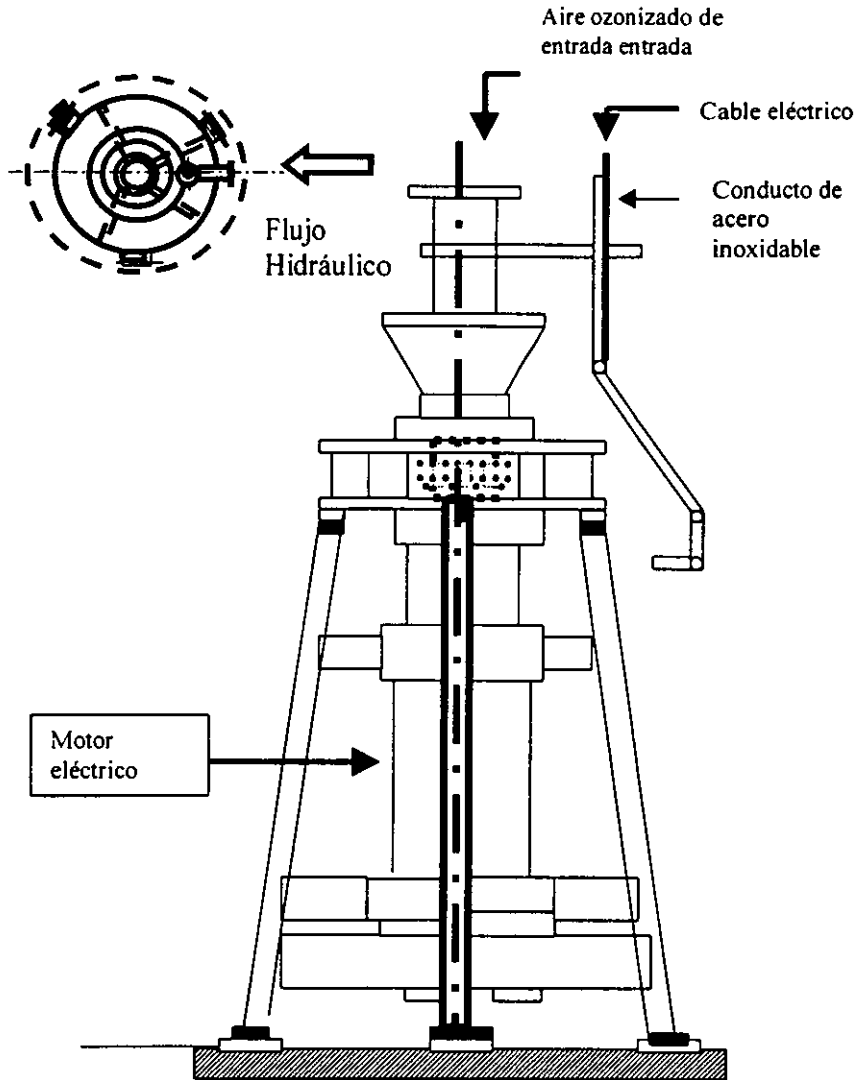


Fuente: Trailigaz (1990)

FIGURA 1.8 Detalle de un difusor de ozono tipo de disco

1.1.5.5 Contactores de turbina

Los contactores de turbina son sistemas que se utilizan también frecuentemente en diferentes plantas de tratamiento de agua en todo el mundo. La figura 1.9 presenta una típica turbina de aspiración sumergida.



Fuente: Trailigaz (1990)

FIGURA 1.9 Ejemplo de una turbina sumergida de succión.

A diferencia de los contactores con difusores de burbuja fina, los de tipo turbina requieren de alimentación de energía para su operación. Se estima que estos sistemas requieren el consumo de diez veces del valor de energía necesaria para difusores de burbuja fina.

La principal consideración para el diseño de turbinas es el requerimiento de energía para mantener una tasa de flujo constante, a pesar de las variaciones de flujo de agua dentro del contactor.

Las ventajas de los contactores de turbina incluyen:

- La Transferencia de ozono del gas al líquido que puede incrementarse por un tamaño pequeño de burbuja, el cual se obtiene por la gran turbulencia en el agua por la acción de las turbinas.
- Las turbinas pueden utilizarse para obtener tanto el contacto y el mezclado rápido en una cámara.
- La aplicación de turbinas reduce los problemas de taponamiento de los accesorios para la difusión (ejemplo, aguas con alto contenido de hierro y manganeso).

Las desventajas asociadas con el uso de contactores de turbina se enlistan a continuación:

- Los contactores de turbina requieren de una fuente de energía.
- A velocidad de flujo del gas es constante y puede ser mantenido, prescindiendo de las fluctuaciones en el flujo del agua, dando como resultado un decremento en la eficiencia de transferencia.
- Los requerimientos de mantenimiento para una turbina, totalmente sumergida podrían presentar problemas.

Existen dos tipos de contactores por turbina, en el primer tipo, el agua a ser tratada es alimentada en el área de succión de una turbina la cual envía el agua hacia abajo en dirección opuesta al flujo del gas que esta siendo inyectado hacia arriba. Esto produce una emulsión del gas y del agua. Todo el agua que se va a tratar esta en contacto varias veces con la turbina para asegurar un buen mezclado.

El segundo tipo de contactor utiliza una turbina con un motor sumergido localizado en la base del contactor. La velocidad de rotación de la turbina debe coincidir al flujo del aire de ozonado.

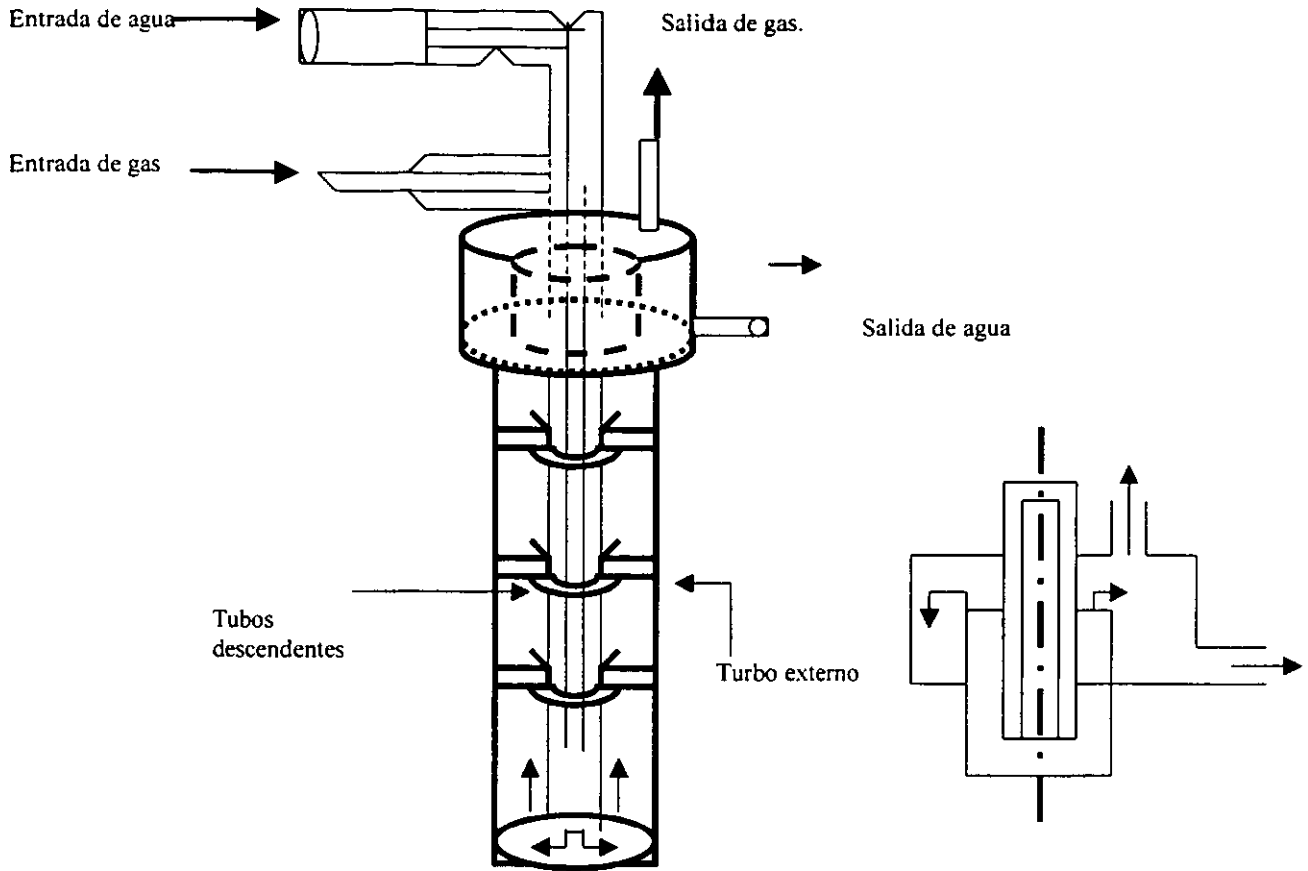
1.1.5.6 Contactores de tubo en U

Consideraciones de la ingeniería química dictan que la mayor transferencia de ozono-agua tomará lugar usando una presión alta y gran superficie de intercambio. Sobre estos argumentos se fundamenta el contactor en U.

Los contactores en U consiste de dos tubos concéntricos, el agua primero fluye por el tubo interno donde es inyectado el gas en su trayecto, hasta que llega a la base y regresa hacia arriba por el tubo externo, describiendo una trayectoria en U. Los parámetros que gobiernan el tamaño de un sistema de tubo en U son:

- La velocidad hacia abajo en el tubo interno
- La relación entre el flujo de gas a líquido
- La caída total de presión en el sistema

El contactor en U es ideal para preozonación y para usar altas concentraciones de ozono en el gas de alimentación. El diagrama esquemático de este tipo de contactores es mostrado en la Fig. 1.10.



Fuente: Roustan et al. (1987)

FIGURA 1.10 Esquema de un contactor profundo en forma de U.

1.1.5.7 Selección de contactores

Si predominan reacciones rápidas, la velocidad de transferencia de ozono será el factor limitante y un alto coeficiente de transferencia será requerido; los contactores disponibles en este caso son tubos en U.

Si las reacciones lentas predominan, la reacción por sí mismo será el factor limitante, en este caso los contactores por difusión de burbujeo podrían ser usados, con o sin agitación mecánica.

El contactor de ozono es probablemente el elemento más importante para una instalación; la combinación de la cámara de contacto y el mecanismo de difusión, determina la eficiencia de transferencia de ozono. El objetivo del diseño es maximizar la transferencia del gas a la fase líquida.

La eficiencia de transferencia (ET) de ozono se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia de transferencia} = (Y1 - Y2)/Y1 * 100$$

donde:

Y1 = Concentración de ozono en fase gas en la entrada al contactor

Y2 = Concentración de ozono en fase gas en la salida del contactor

Ozono aplicado: $D = Y1 * (Q_g/Q_L)$

Ozono absorbido: $T = D * ET = (Q_g/Q_l) * (Y1 - Y2)$

Q_g = Flujo del gas

Q_L = Flujo del líquido

La experiencia demuestra que ET (eficiencia de transferencia) es más sensible a cambios en el flujo de gas que a la concentración en el gas portador. Esto es importante, puesto que un incremento en el flujo de gas al flujo de líquido podría no resultar en un incremento de ozono absorbido.

Los factores que afectan la ET son: presión, temperatura, tamaño de burbuja, características de flujo del reactor, concentración de ozono y demanda de ozono en el agua.

Factores de la calidad del agua que afectan a la Eficiencia de Transferencia (ET)

- a).- La ET disminuirá a medida que la dosis de ozono se incremente;
- b).- La ET se incrementará cuando la calidad del agua se deteriora, esto incrementa la demanda de ozono;
- c).- La ET se incrementará a medida que la calidad química del agua favorezca la presencia de radicales hidróxilo, por ejemplo el pH alto o baja alcalinidad;

Características del contactor que afectan la ET

Estas características son las más importantes para el ingeniero de diseño, debido a que el comportamiento hidráulico y la profundidad óptima del difusor son importantes en la ET.

Para plantas localizadas al nivel del mar, la profundidad del contactor para difusores debería ser de 5 a 6 m. Para un difusor de disco poroso de 0.04 m^2 el flujo no debería ser excedido de $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Cada uno de estos discos deber ser sujetos con soportes de acero inoxidable y sellados con materiales resistentes al ozono como Teflón por ejemplo. Los difusores deberían producir burbujas de 2-3 mm de diámetro.

Deben tener buena permeabilidad. Los discos generalmente están localizados de 15 a 30 cm de la base del contactor. Es importante que el flujo del gas se oponga a la dirección del flujo del líquido y la localización de los difusores. El punto inicial de aplicación de ozono requerirá más difusores.

El flujo a través del contactor debería aproximarse a condiciones de flujo pistón, esto minimiza o elimina corto circuitos, el cual crea zonas muertas o tiempos de contacto reducidos. Un valor conservador para el tiempo de contacto a un flujo pico debería basarse en la primera aparición de una sustancia trazadora.

1.1.6 Destruidores

Estos sistemas son una parte vital debido a la imposibilidad de ventear los gases de escape en el contactor. El ozono es extremadamente tóxico, cuando entra una cantidad considerable a los pulmones, este afecta a los tejidos inmediatamente, por estas razones los destructores son parte importante de un equipo de ozonación.

La concentración máxima en el ambiente permitida es de 0.1 ppm, esta concentración es significativamente menor que la concentración en el gas de escape del contactor.

Los métodos actuales para la eliminación del ozono de los contactores son:

- a).- Destrucción térmica
- b).- Destrucción catalítica-térmica
- c).- Destrucción catalítica

El carbón activado ha sido utilizado con consecuencias desastrosas. El ozono reacciona con el carbón para formar un carbón polvoriento que es altamente explosivo, por lo tanto nunca debe ser utilizado.

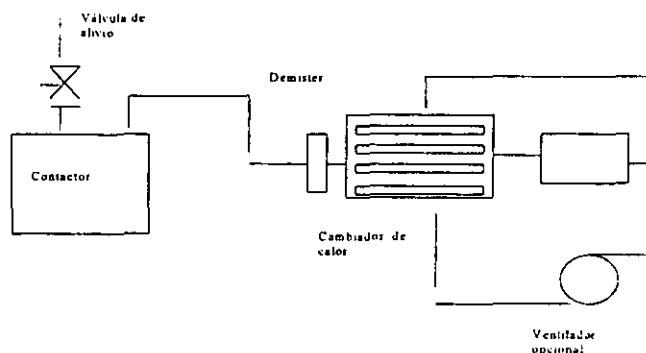
1.1.6.1 Destrucción térmica

Este método nunca es usado en sistemas alimentados con oxígeno debido a que este se incendia fácilmente. La destrucción térmica del ozono, involucra el calentamiento del gas a alta temperatura el cual es mantenido por un tiempo predeterminado. A temperaturas de 299 a 348 °C, mantenido por tres segundos, es necesario para llevar a cabo un 99% de destrucción. En la figura 1.11 se presenta una unidad de destrucción térmica.

Debido a que altas temperaturas están involucradas, las unidades de recuperación de calor son proporcionadas para estos sistemas.

Los gases antes de pasar al equipo de destrucción, pasan por una válvula de alivio para reducir la presión en los gases y evitar algún daño estructural en el equipo.

FIGURA 1.11 Unidad de destrucción térmica.



1.1.6.2 Destrucción catalítica y catalítica-térmica

De acuerdo al esquema, los gases pasan a través del demister (litro) antes de entrar a la unidad.

Catalizadores metálicos están siendo ahora usados, ya que son más activos que los óxidos metálicos. Metales como platino finalmente dividido a paladio pueden operar a temperaturas tan bajas como 30 °C. La temperatura requerida es mucha más baja que para los sistemas de destrucción térmica.

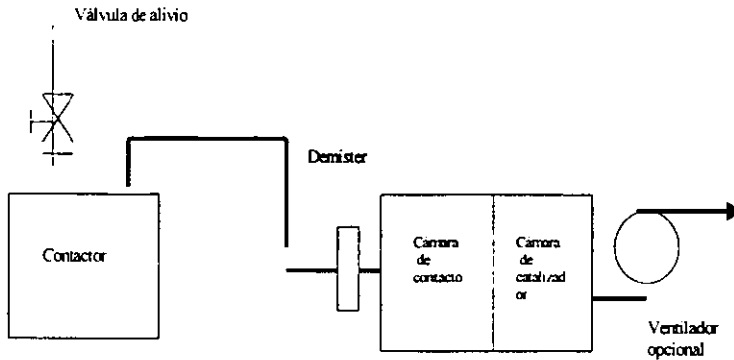


FIGURA 1.12 Unidad de destrucción catalítica / térmica.

1.1.6.3 Instrumentación y sistemas de control

Los métodos de control de los sistemas de ozonación son:

Control de la producción de ozono en función del flujo de agua a tratar
 Control de producción de ozono en función del residual de ozono en el agua
 Control de ozono en función del flujo y del residual de ozono en el agua

Control de la producción de ozono en función del flujo de agua a tratar.

El sistema de control más básico es el que se basa exclusivamente en el flujo del agua a tratar, con la dosificación de ozono, previamente determinada en pruebas de laboratorio.

1.2 Bio-adsorción en columnas de carbón activado

1.2.1 Importancia del proceso biológico en el tratamiento de aguas

Debido a su gran capacidad de absorción, el carbon activado posee propiedades como purificante, decolorante y algunos efectos de desodoracion

El carbón activado provee un método efectivo para remover una amplia gama de compuestos orgánicos y puede ser considerado en la remoción de subproductos de la desinfección y precursores orgánicos

El fenómeno de adsorción es mejorado por la naturaleza del poro del carbon activado el cual proporciona una gran superficie interna sobre la cual la adsorción puede llevarse a cabo.

El proceso de absorción consiste, en términos generales, en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución. Esta interfase puede hallarse entre un líquido y un gas, un sólido, o entre líquidos diferentes

La adsorción es un proceso de separación en el cual ciertos componentes de una fase gaseosa o líquida son transferidos selectivamente a la superficie de un adsorbente sólido

En 1970, Weber había discutido las desventajas del carbón activado biológico, las cuales pueden ocurrir por la presencia de poblaciones biológicas en la superficie del adsorbente.

Rice *et al.* fueron los primeros a proponer el término de Carbón activado biológico (CAB) para designar los sistemas de tratamiento donde la actividad biológica (generalmente aerobia) es deliberadamente promovida sobre el carbón activado en granos.

Este término se puede emplear para referirse a la adsorción con carbón activado precedida por una oxidación química (para favorecer la biodegradabilidad de compuestos orgánicos) ó simplemente para designar las instalaciones de carbón activado donde la actividad microbiana es muy importante (Prevost, M.O, 1990).

El desarrollo de una actividad biológica sobre materiales filtrantes es conocido desde hace tiempo, en particular en el interior de filtros de arena utilizados para la potabilización de agua. En esos filtros, ciertas materias orgánicas, el nitrógeno amoniacal, el fierro y el manganeso son transformados por microorganismos (Benedek y Richard, 1989).

Weber (1980) y Sontheimer *et al.* (1978) observaron que la actividad biológica desarrollada en los filtros de carbón activado permitía eliminar más sustancias orgánicas que la cantidad que el carbón activado podía adsorber.

También observaron en sus estudios un desprendimiento de dióxido de carbono. Observaciones en microscopio electrónico de barrido confirmaron formalmente un desarrollo bacteriano sobre la superficie del carbón activado de filtros (Weber *et al.* 1978; Gaid, 1979; Lafrance *et al.* 1983).

La presencia de una actividad biológica en el seno de sistemas de carbón activado en grano se manifiesta y puede ser detectada principalmente por:

- Eliminación importante de materia orgánica después de un período teórico de saturación de filtros.
- Observación de concentraciones importantes de bacterias sobre la superficie de los granos.
- Disminución de la concentración de oxígeno disuelto, eliminación de sustratos marcados y/o producción de dióxido de carbono (Glaze y Lin, 1986).

El estudio de la eliminación de compuestos orgánicos en unidades de carbón activado donde se ha desarrollado una actividad biológica es bastante complejo pues pueden presentarse simultáneamente varios mecanismos de interacción entre la adsorción y la biodegradación (DeLaat, 1988).

El principal problema que se presenta en el seguimiento del funcionamiento de los sistemas de carbón activado asistidos biológicamente reside en la dificultad de diferenciar las cantidades de contaminantes que se eliminaron por adsorción, por biodegradación, y por combinación de ambas. Con el fin de diferenciar estos procesos de eliminación unos de otros, varios autores han propuesto diversas estrategias de estudio.

Una de estas técnicas consiste en estudiar la eliminación de substratos orgánicos comparando el funcionamiento en paralelo de columnas empacadas con un material no adsorbente y con carbón activado, respectivamente. En la primera se favorece únicamente el desarrollo de una biodegradación y en la segunda se presentan ambos mecanismos, adsorción y biodegradación (Chang y Rittman, 1987; Le Cloirec, 1983).

Probablemente, la técnica más empleada es aquella en la que se compara el funcionamiento de columnas de carbón activado funcionando unas en condiciones estériles y otras en condiciones totalmente bióticas (De Laat, 1988; Speitel y Zhu, 1990; Olmstead y Weber, 1991).

A pesar de que extensos trabajos teóricos y prácticos han sido realizados, los factores y relaciones que gobiernan el mecanismo de remoción de sustancias orgánicas bajo condiciones normales no han sido totalmente comprendidos. Por lo que, no es posible dar una descripción completa y general de los mecanismos que controlan la eficiencia del filtro. Esto se debe a dos razones principales:

1. Los cambios en la calidad del agua, frecuentemente encontrados cuando el agua de superficie es usada, y puede causar un impacto considerable en el comportamiento de adsorción. La oxidación con ozono también puede afectar la biodegradación de sustancias presentes en el agua.
2. La acción simultánea de biodegradación y adsorción provoca un incremento en la complejidad del proceso. Durante la biodegradación, la adsorción de las sustancias puede cambiar, y remover productos de actividad bacteriana. La biodegradación de materiales, los cuales han sido adsorbidos, puede ser posible. Si la mezcla tiene multicomponentes presentes, como en el caso del agua natural, los resultados de los estudios de columnas no son suficiente para investigar esta situación. Experimentos, usando un sistema de un solo soluto, no pueden ser extrapolados a sistemas multicomponentes, ya que existe una competencia en la adsorción.

Estas dificultades son la razón por la cual en las investigaciones se utiliza agua con concentraciones similares. Aunque los resultados de estos estudios deben ser aplicados con algunas restricciones para aguas que contienen sustancias orgánicas diferentes.

La importancia del proceso biológico con carbón activado en columnas usado en el tratamiento de aguas de superficie para producir agua potable, fue observado cuando el número de colonias de bacterias aumentó en el efluente a causa del tratamiento de preozonación. Sin embargo, estos efectos no siempre son reconocidos si el número de colonias es determinado, basándose en los estándares alemanes, los cuales tienen un tiempo de incubación de 48 horas. Un tiempo de incubación mayor provoca un aumento en el número de colonias.

1.2.2 Estudios Realizados.

Ejemplos de diferentes investigaciones, con respecto a lo que ocurre con los organismos, fueron dados por Huang, 1978, quien empleó carbón activado con plata y encontró un bajo número de microorganismos en el efluente de la columna.

Basados en estas observaciones, extensas investigaciones fueron realizadas en Bremen. El objetivo era el reemplazo de la filtración lenta en arena por un proceso biológico en columnas de CAG. En Dohne, muchos experimentos tuvieron la misma meta y finalizaron en la realización de una planta a tamaño industrial. La infiltración, seguida del paso a través de la tierra, las cuales habían sido usadas en Mülheim y tenían un resultado similar durante la lenta filtración, fue reemplazada por un método biológico.

Los resultados fueron publicados cuando los efectos de la producción de grandes cantidades de haloformas y otros compuestos clorados fue evidente. Incrementar el tiempo de uso de cloro fue considerado indispensable para la oxidación de amoníaco a temperaturas menores a 5°C. El proceso de Mülheim, donde el amoníaco era oxidado biológicamente, atrajo considerable interés. Desde entonces, numerosos experimentos han estudiado la posibilidad de obtener agua potable usando los esquemas de procesos como sedimentación, ozonación y adsorción con CAG en aguas de ríos.

El efecto positivo de una preozonación fue mostrado en Mülheim, independientemente del uso de columnas de CAG. Contrario a esto, los resultados de Fiessinger *et al.* (1983) muestran muy débil la influencia de ozono en el tratamiento de agua en una planta de Mont Valerien (Paris). La preozonación fue seguida de sedimentación y una filtración rápida en arena, en seis columnas que contenían arena o CAG, y fueron operadas en paralelo.

Similarmente, la preozonación resultó solo en un aumento en la remoción del olor. Benedek (1977) encontró resultados similares en Morsang (Francia), donde la adsorción de compuestos del agua disminuyó sobre la ozonación. Benedek concluyó que la preozonación estimula la degradación biológica pero disminuye la adsorción de sustancias presentes en el agua. De acuerdo sus estudios la preozonación es benéfica sólo cuando los filtros son muy largos donde la biodegradación es responsabilidad de la remoción de COD.

Varios estudios arrojaron similares, pero no constantes resultados. A continuación se presentan unas conclusiones de ellos:

1. En todos los casos donde se usó columnas con carbón activado para producción de agua potable, las reacciones de oxidación biológica ocurrieron después de un período de 5 a 20 días. La eficiencia de remoción biológica dentro de un volumen de carbón fue superior en comparación a otros materiales de filtrado. Probablemente como resultado de la alta concentración de bacterias en la superficie del carbón.

2. La actividad biológica dentro de las columnas de CAG, se mejora durante la ozonación, pero disminuye por la cloración. Una dosis óptima de ozono no puede ser calculada ya que la concentración de ozono cambia la adsorción y la biodegradación de las sustancias presentes en el agua. Usualmente, una dosis de 0.5 g O₃/g COD produce una

eficiencia de remoción satisfactoria. Dosis más altas suelen ser perjudiciales. Para obtener más información es necesario realizar un análisis del comportamiento de la adsorción.

3. Las ventajas de la actividad biológica en columnas de CAG usualmente se vuelven más pronunciadas con el paso del tiempo de operación. La biodegradación de sustancias, las cuales han sido previamente adsorbidas, son el resultado de la competencia en la adsorción.

1.2.3 Microorganismos en las columnas de CAG

1.2.3.1 Estudios generales

El comportamiento de los microorganismos en superficies de adsorción ha sido estudiado, sin embargo, los resultados son contradictorios. En general, este puede cambiar con el tipo de bacterias, el tipo de adsorbente, y otros parámetros como el pH y la concentración.

De acuerdo con Charaklis (1973), Marshall (1971) y Floodgate (1972), la adsorción y el subsecuente crecimiento bacteriano en las superficies puede ser subdividido en tres categorías. El primer estado reversible es una adsorción física, en ella los organismos pueden ser desadsorbidos de la superficie. En el segundo estado se forma una delgada matriz, la cual une firmemente los organismos a la superficie. El crecimiento y la formación de poblaciones de bacterias representan el tercer estado. Si la concentración del sustrato es suficientemente alta, un biopelícula se forma y cubre la superficie.

Con respecto al desarrollo bacteriano, las superficies ofrecen condiciones más favorables ya que la concentración del sustrato es mayor. Un enriquecimiento del sustrato y/o enzimas es posible en la superficie, guiando a una alta velocidad de degradación del sustrato.

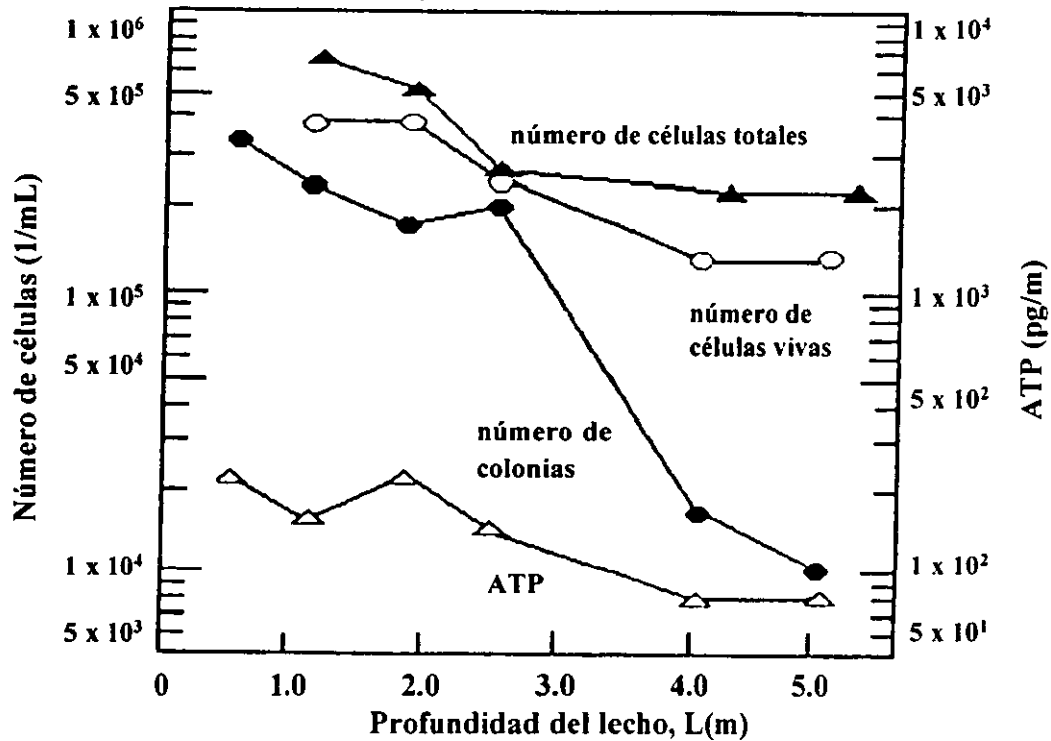
Estos resultados deben ser considerados si durante los experimentos de biodegradación a altas concentraciones de sustrato, diferentes tipos de material de filtrante son utilizados, ya que por debajo del área superficial no se observarían las mismas ventajas. De cualquier modo, aún bajo estas condiciones una superficie del material del filtro provoca una filtración de bacteria. Un desplazamiento de biomasa puede promover la acumulación de ella y la remoción de sustratos.

Una comparación entre todos los estudios realizados es difícil de realizar, debido a que se han usado diferentes métodos analíticos. Klotz *et al.* (1975) consideró que el estándar alemán era inadecuado, ya que sólo una parte de los microorganismos era medido. Los resultados óptimos fueron obtenidos a 27°C por 7 días de incubación midiendo el 20% de los organismos vivos y el 5% de los organismos totales. La formación de biopelícula no se observó al utilizar un microscopio electrónico. Fueron identificadas 26 especies diferentes de bacterias.

La influencia de la velocidad de filtrado y del tipo de carbón en presencia de las bacterias en la planta piloto de columnas de CAG fue examinado por Glaze W. WT.Lin (1986). A una velocidad de filtrado de 10m/h, un aumento en el número de colonias en solución en lechos profundos fue observado. A 8 m/h, valores constantes, y a 4 m/h los valores disminuyeron.

Dependiendo de la concentración del sustrato, las condiciones hidrodinámicas y la concentración bacteriana en el carbón establecen el crecimiento y desplazamiento de la biomasa dentro de la columna.

Una disminución del número de colonias en un lecho profundo fue reportada por Werner (1978). La figura 1.13 muestra la concentración bacteriana en solución medida por diferentes parámetros.



Fuente: Fuente: Sonthiermer H. et al. (1978)

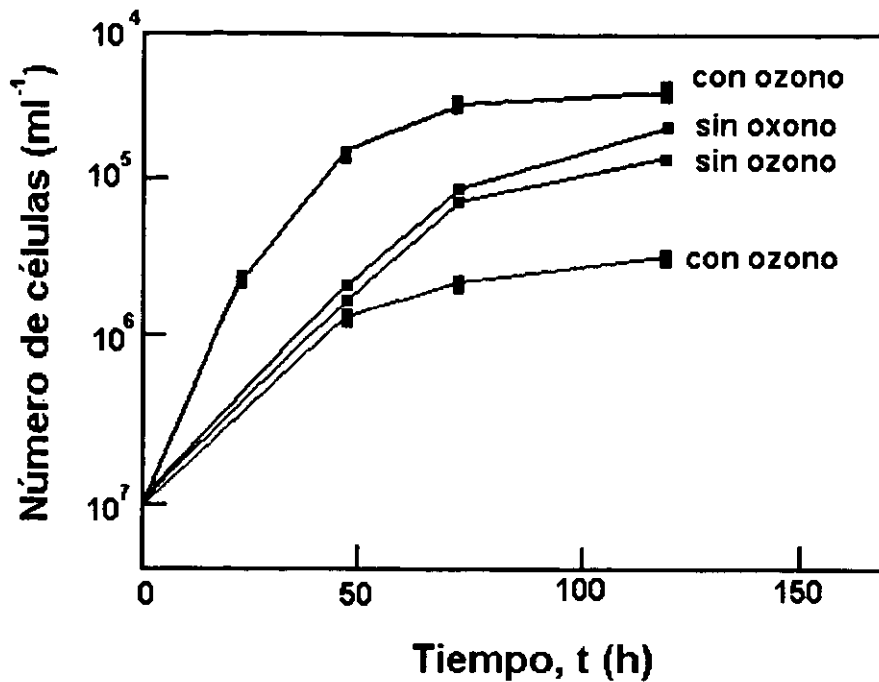
FIGURA 1.13 Datos microbiológicos en función de la profundidad del lecho.

1.2.3.2 Velocidad de crecimiento

Como ya se había mencionado, una comparación de los diferentes microorganismos estudiados es difícil de realizar debido a que han sido analizados por diversos métodos analíticos.

No obstante el número de bacterias, en el efluente de las columnas de CAG no permite resultados cuantitativos de la biodegradación de sustancias dentro de la columna. Por esta razón, Werner, (1982) propuso un análisis de la velocidad de crecimiento de las bacterias. Para propósitos prácticos, esta información puede ser usada para conocer la tendencia del crecimiento bacteriano.

Para estos análisis, el agua es esterilizada, primero por filtración a través de membranas y después por un desinfectante con un número definido de bacterias (población heterogénea). Durante la incubación el crecimiento de las bacterias puede seguirse por análisis total de células o por turbiedad. Los resultados típicos se muestran en la figura 1.14.



Fuente: Fuente: Sontheimer H. et al. (1978)

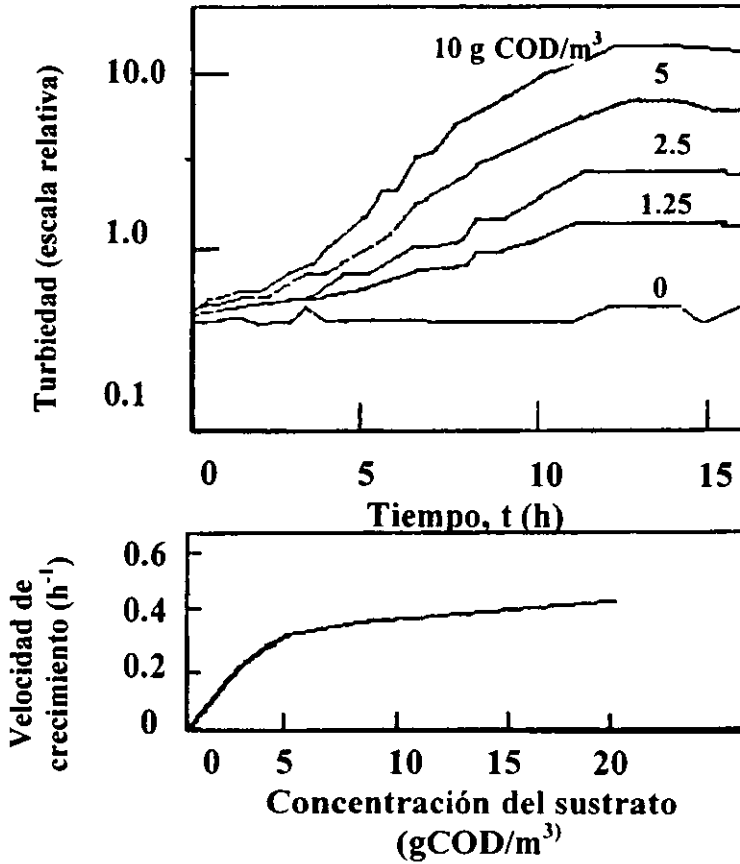
FIGURA 1.14 Aumento del número total de células como función del tiempo de incubación en muestras de agua en diferentes puntos de plantas de tratamiento que emplean ozonación y GAC.

Los datos muestran un incremento en la velocidad de crecimiento durante la ozonación del influente.

La biodegradación dentro de la columna de CAG provoca una disminución en la velocidad de crecimiento. Sin la preozonación, la actividad biológica dentro de la columna es menos pronunciada, resultando en velocidades de crecimiento similares para el influente como para el efluente.

No sólo la remoción del COD es importante, sino la remoción de sustratos fácilmente biodegradables los cuales pueden provocar un sobrecrecimiento en la distribución de la población. Por debajo de estas condiciones, la ozonación favorece la biodegradación dentro de las columnas de CAG.

Los análisis de número total de células y el uso del microscopio electrónico es tardado, por lo que se desarrolló un método el cual mide el número de células por turbiedad (Fiessinger et al 1983.). Este produce suficientes datos para describir el crecimiento en una curva. Los resultados para sustratos fácilmente biodegradables se muestran en la figura 1.15.



Fuente: Sontheimer H. et al. (1978)

FIGURA 1.15 Resultados del crecimiento bacteriano.

La parte alta del diagrama muestra que la turbiedad aumenta con el tiempo a concentraciones diferentes del sustrato. Al tener una relación lineal entre la turbiedad y el número total de células, la velocidad de crecimiento μ (h^{-1}) puede ser calculada directamente. Si los valores son dibujados en función de la concentración inicial, obtendremos una curva del tipo de Monod. La cual se muestra en la parte baja del diagrama. El crecimiento bacteriano está dado por:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S}$$

Ec. 1.12

Donde:

μ = velocidad de crecimiento bacteriano (h^{-1})

S = concentración límite del sustrato (g/m^3)

μ_{max} = velocidad máxima de crecimiento bacteriano (h^{-1})

K_s = coeficiente de velocidad media (g/m^3)

Cuando el agua de los trabajos en Fuhrberg, fue analizada por este método (Werner, 1983) el valor de μ_{max} aumentó de 0.12 a 0.42 h^{-1} después de la ozonación, al mismo tiempo la K_s disminuyó de 13.3 a 3.0 g/m^3 . Una medida de la calidad del sustrato es obtenida por la evaluación de la influencia de ozono. Esto puede ser analizado por métodos

microbiológicos, los cuales serán usados más frecuentemente en los procesos de optimización, especialmente, cuando los procesos de tratamiento biológico son utilizados.

1.2.3.3 Modelos matemáticos que describen la degradación biológica en las columnas de CAG

Para el cálculo de la biodegradación en columnas de CAG, el mecanismo que controla el proceso de adsorción ha sido introducido en un modelo de biopelícula. Modelos relativamente simples han sido propuestos por Peel y Benedek (1976). Modelos más sofisticados han sido desarrollados por investigadores como Yieng y Weber (1979).

CAPITULO 2

ANÁLISIS DEL DISEÑO Y OPERACIÓN DE LOS PROCESOS DE OZONACIÓN Y BIOADSORCIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

El análisis adecuado del diseño y operación de los procesos de ozonación y bioadsorción para el tratamiento de agua de pozo se debe realizar con base en datos de diseño y operación que se obtienen en campo y en documentos.

En este trabajo se propone una metodología general que se puede aplicar para el diseño y selección correctos de los equipos integrantes y de las condiciones de operación de los procesos de ozonación y bioadsorción.

Finalmente, se presenta un caso de estudio del análisis funcional de los procesos de ozonación y bioadsorción realizado a una planta potabilizadora. Debido a la confidencialidad del estudio, solamente se pudo realizar un análisis con base en información determinada en campo.

2.1 Metodología general para el dimensionamiento y la selección de los equipos de los procesos de ozonación y bioadsorción con carbón activado de una planta potabilizadora a pie de pozo.

La metodología propuesta para el dimensionamiento y la selección de los procesos de ozonación y bioadsorción, se constituye de los siguientes conceptos:

- 1) Estudio de factibilidad para determinar el área y población beneficiada por el suministro de agua tratada por estos procesos, la selección del lugar, tamaño de la planta potabilizadora, etc.
- 2) Estudios preliminares de Ingeniería.
- 3) Ingeniería básica.

La metodología que se propone permitirá tomar las medidas necesarias para cumplir los siguientes objetivos básicos:

- Producir agua de calidad y cantidad adecuadas para consumo humano y, con buenas características organolépticas (color, olor y sabor).
- Producir agua, utilizando procesos y equipos de tratamiento, que se puedan adquirir, operar y mantener a un costo razonable.

Cada una de estas partes se encuentra constituida por diferentes rubros que serán descritos a continuación:

2.1 Estudio de Factibilidad

El estudio de factibilidad se elabora con base en los datos siguientes:

- Datos de construcción del pozo: Tiempo promedio de vida útil del pozo y capacidad de producción de agua del pozo.
- Ubicación de la planta.
- Tamaño de la planta potabilizadora de agua
- Áreas y población servida de abastecimiento de agua, y requerimientos futuros (demanda máxima diaria de agua)

2.1.1 Datos de Construcción del pozo

La información que se necesita conocer es la obtenida en estudios previos a la construcción del pozo de abastecimiento de agua, como son:

- Estudios y criterios de selección del lugar para perforar y construir el pozo de abastecimiento de agua.
- Estudios para determinar el potencial de degradación de la calidad del agua por posibles fuentes naturales o por actividades del hombre y asentamientos humanos.

Estos estudios son necesarios para determinar la cantidad y calidad esperada de agua proveniente del pozo y la factibilidad técnica económica para su potabilización para consumo humano.

2.1.2 Ubicación de la planta

La selección del sitio se debe realizar con base en los siguientes factores:

- Calidad del agua cruda en la fuente de abastecimiento.
- Dificultades potenciales de su tratamiento.
- Posibilidad de contaminación futura.
- Costos de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento resultante.
- Aumento a futuro de la capacidad de explotación del pozo y de la planta de tratamiento.

Asimismo, es necesario realizar un estudio de impacto ambiental que indique las consecuencias (favorables o desfavorables) de la construcción y operación de la planta sobre el medio circundante.

Además, se recomienda realizar los estudios correspondientes para determinar:

- Disponibilidad de energía eléctrica en la zona para la planta potabilizadora.
- Fácil acceso a la planta.
- Histórica de inundaciones y sismicidad de la zona.
- Medidas de seguridad al interior de la planta y del área circundante, en caso de un incidente dentro de la planta de tratamiento.
- Consideraciones de crecimiento futuro de la capacidad de la planta.

2.1.3 Tamaño de la planta de tratamiento

El tamaño de la planta de tratamiento se determina con base en la capacidad de abastecimiento del pozo.

2.2 Estudios preliminares de Ingeniería

Los datos necesarios para elaborar un estudio preliminar de ingeniería que permita la selección y diseño de los procesos de ozonación y bioadsorción con carbón activado de una planta potabilizadora, son:

- Caracterización del agua cruda.
- Objetivos de calidad final del agua tratada.
- Pruebas de tratabilidad.
- Criterios de diseño y operación para cada proceso - Diseño preliminar de los procesos.
- Estimación preliminar del costo de construcción total de la planta.
- Estimados de los costos de operación y de mantenimiento.
- Análisis técnico-económico de cada alternativa de tratamiento.

El estudio preliminar de ingeniería debe tener las recomendaciones concretas con respecto a los procesos y tren de tratamiento apropiados. Valores de carga hidráulica para cada unidad de tratamiento y definición del equipo principal componente del sistema de tratamiento.

2.2.1 Caracterización del agua cruda

Se debe contar con ó obtener información lo más completa posible relacionada con las características fisicoquímicas del agua a tratar para determinar la pertinencia de aplicar los procesos de ozonación y bioadsorción para el tratamiento del agua en cuestión. Es importante, conocer la concentración de parámetros globales indicadores de la presencia de compuestos orgánicos, como es el carbón orgánico disuelto (COD) y el color, el pH y la alcalinidad, entre otros. Si es posible, se debe determinar la naturaleza y contenido de los compuestos orgánicos presentes en el agua. Estos últimos datos son muy importantes para seleccionar la ozonación acoplada a la bioadsorción con carbón activado como alternativas de tratamiento del agua en cuestión, ya que estos procesos aplican para ciertos contaminantes presentes en determinados niveles. Por ejemplo, la ozonación es factible para tratar compuestos orgánicos recalcitrantes presentes en aguas potables, como son los plaguicidas, compuestos fenólicos, etc., en concentraciones de algunas partes por billón (0.5-50 µg/L).

2.2.2 Objetivos de la calidad del agua tratada

El objetivo de plantas de tratamiento de agua potable es proveer de un líquido con características adecuadas de calidad potable y a un costo razonable. Esta agua debe cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano que marca los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

La Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua.

En el **Anexo IV** se presenta una síntesis de la Norma Oficial Mexicana-127-SSA1-1994.

2.2.3 Pruebas de tratabilidad

Las pruebas de tratabilidad se pueden realizar a nivel laboratorio ó a nivel piloto y deben realizarse bajo criterios recomendados para permitir su escalamiento en el ámbito industrial. Los datos que se obtienen permiten definir los principales parámetros de operación y dimensionamiento de los procesos.

Las pruebas de tratabilidad para el proceso de ozonación se pueden realizar en reactor batch y continuo, sin embargo, se recomienda la utilización de este último tipo de reactores. Los reactores de ozonación son comúnmente columnas que presentan en la parte inferior difusores de tipo poroso para la inyección, a contracorriente con respecto al agua alimentada, del gas ozonado. En la actualidad, se utilizan otros sistemas de difusión de ozono como son los mezcladores estáticos, pero su costo es muy elevado con respecto al precio de los difusores porosos.

Los parámetros de operación y diseño que se determinan para el proceso de ozonación son: pH, tiempo de contacto agua-ozono, dosis de ozono, eficiencia del tratamiento, diámetro y altura del contactor.

Las pruebas de tratabilidad del proceso de bioadsorción se dividen en isotermas de adsorción en reactor batch y curvas de saturación del lecho de columnas empacadas con carbón activado. Los resultados obtenidos en estas pruebas permiten determinar el tipo y dosis de carbón activado a aplicar, el pH del agua, el tiempo de contacto, la altura del lecho, el diámetro de la columna, tipo de flujo (ascendente ó descendente), la eficiencia del tratamiento. Cuando se cuenta con un tiempo adecuado para realizar las pruebas de tratabilidad se pueden determinar otros parámetros como son el tipo de biomasa que se fija a la superficie de los granos de carbón activado, las condiciones para adaptarse y biodegradar compuestos adsorbidos en el carbón y su contribución en la eliminación de estas sustancias en sistemas de carbón activado asistidos biológicamente.

Estas pruebas permiten obtener información para determinar:

- Porcentajes de remoción
- Espacio disponible
- Costos de arranque, operación, y mantenimiento.
- Requerimientos de mano de obra especializada.
- Alternativas tecnológicas, grado de complejidad de la tecnología, disponibilidad de materiales y equipos así como la problemática de disponibilidad de refacciones.

2.2.4 Criterios de diseño y operación – Diseño preliminar de los procesos

Los criterios recomendados de diseño permiten dimensionar y operar de manera preliminar los equipos de los procesos. En el caso de la ozonación, el manual de diseño de tratamiento de agua con ozono (Langlais et al, 1991) contiene los criterios más recomendados para el diseño, selección y operación de los equipos.

El proceso de bioadsorción es una técnica relativamente nueva para la eliminación de compuestos orgánicos presentes en aguas. Sin embargo, el diseño de unidades de carbón activado se basa también en criterios de dimensionamiento y operación de sistemas de adsorción y de filtración. Los criterios recomendados para dimensionar y operar unidades de adsorción son: Cheremisinoff P . *Carbon adsorption handbook (1978)* .

La información generada sirve para elaborar una tabla comparativa de costos entre las diferentes alternativas de tratamiento. Esta tabla permite seleccionar la opción de tratamiento más adecuada, desde los puntos de vista técnico-económico.

Por otra parte, cuando no se cuenta con esa tabla comparativa, se debe tener cierta información básica para poder revisar el diseño de los equipos.

- Capacidad de la planta

- Capacidad de la planta en L/s, m³/h.

- Sistema de ozonación: Se constituye de tres componentes generador de ozono, tanque de contacto de ozono y destructor de ozono.

Generador de ozono

- Tipo
- Producción de ozono
- Capacidad del equipo
- Tipo de gas de alimentación.

Tanque de contacto de ozono

- Tipo
- Difusión del ozono
- Dimensiones
- Tiempo de retención

- Sistema de bioadsorción. Se constituye de dos componentes: Columna de carbón activado y retrolavado de la columna.

Columna de carbón activado

- Tipo
- Número de columnas
- Dimensiones (volumen, largo, diámetro)
- Área de la columna
- Tasa de filtración
- Tasa de retrolavado
- Altura del lecho
- Tipo y marca de carbón activado en granos (CAG)
- Características físicas del adsorbente: Granulometría de las partículas del adsorbente (Tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad), número de abrasión, densidad, área específica.

Retrolavado de la columna

- Tipo (manual ó automático)

- Características de la bomba
- Lugar de uso
- Capacidad
- Requerimientos de electricidad
- Características especiales

- Productos químicos utilizados

- Químico utilizado
- Proceso donde se utilizará
- Dosis promedio

2.2.5 Manejo de los residuos generados en la planta

Es necesario tomar en cuenta como un punto muy importante en el proyecto de una planta de tratamiento de agua potable, un método de regeneración y manejo del carbón activado agotado y de las aguas generadas durante el retrolavado de la columna de carbón activado. Estos aspectos son requeridos para un desarrollo eficiente de la planta y mantener un equilibrio con el medio ambiente.

2.2.6 Evaluación del impacto ambiental

Se recomienda realizar un estudio que evalúe los posibles impactos ambientales que pueda ocasionar la planta con su construcción, puesta en marcha y operación.

2.3. Ingeniería básica de una planta potabilizadora

La ingeniería básica de una planta potabilizadora

- Datos básicos de diseño.
- Memorias de cálculo de cada uno de los equipos componentes de la planta.
- Dimensionamientos de los equipos.
- Balance de materia.
- Lista de equipos, motores e instrumentos.
- Hojas de especificación de los equipos.
- Planos de la planta de tratamiento.
- Manuales de arranque, operación y mantenimiento de cada uno de equipos componentes del sistema de tratamiento.

Ingeniería básica:

La ingeniería básica de los procesos de ozonación y bioadsorción se constituye de los conceptos que se listan a continuación:

Bases de diseño:

En el apartado de bases de diseño se requieren ciertos datos para iniciar el diseño de la planta potabilizadora. Dentro de la información que se necesita definir se encuentran los siguientes conceptos:

1.1. Capacidad de la planta.

1.2 Especificaciones de las corrientes de entrada y salida del proceso.

Esta información se emplea para poder realizar la operación de la planta y la planeación de ampliaciones y mejoramientos. Generalmente, en las plantas de purificación de aguas, se registran los flujos del influente, del efluente y del agua de lavado; las presiones en las tuberías y los niveles de agua en los tanques y en los filtros; así como en los almacenamientos de agua pura; la operación de las bombas y compresores, las temperaturas del agua y el aire; el pH y las pruebas biológicas dependiendo de la naturaleza de la planta.

1.3 Condiciones límites de batería.

Este rubro permite especificar las rutas de acceso a la planta potabilizadora y los medios de transporte mediante la cual el proveedor de las diferentes materias primas necesarias en el proceso pueda acceder a la planta.

Además del dimensionamiento, la localización y la seguridad de la planta, la distribución puede ser una base útil en el análisis de las actividades de los operadores y la planta. Entre otras cosas, se identifican las arterias de comunicación óptima: caminos, andadores, escaleras, túneles, elevadores y grúas.

1.4 Especificación de los servicios auxiliares necesarios para el funcionamiento de la planta de potabilización.

Servicios auxiliares relacionados con los procesos de ozonación y adsorción de una planta potabilizadora

Gas productor de ozono (aire, oxígeno puro, oxígeno enriquecido con aire, etc)

Energía eléctrica

Agua de enfriamiento

Solución de NaOCl para el proceso de desinfección.

Las instalaciones eléctricas requieren generalmente ser representados en planos que muestren las unidades principales y la demanda máxima estimada. Es suficiente una sola fuente de alimentación dentro de la planta, excepto cuando aún una breve interrupción de corriente pueda implicar consecuencias negativas y serias.

Se puede recurrir a servicios primarios de energía en las plantas grandes donde se encuentren operando motores de más de 200 HP. (por sus siglas en inglés)

Los caminos, banquetas, escaleras, entradas a edificios, corredores, túneles y vías de paso deben estar bien alumbrados, contar con un sistema de alumbrado contra inundaciones y emergencia es importante.

El alumbrado general en una planta es de tipo directo (dispositivos elevados), los cuales no producen reflejos. Generalmente se instala alumbrado indirecto en las oficinas y laboratorios, excepto en lugares en los que se controla la humedad y la temperatura, los dispositivos de alumbrado serán a prueba de vapor y humedad.

1.5 Especificaciones generales.- Normatividad y códigos necesarios en el área del desarrollo del producto

3. -Balance de materia

Se debe determinar en este punto las variables de control de los equipos de ozonación y bioadsorción presentes en la planta potabilizadora.

- Volúmenes
- Caudales
- Composición
- Presiones y temperaturas

La elaboración del balance general de materia y el balance por equipos de cada uno de los integrantes del proceso.

Esta información está en base a la tecnología seleccionada y al análisis de diversas alternativas del mismo proceso.

Toda esta información se contiene en el diagrama de flujo de procesos (DFP). Se debe presentar una justificación de la alternativa de proceso seleccionada

3. -Criterios de diseño o memorias de cálculo de equipo.

En este punto se hará una evaluación del proceso a condiciones especiales o máximas de operación de la planta potabilizadora, se involucran además las reglas heurísticas, las cuales son experiencias de campo aprendidas por los ingenieros a través del tiempo, y permiten seleccionar condiciones necesarias al proceso mediante criterios prácticos.

La evaluación del proceso a condiciones máximas es con el objetivo de permitir que el proceso tenga un excedente como una medida de seguridad en casos extremos de operación

Se deberán determinar en cada etapa las capacidades, los gastos y financiamiento, las economías de escala, las capacidades y niveles de tratamiento y los gastos de servicio. En esta clase de estudios debe reconocerse la dificultad de prever la nueva tecnología y el costo de introducir nuevos procesos en comparación con el costo de continuar con los antiguos.

- -Lista de equipo. Se hará un cálculo aproximado de los equipos de una manera rápida, con las dimensiones principales de cada equipo.

Se requiere definir el número de equipos que se necesitan para un mismo servicio mediante un predimensionamiento rápido (short-cuts).

Teóricamente se puede abrir una trayectoria óptima de tratamiento para las determinadas cantidades y propiedades de las aguas requeridas, los costos de los terrenos, energía y mano de obra, así como los requerimientos del efluente, una vez que se han aceptado los costos y eficiencias de los procesos unitarios individuales.

Las plantas de tratamiento se diseñan generalmente para trabajar con los flujos máximos diarios y en horarios máximos dentro del alcance del diseño.

Debido a que las capacidades de diseño se deben basar en estimaciones de las condiciones más rigurosas que hayan de encontrarse, generalmente se hacen compatibles el diseño de las plantas y la programación de las operaciones.

4. – Planos.

Diagrama de servicios auxiliares.- en este diagrama se incluye la revisión del balance de materia y energía del proceso además de:

- Cálculos de consumo de servicios (vapor, agua, energía eléctrica)
- Revisión del balance de materia y energía del proceso

Los edificios de la planta y estructuras descubiertas deberán indicar su función y adaptación climática. En casi todas las circunstancias se deberán encontrar bajo techo las oficinas y laboratorios, los cuartos de baño y vestidores así como los talleres y bodegas.

Se puede agregar un alojamiento específico para equipos como:

1. Las bombas que abastecen agua a la planta y a la comunidad.
2. Los compresores de aire para el lavado de filtros
3. Recipientes de almacenamiento de productos químicos y dosificadores
4. Los tanques de aguas limpias y tanques de almacenamiento para el agua potable.

En los climas benignos, las estructuras de operación necesitan estar protegidas únicamente contra la lluvia y el sol, los cobertizos proporcionan esta protección.

Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) .- En este diagrama se presentan todas las tuberías e instrumentación que involucra el proceso con una simbología determinada. Además, presenta:

- Especificación de tuberías, es decir, el material de fabricación y diámetros de especificación.
- Justificación de los controles, accesorios y los equipos auxiliares.

Emplear los procesos de control y automatización en la operación de la planta facilita al operador sus actividades y aumenta el desempeño de la misma, sin embargo, no siempre estos sistemas en el proceso son convenientes y pueden representar un problema si no hay un correcto empleo de los mismos.

La mecanización reemplaza a las operaciones manuales y substituye funciones que no se pueden desempeñar a mano

La instrumentación ayuda a guiar y registrar los flujos y comportamiento de la planta.

Los instrumentos mecánicos registran las condiciones observadas en forma continua o a intervalos específicos de tiempo.

La automatización combina la instrumentación y la mecanización para efectuar controles específicos. Son ejemplos de controles de respuesta las señales provenientes de flotadores y electrodos, así como sensores electrónicos.

Plot- Plan.- Es el plano de localización de equipo, donde se incluye la revisión de las dimensiones de los equipos y la definición de los criterios de seguridad y mantenimiento tomados en consideración el arreglo de los equipos.

Cuando llega el tiempo de aumentar la capacidad de la planta, generalmente es necesario agregar una o mas unidades similares y completas. La ventaja de la no interferencia con las unidades existentes se contrarresta con la desventaja de requerir una réplica completa para

la expansión, operación de poner fuera de servicio unidades completas cuando cualquier parte de ellas se encuentra en reparación, y las dificultades para modificar componentes individuales.

En este plano se muestran las uniones flexibles en cada tramo de tubería que simplifican la construcción y las reparaciones, absorbiendo las vibraciones de las bombas y otras máquinas.

5.-Manuales de operación.-

Estos manuales contienen la información detallada de los procesos de encendido, funcionamiento y apagado de cada uno de los equipos, así como los procedimientos de apagado de emergencia en caso de una situación adversa.

Se explica en este manual los dispositivos que entran en funcionamiento al activar determinado equipo del proceso, información necesaria por el operador para su correcto funcionamiento.

Los dispositivos de seguridad incluyen la colocación apropiada del equipo para la operación y el acceso a las reparaciones; escaleras inclinadas en lugar de verticales, jaulas de protección cuando se empleen escaleras verticales, tableros eléctricos protegidos, buena iluminación y ventilación apropiada, espacio de movimiento adecuado en todos los lugares de trabajo, barandales en los tanques y otros lugares peligrosos, extinguidores de incendio, alarmas de incendio, botiquines de primeros auxilios etc.

CAPITULO 3

CASO DE ESTUDIO

Con base en la metodología propuesta para realizar un análisis funcional de los procesos fisicoquímicos avanzados instalados en una planta potabilizadora se presenta un ejemplo práctico de un sistema que integra los procesos de ozonación y bioadsorción dentro de su tren de tratamiento. La planta potabilizadora que se analizó presenta el siguiente esquema general (Figura 3.1).

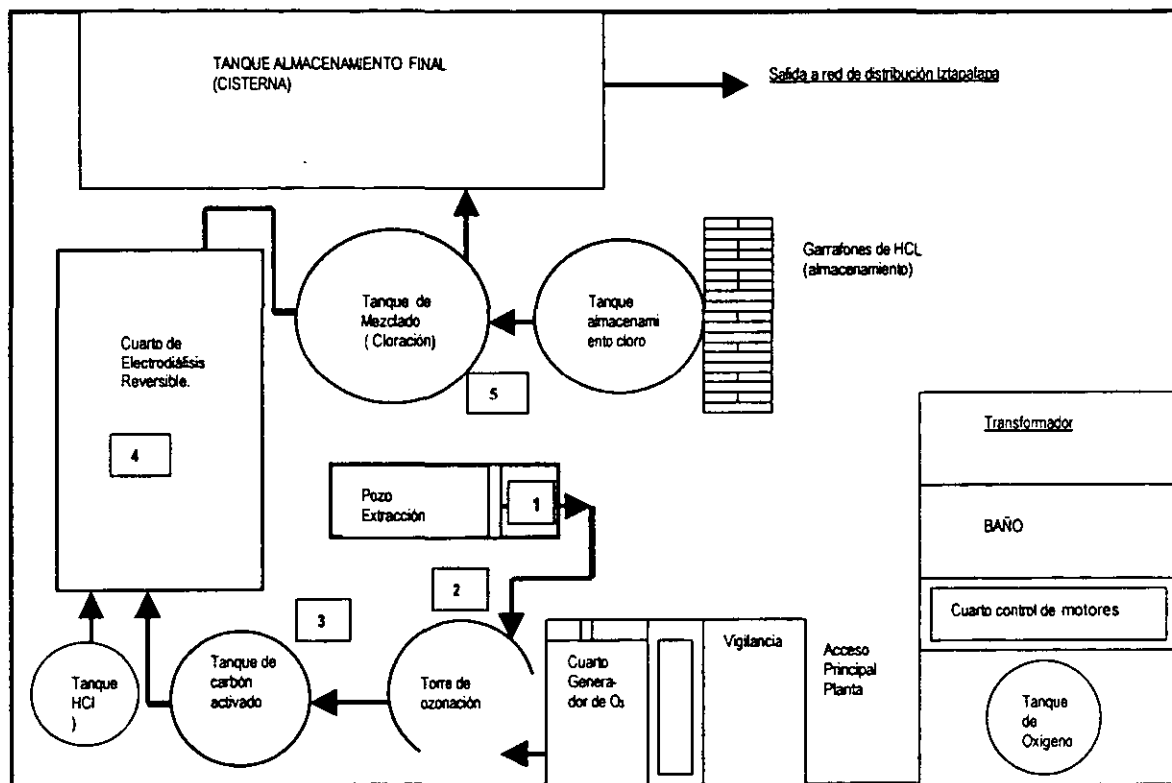


FIGURA 3.1 Plano general de la planta potabilizadora a pie de pozo.

- **Punto 1.**-Extracción del pozo (agua cruda o influente)
- **Punto 2.**- Salida de la torre de Ozonación.
- **Punto 3.** Salida del tanque de Carbón Activado.
- **Punto 4** Modulo de EDR.
- **Punto 5** Tanque de cloracion y salida del efluente

Descripción del tren de tratamiento

La descripción del tren de tratamiento que se presenta a continuación se realizó con base en la información obtenida en campo.

El proceso inicia con la extracción y bombeo del agua cruda del pozo, el cual se encuentra ubicado en el predio de la planta potabilizadora a pie de pozo. El agua es extraída por una bomba tipo centrífuga a un flujo de 70 L/ s. Después de la bomba de extracción, el agua proveniente del pozo pasa por un medidor de flujo.

Posteriormente, el agua y una corriente gaseosa (mezcla de oxígeno + 100 g O₃/m³ gas) son inyectadas en contracorriente dentro de una torre de ozonación, con el fin de oxidar contaminantes con características reductoras (amoníaco, compuestos orgánicos,). La torre es de tipo cilíndrico, con un volumen útil de 37.7 m³ y está construida en acero inoxidable. El gas ozonado es alimentado por la parte inferior del reactor, mediante un mezclador estático que permite la difusión y transferencia del ozono a la fase líquida.

Este sistema cuenta también con un destructor térmico-catalítico para eliminar el ozono residual contenido en la fase gaseosa de la salida de la torre de ozonación. Después de 9 min de tiempo de contacto, el agua ozonada pasa a una columna de carbón activado biológico.

El adsorbente PICABIOL, de origen francés, presenta en su superficie biomasa. La función principal de la columna de carbón activado biológico es eliminar contaminantes por medio de dos mecanismos: la adsorción y la biodegradación. El tiempo de contacto de lecho vacío (EBCT) dentro del filtro es de 7 min. El sistema funciona en forma continua y sólo se suspende su operación para hacer retrolavados con el efluente de la planta. El retrolavado se realiza cuando la presión de operación del filtro es mayor a 7 mm de Hg. La operación se realiza de manera semi-automática, normalmente cada 3 días.

Una parte del efluente de la columna de carbón activado biológico, pasa a una etapa de desmineralización por medio del proceso de electrodiálisis reversible (EDR). El agua proveniente de la EDR y otra parte del agua del filtro de carbón biológico se envían a un tanque de desinfección con un tiempo de contacto de 8 minutos. El agente desinfectante es solución de hipoclorito de sodio al 12.5%.

Debido a la confidencialidad del caso, no se tuvo acceso a los documentos relacionados con la ingeniería conceptual (pruebas de tratabilidad) y la ingeniería básica (memorias de cálculo) que se aplicaron para el diseño y construcción de los procesos de ozonación y bioadsorción que fueron analizados de la planta problema. El análisis se realizó solamente con base a datos obtenidos en campo, los cuales son de dos tipos: características operacionales de los equipos y propiedades fisicoquímicas del agua tratada a la entrada y salida de cada uno de los equipos.

3.1 Análisis de las características físico-operacionales de los equipos de ozonación y bioadsorción de una planta potabilizadora

Los componentes principales de una planta potabilizadora a pie de pozo que utiliza en su tren de tratamiento los procesos de oxidación con ozono y bioadsorción con carbón activado biológico granular (CAG) son:

3.1.1 Sistema de ozonación

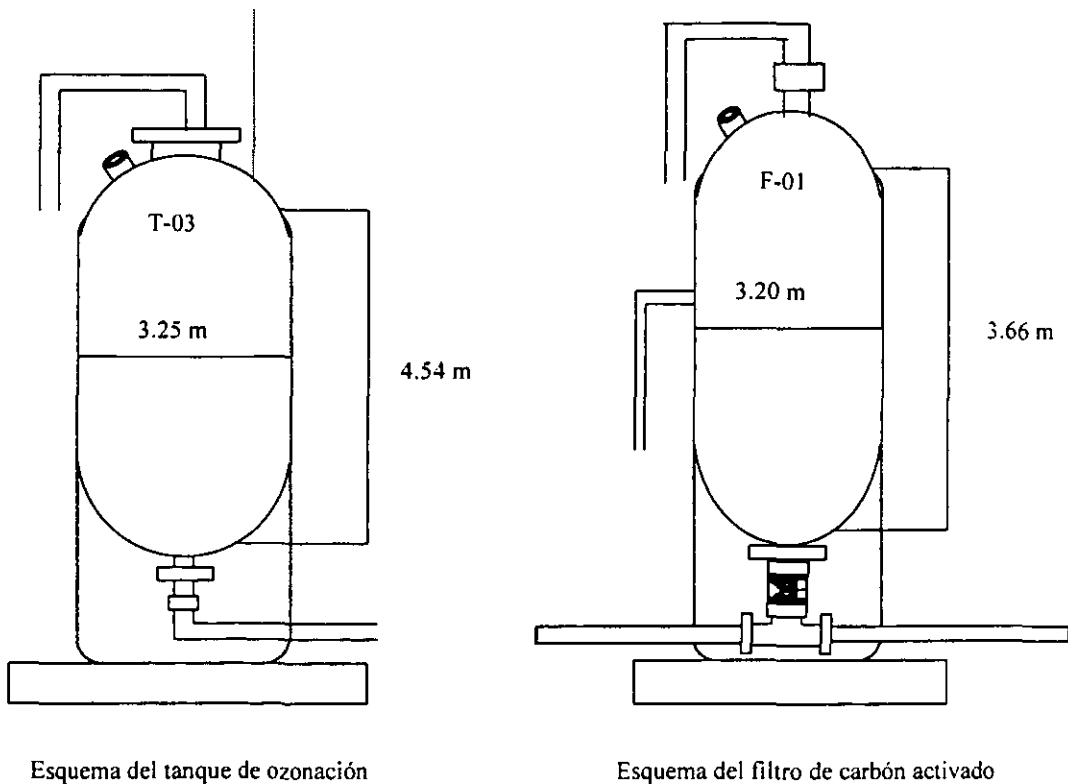
El sistema de ozonación de la planta potabilizadora analizada consta de los siguientes elementos:

Equipos principales

- Generador de ozono.
- Tanque de contacto de ozono.
- Difusor de ozono (mezclador estático).
- Destructor de ozono (catalítico).

Equipos auxiliares:

- Sistema de enfriamiento del generador.
- Tanque de almacenamiento de oxígeno.
- Bombas

**FIGURA 3.2 .- Esquemas de los tanques de ozonación y filtro de carbon activado**

A continuación se presenta un análisis funcional de los equipos principales del sistema de ozonación.

GENERADOR DE OZONO**TABLA 3.1 Características y condiciones de operación determinadas en campo del generador de ozono.**

CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
Número de unidades: 1	Es el tipo de generador más recomendado por expertos en el área (Langlais et al. 1991).
Tipo de generador: Tubos	

<p>Marca: KAUFMANN UMWELTECHNIK</p>	<p>La marca seleccionada no se encuentra dentro de las más conocidas: TRIALIGAZ (Francia), SIEMMENS (Alemania) y OSMONICS (USA). Los datos de diseño obtenidos se adaptan también a las especificaciones de los generadores comerciales, La selección de los generadores de ozono se basa en la siguiente información:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de generador (descarga de corona, fotoquímico, radioquímico). • Tamaño óptimo del generador de ozono. • Costos de consumo de energía. • Evaluación de disponibilidad y costo de oxígeno o por aire (tipo de gas alimentado). • Disponibilidad de componentes, por mantenimiento. • Costos de operación y mantenimiento. • Tipo de sistema de destructor de ozono, eficiencias de reducción.
<p>Principio de la generación:</p>	<p>No se encontró información relacionada a este dato. Sin embargo, el método más común es el de descarga de corona (Langlais <i>et al.</i> 1991).</p>
<p>Voltaje: 400 voltios Amperaje: 700 Amps.</p>	
<p>Gas generador: Oxígeno criogénico de alta pureza marca INFRA tanque de 6018 litros.</p>	<p>Es el menos recomendado desde el punto de vista técnico-económico para las plantas con capacidad de 70 LPS (Langlais <i>et al.</i> 1991).</p>
<p>Consumo de gas: 537 KgO₂/día</p>	<p>La carga hidráulica resultante al aplicar este flujo sobre un área del contactor de 8.04 m² (2.4 m³/h/m²) corresponde al límite practicado en Francia (Langlais <i>et al.</i> 1991).</p>
<p>Flujo del gas: 20 m³/h (333.33 SLPM)</p>	

TABLA 3.1 Características y condiciones de operación determinadas en campo del generador de ozono (continuación).

CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
<p>Concentración de ozono en el gas: 100 Kg O₃/m³ NTP. Producción de O₃ = 2.268 Kg O₃/h = 2268 g O₃/h 1.1352 m³ O₃/h</p>	<p>La carga hidráulica resultante al aplicar este flujo sobre un área del contactor de 8.04 m² (2.4 m³/h/m²) corresponde al límite practicado en Francia (Langlais <i>et al.</i> 1991).</p>

Consumo de O ₂ = 28.38 m ³ O ₂ /h (907.20 Kg O ₂ /día)	Este valor corresponde a una concentración normal reportada para generadores que funcionan con oxígeno alta pureza. Sin embargo, como se señaló anteriormente este valor no se justifica con base en los resultados de pruebas de tratabilidad, ni en criterios de especificación de generadores para tratamiento de agua potable (13-26 mg O ₃ /L)
Dosis de ozono calculada: 9 mg/L	Dosis más elevada que el valor recomendado para la oxidación de aguas potables (2-6 mg/L) (Langlais et al; 1991). Lo anterior, trajo como consecuencia el cálculo de una concentración de ozono en el gas de alimentación excesivamente elevado (76.8 g O ₃ /m ³), comparado con los criterios técnico-económicos que se recomiendan para el tratamiento de aguas potables (13-26 g O ₃ /m ³).

La siguiente tabla presenta una comparación de las características del generador de ozono instalado y de un equipo propuesto con base en criterios generales establecidos (Langlais et al. 1991).

TABLA 3.2 Comparación de las características del generador de ozono instalado y del propuesto con base en criterios técnico-económicos generales (Langlais et al. 1991)

CONCEPTOS DETERMINADOS EN CAMPO	CONCEPTOS PROPUESTOS
Características del generador de ozono instalado en campo	Características del generador de ozono propuesto
Dosis de ozono calculada: 9 mg/L	Dosis de ozono propuesta: 5 mg/L
Número de unidades: 1	Número de unidades: 1
Tipo de generador: Tubos	Tipo de generador: Tubos

TABLA 3.2 Comparación de las características del generador de ozono instalado y del propuesto con base en criterios técnico-económicos generales (continuación Langlais et al. 1991)

CONCEPTOS DETERMINADOS EN CAMPO	CONCEPTOS PROPUESTOS
Características del generador de ozono instalado en campo	Características del generador de ozono propuesto
Marca:KAUFMANN UMWELTTECHNIK	Marca: OSMONICS, Modelo HC-8

Principio de la generación: _____	Principio de la generación: Descarga de corona
Voltaje: 400 voltios Amperaje: 700 amperes	Voltaje: 460 voltios Consumo máximo de potencia : 13 KW
Gas generador: Oxígeno criogénico de alta pureza marca INFRA tanque de 6018 litros.	Gas generador: Aire enriquecido de oxígeno
Consumo de gas: 28.38 m ³ O ₂ /h (907.20 Kg O ₂ /día).	Consumo de gas: 44.08 m ³ O ₂ /h
Flujo del gas: 20 m ³ /h	Flujo del gas: 20 m ³ /h
Concentración de ozono en el gas: 87.6 KgO ₃ /m ³ NTP (6%).	Concentración de ozono en el gas: 28.2 KgO ₃ /m ³ NTP (2%).
Producción de O ₃ = 2.268 Kg O ₃ /h	Producción de O ₃ = 2.268 Kg O ₃ /h

Nota 1: El cálculo se presenta desarrollado en renglones anteriores.

Nota 2: La concentración del ozono se puede aumentar, incrementando la frecuencia del generador, reduciendo la cantidad de oxígeno alimentado. Sin embargo, una menor corriente de alimentación puede reducir la relación gas líquido, teniendo consecuencia directa en que la transferencia de ozono se vea afectada

Memoria de cálculo para el dimensionamiento del generador de ozono propuesto.

Para fines prácticos, en este trabajo se asigna una nomenclatura que se presenta a continuación:

- Q = Gasto de agua a tratar (L/s).
- D-O₃ = Dosis de ozono (mg/L).
- O₃-req = Ozono requerido (Kg O₃/h).
- VO₃-req = Flujo de ozono requerido (m³ O₃/h).
- VO₂-req = Flujo de oxígeno requerido (m³ O₂/h).
- ρOzono = Densidad del ozono a condiciones estándar de temperatura y presión.
- ρOxígeno = Densidad del oxígeno a condiciones estándar de temperatura y presión.
- C-O₃ = Concentración del ozono generado (g O₃ /m³ gas).

* Cálculo del ozono requerido (O₃-req):

- Dosis de ozono (D-O₃) = 5 mg/L (5 mg de ozono por litro de agua a tratar). Gasto de agua a tratar (Q) = 70 L/s.

$$O_3\text{-req} = D\text{-}O_3 \cdot Q = 5 \text{ mg/L} \cdot 70 \text{ L/s} \cdot 3600 \text{ s/h} = 1.26 \text{ Kg/h}$$

$$O_3 - req. = 1.26 \frac{kgO_3}{h}$$

* Cálculo del flujo de ozono requerido (VO_3 -req)

La densidad del Ozono (pozono), a condiciones normales de temperatura y presión (0 °C y 1 atmósfera).

$$\rho_{ozono} = \frac{PM_{ozono} \times P}{R \times T}$$

Donde:

PM ozono = 48 g/mol

P = Presión (atmósferas) = 1 atm

R = Constante = 0.082 (L*atm)/(mol.K)

Temperatura = Temperatura (K) = 273 K

$$\rho_{ozono} = 2.144 \frac{g}{L} = 2.144 \frac{Kg}{m^3} (@P = 1 \text{ atm}; T = 273K)$$

$$VO_3 - req = \frac{O_3 - req}{\rho_{ozono}}$$

$$VO_3 - req = \frac{1.26 \frac{KgO_3}{h}}{2.144 \frac{Kg}{m^3}} = 0.587 \frac{m^3}{h} (@P = 1 \text{ atm}; T = 273K)$$

* Cálculo del flujo de oxígeno requerido (VO_2 -req)

Se recomienda que el gas inyectado al agua de pozo contenga un 2% en peso de ozono (13-26 mg/L) por oxígeno alimentado (Langlais *et al.* 1991).

Por lo tanto:

% en peso de ozono alimentado (%w ozono): 2 %

Densidad del oxígeno ($\rho_{oxigeno}$)

A una temperatura de 0 °C (273 K) y una presión de 1 atm.

$$\rho_{oxigeno} = \frac{PM_{oxigeno} \times P}{R \times T}$$

Donde:

PM oxígeno = 32 g/mol

P = Presión (atmósferas) = 1 atm

R = Constante = 0.082 (L*atm)/(mol.K)

Temperatura = Temperatura (K) = 273 K

$$\rho_{\text{oxígeno}} = \frac{32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 1 \text{ atm}}{0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 293 \text{ K}} = 1.429 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

$$\rho_{\text{oxígeno}} = 1.429 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 1.429 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad (@P = 1 \text{ atm}; T = 273\text{K})$$

El flujo de oxígeno requerido ($VO_{2\text{ req}}$), se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$VO_{2\text{-req}} = \frac{Ozono_{req}}{\rho_{\text{oxígeno}} \times \%W_{ozon}} = \frac{1.26 \frac{\text{Kg}O_3}{h}}{1.429 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{2}{100}} = 44.08 \frac{\text{m}^3}{h}$$

$$VO_{2\text{-req}} = 44.08 \frac{\text{m}^3}{h} \quad (@P = 1 \text{ atm}; T = 273\text{K})$$

* Cálculo de la concentración de ozono generado (C-O₃)

$$C - O_3 = \frac{1.26 \text{ Kg}O_3 / h}{(44.08 \frac{\text{m}^3}{h} + 0.587 \frac{\text{m}^3}{h})} = 0.0282 \frac{\text{kg} \cdot O_3}{\text{m}^3 \text{ gas}} = 28.2 \frac{\text{g} \cdot O_3}{\text{m}^3 \text{ gas}}$$

$$C - O_3 = 28.2 \frac{\text{g} \cdot O_3}{\text{m}^3 \text{ gas}} \quad \text{Este valor concuerda con el valor reportado por Langlais et al. 1991.}$$

DIFUSIÓN DE OZONO

TABLA 3.3 Características y condiciones de operación determinadas en campo del equipo del sistema de difusión de ozono.

CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
Flujo de agua a tratar: 237 m ³ /h (75 LPS).	Es uno de los equipos más importantes del sistema, ya que este equipo permite la difusión y transferencia del ozono al agua. El diseño de este sistema es altamente complejo y las metodologías de diseño, no se encuentran fácilmente disponibles al público. Debido a esto, son los propios fabricantes que a partir de datos básicos (flujos, dosis, etc.), quienes realizan el diseño de estos sistemas.
Tipo: Mezclador estático	
Caída de presión: 0.05 bar = 37.5 mm Hg = 4.93 * 10 ⁻² atms.	

Longitud: 320 mm Diámetro: 200 mm	<p>El diseño generalmente se basa en la evaluación de la solubilidad de saturación del gas en el agua a tratar para una concentración específica de ozono en el gas.</p> <p>El diseñador desarrolla, basándose en los requerimientos específicos, la curva de solubilidad de la mezcla ozono / oxígeno. Todos los puntos por debajo de la curva de solubilidad indican dosis y concentraciones que pueden aplicarse vía inyección y los cuales pueden permanecer en solución si la presión no cambia a lo largo del sistema. Una vez que la transferencia de masa se ha realizado, el diseñador debe considerar un tiempo de contacto adecuado.</p>
--------------------------------------	---

TABLA 3.3 Características y condiciones de operación determinadas en campo del equipo del sistema de difusión de ozono (continuación).

CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
Flujo de agua a tratar: 237 m ³ /h (70 LPS). Tipo: Mezclador estático Caída de presión: .05 bar = 37.5 mm Hg = 4.93 * 10 ⁻² atms Longitud: 320 mm Diámetro: 200 mm	<p>La transferencia efectiva del ozono en el agua es una etapa crítica en el proceso de ozonación. Dentro de las ventajas más importantes está el hecho de obtener tiempos muy cortos de transferencia ó contacto líquido-gas.</p> <p>Dentro de las marcas más conocidas se encuentra SIDAC, LIGHTHIN-MESA y SÜLZER, las cuales fabrican mezcladores estáticos de gran calidad y altos rendimientos de disolución de ozono.</p>

TABLA 3.4 Características y observaciones realizadas sobre el diseño y especificación de equipo del Tanque de contacto de ozono.

CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
Tipo de tanque: Cilindro Vertical Material: Acero inoxidable Altura tanque = 3.91 m Volumen del tanque = 31.44 m ³ Volumen útil = 28.23 m ³	El tipo de tanque seleccionado es el recomendado cuando la función del ozono es la de oxidación. El material también es el adecuado debido a que el ozono es altamente oxidante.

Tiempo de residencia real = 6.7 minutos	Tiempo un poco grande con respecto a los reportados para sistemas que funcionan con mezcladores estáticos (1-3 minutos).
Tipo de flujo: A contracorriente Descendente (agua) Ascendente (gas)	Tipo de flujo el más eficiente para la transferencia de masa.
Carga hidráulica: 2.41 m ³ gas/h/m ²	Valor límite aplicado en plantas de Francia (Langlais <i>et al.</i> ; 1991).

TABLA 3.5 Comparación de las características del generador de ozono instalado y del propuesto con base en criterios técnico-económicos generales (Langlais *et al.* 1991)

CONCEPTOS DETERMINADOS EN CAMPO	CONCEPTOS PROPUESTOS
Tipo de tanque: Cilindro Vertical Material: Acero inoxidable Diámetro: 3.2 m Altura tanque = 3.91 m Volumen del tanque = 31.44 m ³ Volumen útil = 28.23 m ³	Tipo de tanque: Cilindro Vertical Material: Acero inoxidable Diámetro: 3.6 m Altura tanque = 3.1 m Volumen del tanque = 31.44 m ³ Volumen útil = 21 m ³
Tiempo de residencia real = 6.7 minutos	Tiempo de residencia = 5 minutos
Tipo de flujo: A contracorriente Descendente (agua) Ascendente (gas)	Tipo de flujo: A contracorriente Descendente (agua) Ascendente (gas)
Carga hidráulica: 2.41 m ³ gas/h/m ²	Carga hidráulica: 36.6 m ³ gas/h/m ²

Memoria de cálculo del tanque de contacto instalado

* Cálculo del volumen requerido del tanque de contacto de ozonación

Dimensiones reales del tanque de contacto de ozono

Diámetro interno = 3.2 m

Altura tanque = 3.91 m

Altura promedio total tanque = 3.511 m

Volumen real promedio del tanque (V_{rtc})

$$V_{rtc} = \text{área } t_c \times \text{altura promedio tanque} = 8.04 \text{ m}^2 \times 3.511 \text{ m} = 28.23 \text{ m}^3$$

Tiempo de residencia promedio real ($Trtc$)

$$Trtc = V_{rtc}/Q = 28.23 \text{ m}^3/4.2 \text{ m}^3/\text{min} = 6.72 \text{ minutos}$$

Memoria de cálculo del tanque contactor de ozono propuesto

* Cálculo del área de acuerdo al método simplificado de disolución de ozono ó relación flujo líquido / área del contactor (Langlais *et al.* 1991)

Datos

Flujo del agua= $Q_1 = 70 \text{ L/s} = 252 \text{ m}^3/\text{h}$

Dosis de ozono a aplicar = 5 mg/L (se consideró este dato debido a que es la dosis máxima que se aplica en tratamiento de aguas para la materia orgánica)

Relación $Q_1/\text{Area} = 36.6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (valor obtenido de la figura 3.1, Langlais *et al.* 1991)

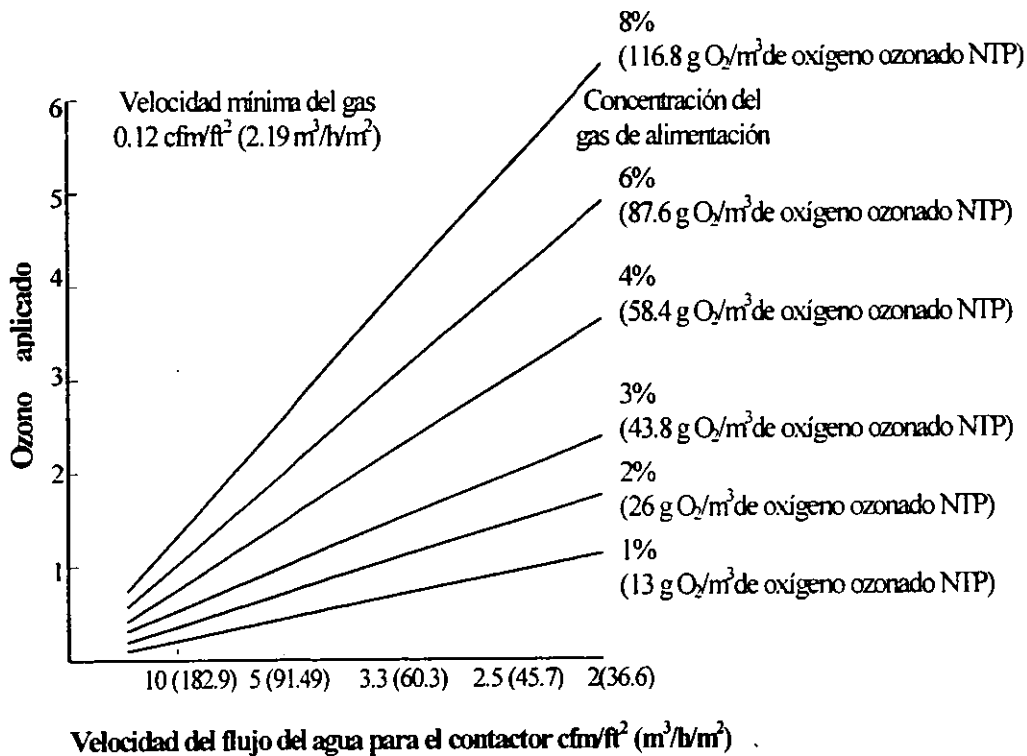


FIGURA 3.3 Relación dosis de ozono aplicada / velocidad del agua para diferentes concentraciones iniciales de ozono en el gas (Langlais *et al.* 1991).

Despejando el área, se calcula un valor de:

$$A = (252 \text{ m}^3/\text{h}) / 36.6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2 = 6.9 \text{ m}^2$$

Con este valor, se calcula el diámetro del tanque:

$$D = 2.96 \text{ m}$$

El volumen del tanque se calcula a partir del flujo y el tiempo de residencia:

$$V_{\text{tanquecontacto}} = 21,000 \cdot \text{litros} = 21 \cdot \text{m}^3$$

* Cálculo de la altura del tanque de contacto de ozono (htc)

$$h_{tc} = \frac{V_{tc}}{Area_{tc}} = \frac{21m^3}{6.9m^2} = 3.04m$$

Dimensiones reales del tanque de contacto de ozono

Diámetro interno = 3.2 m

Altura tanque = 3.91 m

Altura promedio total tanque = 3.511 m

Volumen real promedio del tanque (Vrtc)

$$V_{rtc} = \text{área tc} \times \text{altura promedio tanque} = 6.9 \text{ m}^2 \times 3.511 \text{ m} = 24.21 \text{ m}^3$$

Tiempo de residencia promedio real (Trtc)

$$Trtc = V_{rtc}/Q = 24.21 \text{ m}^3/4.2 \text{ m}^3/\text{min} = 5.76 \text{ minutos}$$

DESTRUCTOR DE OZONO***TABLA 3.6 Características y condiciones de operación del destructor de ozono.***

OCARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
Tipo: Catalítico-Térmico	El tipo de destructor de ozono que se debe utilizar es catalítico-térmico debido a que se utilizará una mezcla de ozono-oxígeno alta pureza. No se aconseja el de tipo térmico ya que se tendría el peligro de explosión. El tipo de catalizador más usado es el de paladio, manganeso y óxidos de níquel. (Masschelein, 1982)
Temperatura de trabajo: 45 °C	Valor normal reportado en la literatura para este tipo de destructores.
Dimensiones: diámetro= 0.32 m Altura= 1.1 m	
Material: Acero inoxidable	Es el material recomendado para resistir el ataque oxidante del ozono.
Flujo de gas:	No se pudo medir este parámetro (flujo) en campo, ni tampoco se encontró información.
Concentración de O ₃ gas de entrada: 1.8 mg/L gas de salida: 0.01 mg/L	Valores normales reportados en literatura.

SISTEMA DE BIOADSORCIÓN SOBRE CARBÓN ACTIVADO BIOLÓGICO

El proceso de bioadsorción está compuesto de dos sistemas principales: 1) columna empacada de carbón activado y 2) sistema de retrolavado.

Columna empacada de carbón activado biológico.

El dimensionamiento de los filtros y sus componentes dependen principalmente de:

- Las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua a filtrar.
- Criterios de diseño resultantes de las pruebas de tratabilidad y de planta piloto.
- Tipo, naturaleza y tamaño del material filtrante a utilizar (en este caso carbón activado granular especial para tratamiento biológico).
- Tipo de filtro (a presión).
- Calidad final del agua tratada.

La tendencia actual es el diseño basado en minicolumnas de carbón activado, las cuales permiten obtener tiempos cortos de funcionamiento y resultados confiables para el escalamiento a nivel planta de columnas de carbón activado. Dentro de los datos que se obtienen con estas minicolumnas se tienen la altura de lecho del carbón activado, el volumen de agua que se puede pasar a través del lecho sin pasar de la concentración máxima permisible y hasta la saturación de los granos.

TABLA 3.7 Características y observaciones realizadas del equipo de la columna empacada de carbón activado biológico.

CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
Tipo de columna: Cilíndrica vertical a presión	Es uno de los tipos utilizados para el tratamiento de agua potable.
Material: Acero inoxidable	Es uno de los materiales empleados para construir columnas de carbón activado.
Tipo de flujo: Descendente	El tipo de alimentación que se utiliza más comúnmente es de ascendente debido a que evita la formación de grietas a través del lecho, además de que se presentan menos caídas de presión por compresión del lecho.
Número de filtros: Uno	En general se recomienda que al menos se instalen dos filtros de carbón activado, por cuestiones operativas y de mantenimiento. Siendo lo óptimo 4 filtros, para manejar velocidades de filtración adecuadas.
Altura del lecho: 2.5 m	La altura del lecho de carbón activado indicada es de 2.5 m, quedando dentro el rango de 1.8 a 3.6 m recomendado
Area del tanque: 8.04m ² Diámetro del tanque del filtro = 3.2m	

Tiempo de residencia: 5 minutos
 Gasto de agua a tratar (Q) = 70 L/s = 4.2 m³/min = 252 m³/h.
 Carga superficial = 31 m³/(m²/h)
 Caída máxima de presión en filtro limpio = 0.1 Kg/cm².

TABLA 3.7 Características y observaciones realizadas del equipo de la columna empacada de carbón activado biológico (continuación).

CARACTERISTICAS	OBSERVACIONES
<p>Caída máxima de presión en filtro sucio: 0.5 Kg/cm²</p> <p>Carbón activado biológico, marca PICABIOL Es un carbón activado granular de alta macroporosidad (origen madera), especialmente diseñado para purificación biológica de agua potable, presenta las siguientes características:</p> <p>Alta densidad bacteriana: remoción de materia orgánica biodegradable.</p> <p>Baja densidad: Reduce los requerimientos de retrolavado y los costos de bombeo.</p> <p>Contenido bajo de cenizas de minerales: No altera la calidad del agua filtrada.</p> <p>Distribución homogénea de la partícula: amplios ciclos de filtración.</p>	<p>La carga superficial de operación indicada no es adecuada. Esto implica una elevada velocidad de filtración, teniendo consecuencia directa en una baja remoción de la materia orgánica contenida y una baja asimilación y remoción de la materia orgánica por parte de los microorganismos. Las altas velocidades de filtración ocasionan agrietamiento del lecho filtrante, debido a que la resistencia al flujo es menor en las paredes del filtro, el carbón activado es forzado a separarse de las paredes; así el agua recorre circuitos cortos a través de las grietas producidas, bajando la eficiencia del proceso. Igualmente, las altas velocidades de filtración pueden abrir grietas en el cuerpo del lecho.</p> <p>La ventaja principal que este adsorbente es que es vendido con una biomasa fija y, casi listo para funcionar por los mecanismos combinados de adsorción-biodegradación de contaminantes. La desventaja principal es su costo.</p> <p>No se tienen datos de la granulometría del carbón. Cabe mencionar que es importante seleccionar carbones activados con coeficientes de uniformidad (C.U.) mayores a 1.9 para promover la estratificación del lecho después del retrolavado y de esta manera mantener el frente de adsorción.</p>

Dimensionamiento del filtro de carbón activado biológico

El dimensionamiento de este equipo es muy complejo, normalmente se deben disponer de datos de curvas de saturación de actividad biológica de bacterias de la columna y laboratorio para modelar el fenómeno mediante el uso de modelos. Debido a esta falta de información, la revisión del diseño se hizo como antiguamente se realizaba, es decir, como un filtro.

Datos

Flujo = 70 L/s = 252 m³/hr = 4.2 m³/min

Carga hidráulica superficial de filtración = 31 m³/m² h, en otra parte del documento indican 29.5

Caída máxima de presión en filtro limpio 0.1 Kg/cm²

Caída máxima de presión en filtro sucio: 0.5 Kg/cm²

Tasa de retrolavado = 35.4 m³/m² h

El dimensionamiento del filtro se realizó tomando en cuenta como criterio de diseño la carga superficial de filtración (31 m³/m²/h).

$$\text{Cálculo del área requerida del filtro} = \frac{Q_s}{C_s} = \frac{252 \frac{m^3}{hr}}{31 \frac{m^3}{m^2 \cdot hr}} = 8.1 m^2$$

$$\text{Cálculo del diámetro del filtro (df)} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8.1^2}{\pi}} = 3.2 m$$

Se considera un filtro de flujo descendente, por lo que requiere de un fondo de arena para la retención de finos. Se requiere de un lecho máximo de 10 cm.

El lecho empacado de carbón granular, deberá estar en un rango de 0.8 m a 3.0 m, para este caso se utilizó 2.5 m.

Altura total del empaque = 0.1 m de arena + 2.5 m de carbón = 2.6 m

Altura total requerida = empaque + expansión del lecho

Expansión del lecho = 40 % máximo

Cálculo expansión de lecho para retrolavado = 2.6 * 0.4 = 1.04m

Altura total del tanque = 2.6m + 1.04 m = 3.64 m se ajusta a 3.75m

Observación: El porcentaje de expansión del lecho lo determinan el coeficiente de uniformidad de las partículas de carbón (C.U.), la velocidad del agua de retrolavado y la temperatura. Para tamaños recomendados del coeficiente de uniformidad (1.9-2.2) y a una temperatura de 25°C, las velocidades recomendadas del agua de retrolavado deberán estar comprendidas dentro del intervalo de 44-64m³/hr/m² para poder obtener 40% de expansión del lecho (AWWA, 1992).

Considerando que se tiene como carbón activado el PICABIOL, este material presenta un C.U. =1.9, y con la velocidad de retrolavado de $37 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^2$, el porcentaje de expansión que se obtendrá será solamente de 5% como máximo (AWWA, 1992).

TABLA 3.8 características y observaciones realizadas del retrolavado de la columna de bioadsorción.

CARACTERISTICA	OBSERVACIONES
Tipo de retrolavado: Ascendente	Tipo de retrolavado más utilizado en plantas.
Tipo de agua de retrolavado: Efluente de la etapa de desinfección de la planta	Este tipo de agua no se recomienda normalmente por la presencia de cloro. Este oxidante puede inhibir el crecimiento biológico sobre las partículas de carbón activado. Además, por la reacción de óxido-reducción que se verifica entre el cloro y el carbón, las partículas de este material se vuelven quebradizas. Esto ocasiona que se rompan fácilmente y, se tengan pérdidas importantes de carbón durante el retrolavado.
Tasa de retrolavado (Trf) = $37 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ (15.5 gpm/ft^2), en otra parte del documento se menciona un valor de $35.4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{hr}$	La tasa de retrolavado utilizada ($37 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^2$) queda comprendida dentro del intervalo recomendado y practicado en plantas de tratamiento $19-74 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ (8-30 gpm/ft^2) por la American Water Works Association Research Foundation (1992).
Duración del retrolavado (trv) = 5 minutos	
% expansión del lecho de retrolavado = 40%	El porcentaje de expansión de lecho especificado en el diseño es adecuado (40%); sin embargo, la velocidad del agua de retrolavado ($37 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^2$) no permitirá alcanzar ese valor (5% de expansión) (@ $T= 25^\circ\text{C}$ y el carbón activado PICABIOL con un C.U.= 1.9).
Agua de retrolavado: Efluente clorado de la planta	El agua clorada es utilizada para el retrolavado del filtro ocasionando daños en la población bacteriana desarrollada en los granos del carbón activado.
Frecuencia de retrolavado: Cada 3 días	Frecuencia demasiado alta si se desea promover el crecimiento y actividad microbianos. El valor recomendado se de 7 días.
Duración del retrolavado: 30 minutos	

Dimensionamiento del retrolavado de la columna de bioadsorción

Datos:

Tasa de retrolavado (Trf) = $37 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^2$ ($15.5 \text{ gpm}/\text{ft}^2$).

Área del filtro = 8.2 m^2

Tiempo de retrolavado (trv) = 5 minutos

Flujo requerido (Qrf) = $Trf * Af = 0.37 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hr} * 8.2 \text{ m}^2 = 299.7 \text{ m}^3/\text{hr}$

Flujo requerido (Qrf) = se ajusta a $300 \text{ m}^3/\text{hr} = 5 \text{ m}^3/\text{min}$.

Cálculo del volumen del tanque de almacenamiento ($Vtar$) = $Qrf * trv$

$Vtar = 5 \text{ m}^3/\text{min} * 5 \text{ min} = 25 \text{ m}^3$ (volumen mínimo)

Se considera un volumen real del tanque de retrolavado = 35 m^3

Por lo tanto: $Vtar = 35 \text{ m}^3$

Tiempo de retención real = $35 \text{ m}^3 / 5 \text{ m}^3/\text{min} = 7 \text{ min}$

Bomba de retrolavado

Datos

Flujo de retrolavado = $307 \text{ m}^3/\text{hr}$ (1350 gpm)

Presión de descarga = caída de presión en el filtro + pérdidas de presión

Caída de presión a condiciones más críticas = altura del empaque * 4 = $2.5 * 4 = 10 \text{ m}$

Pérdidas por fricción = 30% de caída de presión = $10 * 0.3 = 3$

Pérdida total de presión = $10\text{m} + 3\text{m} = 13\text{m}$ (42.65) se ajustó a $45 \text{ ft} = 13.7\text{m}$

Potencia de la bomba de retrolavado

Datos y criterios utilizados:

Flujo a manejar $Q = 307 \text{ m}^3/\text{hr}$. (1350 gpm)

Caída de presión (ΔH) = 13.71 m (45 ft)

Eficiencia de la bomba (η bomba) = 80%

esp general = 1.0

La caída de presión durante el retrolavado de la columna empacada de carbón activado está dada por la siguiente expresión:

$H_{total} = H_e + H_a$

H_e = caída de presión por la expansión del lecho

H_a = caída de presión en la tubería (Codos, válvulas, orificios, etc. del sistema de retrolavado), para calcularla se necesita conocer el arreglo interno del filtro.

La caída de presión durante el retrolavado de la columna empacada de carbón activado se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_e = L (1 - \epsilon_e)(s - 1)$$

h_e = caída de presión (m)

L = altura del lecho (m)

ϵ_e = porosidad del lecho expandido.

S = peso específico de carbón activado = 1.5 (valor tomado de otro tipo de carbón con características similares)

La porosidad del lecho expandido, se calcula mediante la siguiente ecuación

$$\epsilon_e = \frac{L(\epsilon - 1)}{L_e} + 1 = \frac{2.6(0.4 - 1)}{3.64} + 1 = 0.571$$

L = profundidad del lecho = 2.6 m calculado

L_e = altura del lecho expandido (40% de expansión del lecho) = 3.64

ϵ = porosidad del lecho = 0.4

El cálculo de la caída de presión a través del lecho es:

$$H_e = L (1 - \epsilon_e)(s - 1) = 2.6m(1 - 0.571)(1.5 - 1) = 0.557 \text{ m}$$

H_a = no se puede calcular.

Valor calculado H_{total} = 10 m

Cálculo potencia de la bomba

$$BHP = \frac{Q * \Delta H * \text{gravedad esp.}}{3960 * \eta \text{ bomba}}$$

$$BHP = \frac{1350 \cdot 45 \cdot 1.0}{3960 \cdot 0.8} = 19.2 \text{ HP (por sus siglas en ingles)}$$

Se selecciona una potencia de bomba

Potencia de la bomba = 25 HP

$$P \text{ bomba (hp)} = \frac{Q \text{ (gal/min)} * \Delta H \text{ (ft de fluido)} * \text{gravedad esp.}}{3960 * \eta \text{ bomba}}$$

Donde:

P_{bomba} :Energía requerida de la bomba.

ΔH :Cabeza total

Q : flujo a través de la bomba

η bomba: Eficiencia de la bomba.

Sin embargo, a esta potencia le falta agregar los factores de potencia y de eficiencia de motor y amperaje.

$$P_{\text{bomba}} \text{ (hp)} = \frac{134}{1000} \sqrt{3} * V \text{ (Voltz)} * A \text{ (amp)} * \eta_{\text{motor}} * F.P$$

Donde:

V: voltaje requerido para el motor, generalmente 575volts

A: amperaje requerido para el motor

η_{motor} : Eficiencia del motor

P.F.: Factor de potencia

3.2 Análisis de la eficiencia de tratamiento de los equipos de ozonación y bioadsorción de una planta potabilizadora

3.2.1 Programa de muestreo de agua y aforo

Con objeto de evaluar las condiciones actuales de operación de los equipos de la planta potabilizadora *en estudio*, se procedió a llevar a cabo monitoreos de la calidad del agua del influente y efluente, así como en cada proceso del tren de tratamiento. Estas actividades se realizaron durante un período de cuatro días alternados, tal como se indica en la tabla 3.9.

TABLA 3.9 Calendario de toma de muestras.

FECHA	Hora de inicio-Finalización	Observaciones
Martes 14 de marzo del 2000.	Inicio de muestreo 12:00 am	
Miércoles 15 de marzo del 2000.	Fin de muestreo 10:00 am	Traslado muestras a laboratorio
Jueves 16 de marzo (Paro de la planta por falta de oxígeno).	Inicio de muestreo 12:00 am	
Viernes 17 de marzo (Paro de la planta por falta de oxígeno).	Fin de muestreo 10:00 am	Traslado muestras a laboratorio
Jueves 23 de marzo del 2000.	Inicio de muestreo 12:00 am	
Viernes 24 de marzo del 2000.	Fin de muestreo 10:00 am	Traslado muestras a laboratorio
Martes 28 de marzo del 2000.	Inicio de muestreo 12:00 am	
Miércoles 29 de marzo del 2000.	Fin de muestreo 10:00 am	Traslado muestras a laboratorio

Durante la etapa de muestreo y caracterización se procedió a obtener muestras simples para análisis de campo (las cuales se obtuvieron cada 2-4 horas) y para muestras compuestas para análisis de laboratorio.

Es importante destacar que el objetivo principal del muestreo y caracterización de los parámetros considerados, es ratificar y complementar los datos recopilados, respecto a las eficiencias de operación, cantidad y calidad del agua tratada.

3.2.2 Muestreo y Análisis de Campo

Muestreo simple (puntual)

El muestreo simple de agua se efectuó el primer día cada 2 horas y en los siguientes muestreos cada 4 horas, durante un período cuatro días alternados. Simultáneamente a la toma de estas muestras, se realizará la determinación en campo de diferentes parámetros fisicoquímicos indicadores de la eficiencia de los procesos integrantes del tren de tratamiento de la planta potabilizadora a pie de pozo. A continuación se describen los puntos de muestreo y los parámetros a determinar en campo y en laboratorio.

Análisis de muestras de agua en campo

Se realizaron en campo (cada 2-4 horas), muestreos simples del influente y efluente final, así como del agua tratada de cada una de las etapas del tren de tratamiento. Estas mismas muestras fueron utilizadas para la preparación de las muestras compuestas de cada punto. En campo se determinaron los parámetros indicados en la tabla 3.10.

TABLA 3.10 Parámetros fisicoquímicos a determinar en campo.

	PARAMETRO	AGUA CRUDA	SALIDA OZONACION	SALIDA FILTRO BIOLÓGICO
BASE	Temperatura	X	X	X
	pH	X	X	X
	Conductividad eléctrica	X	X	X
	Sólidos disueltos totales (SDT)	X	X	X
	Color	X	X	X
	<i>Turbiedad</i>	X	X	X
ADICIONALES	Alcalinidad total	X	X	
	Ozono residual		X	
	<i>Oxígeno disuelto</i>		X	X
	Cloro residual			
	Nitrógeno amoniacal	X	X	X

Los resultados se representarán en tablas y gráficas en función de la hora del muestreo. La información se procesará y analizará para calcular parámetros estadísticos que nos permitan establecer el comportamiento de las características fisicoquímicas del agua en función del tiempo y de la etapa de tratamiento.

En el reporte fotográfico del análisis de muestras en campo, el cual es presentado en **ANEXO II** del presente trabajo, se ilustran (mediante fotografías) los diferentes análisis efectuados en la planta durante la campaña de muestreo.

De igual manera en el **ANEXO I** se presentan los equipos e instalaciones de la planta potabilizadora, con el fin de ubicar el lugar de trabajo y de muestreo.

Muestreo Compuesto

Las muestras compuestas se prepararon, con volúmenes equivalentes, a partir de las muestras simples tomadas a lo largo de 24 horas. La muestra compuesta se preservó debidamente para su análisis en laboratorio. Se obtuvieron 6 muestras simples por día para conformar una muestra compuesta por punto de muestreo como lo indica la tabla 3.11.

TABLA 3.11 Número de muestras (muestreo compuesto 24 Horas).

PARAMETRO	AGUA CRUDA	SALIDA OZONACION	SALIDA FILTRO BIOLÓGICO	TOTAL
Muestras Simples por Día Nota 1	12	12	12	36
Muestras Compuestas Nota 2	1	1	1	3

Nota 1 Considerando una frecuencia de muestreo de 4 horas, el volumen mínimo de muestra simple 6 litros.

Nota 2 Considerando un flujo constante de agua, la muestra compuesta se preparó a partir de volúmenes iguales de cada muestra puntual hasta completar un volumen de muestra compuesta de 6 litros.

El muestreo, almacenamiento y análisis de muestra deben cumplir con lo marcado en las normas oficiales Mexicanas y el Estandar Methods for análisis of

Parámetros determinados en muestras compuestas y análisis de laboratorio

Los parámetros a analizar dependen del equipo que se trate, como se indica en la tabla 3.12

TABLA 3.12 Parámetros fisicoquímicos a determinar en el laboratorio.

	PARAMETRO	AGUA CRUDA	SALIDA OZONACION	SALIDA FILTRO BIOLÓGICO
BASE	DQO soluble	X	X	X
	DQO total	X	X	X
	Fe-soluble	X	X	X
	Fe-total	X	X	X
	Mn-soluble	X	X	X
	Mn-total	X	X	X
	N-total	X	X	X
	N-orgánico	X	X	X
	N-nitritos	X	X	X
	N-nitratos	X	X	X
ADICIONALES	Sodio	X		
	Cloruros	X		
	Sulfatos	X		
	COD	X	X	X
	COT	X	X	X

3.3 Análisis estadístico de los resultados de caracterización fisicoquímica del agua cruda y tratada en cada etapa del tren de tratamiento

El análisis estadístico se realizó con base en los resultados de los parámetros fisicoquímicos determinados en campo para las muestras simples. Los resultados analíticos correspondientes a los cuatro muestreos se representan en las figuras 3.4-3.28. Los datos completos de los muestreos simples y compuestos se encuentran compilados en el anexo III de este trabajo.

Estas figuras presentan la evolución de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo del agua tomada en muestreos instantáneos, como una función del tiempo de muestreo en cada uno de las cinco etapas del tratamiento: 1) agua cruda, 2) salida de la torre de oxidación (agua ozonada) y 3) agua de salida del filtro de carbón activado biológico.

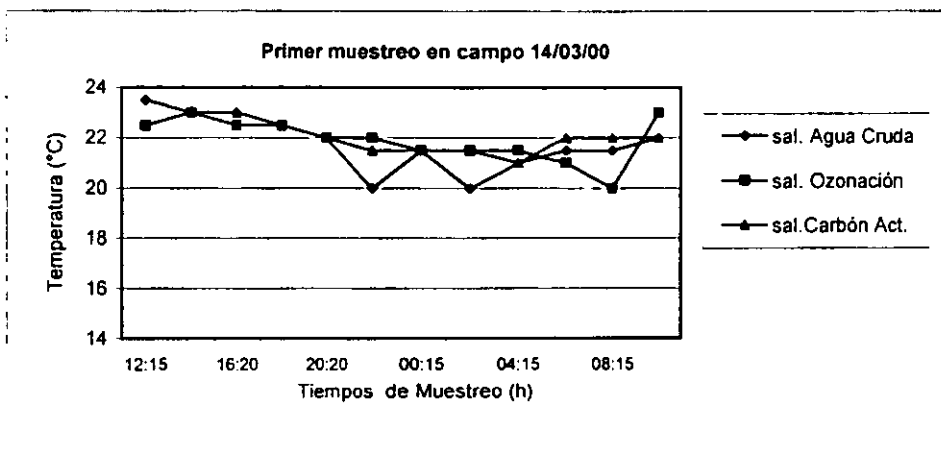


FIGURA 3.4 Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

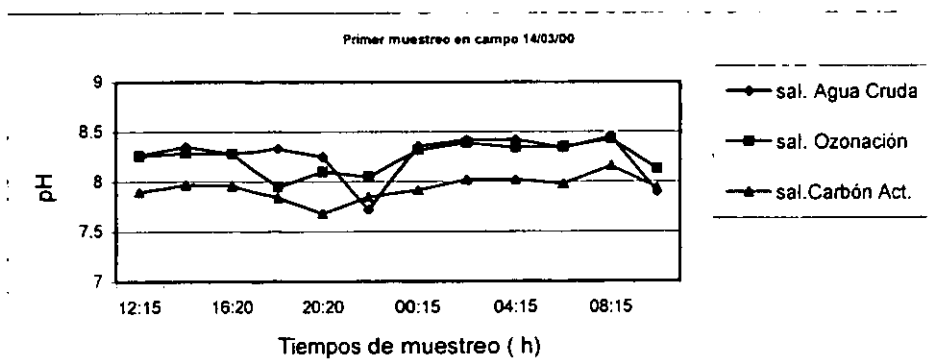


FIGURA 3.5 Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

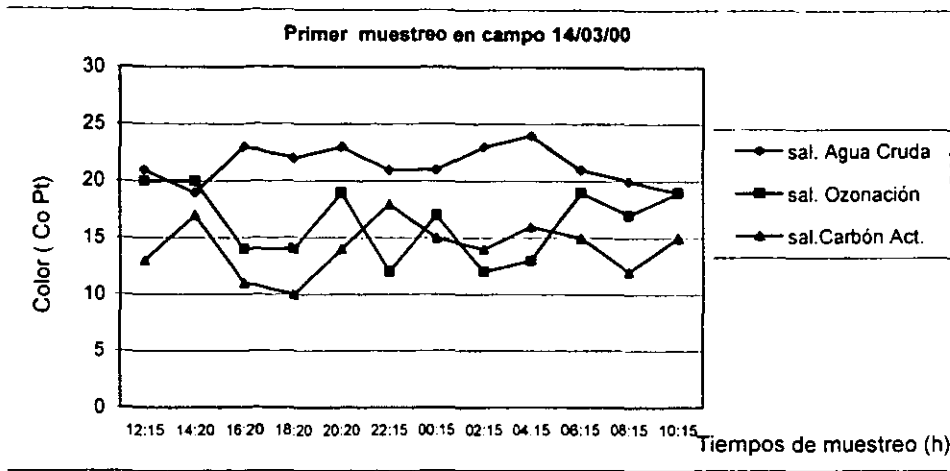


FIGURA 3.6 Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

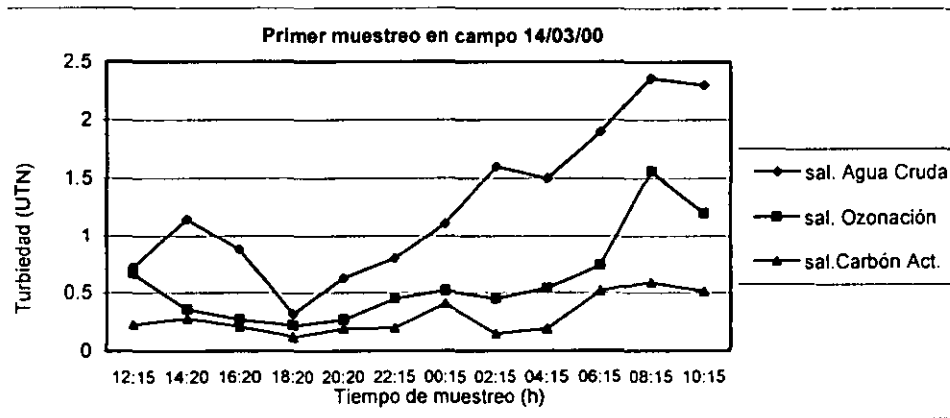


FIGURA 3.7 Evolución de la turbiedad del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

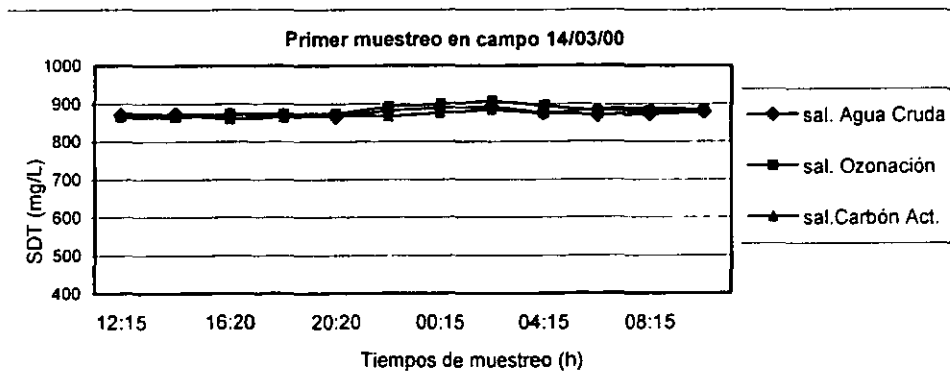


FIGURA 3.8 Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

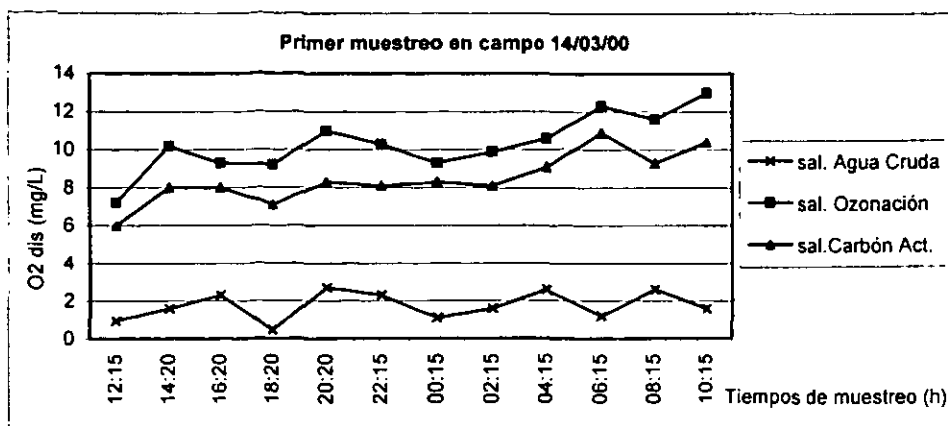


FIGURA 3.9 Evolución del oxígeno disuelto del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

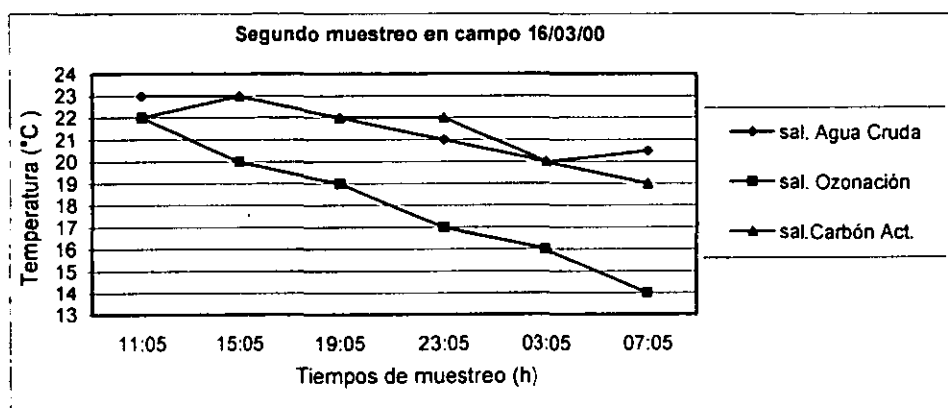


FIGURA 3.10 Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

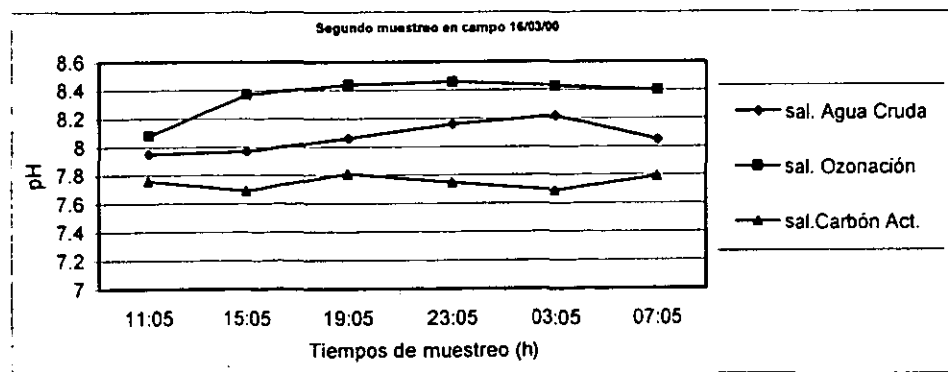


FIGURA 3.11 Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

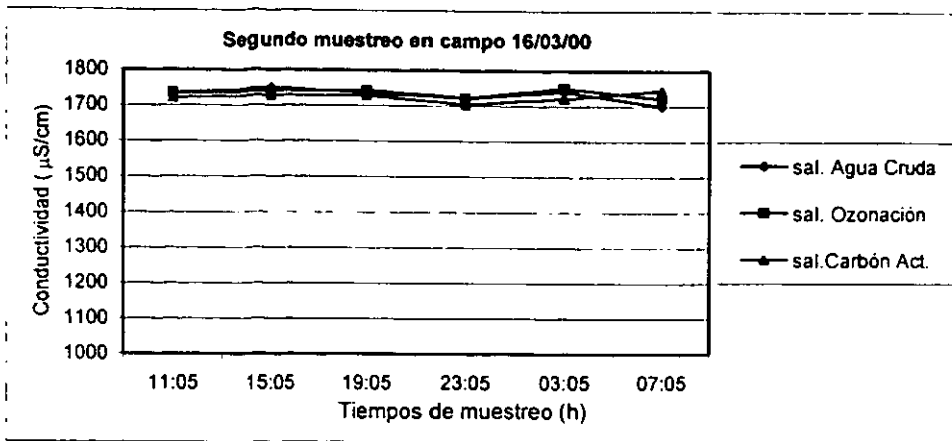


FIGURA 3.12 Evolución de la conductividad eléctrica del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

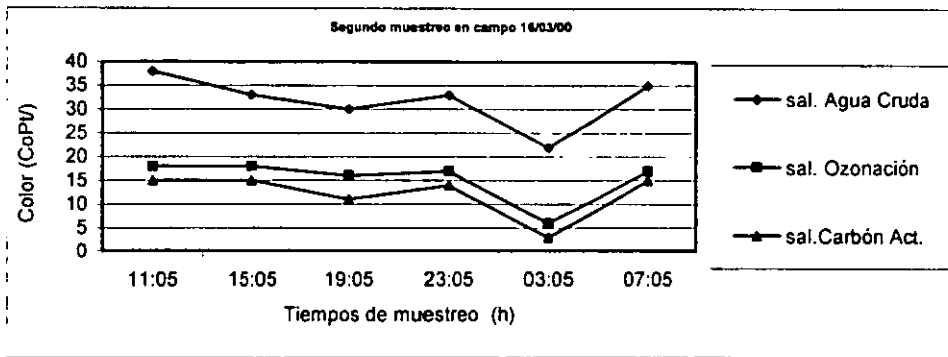


FIGURA 3.13 Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

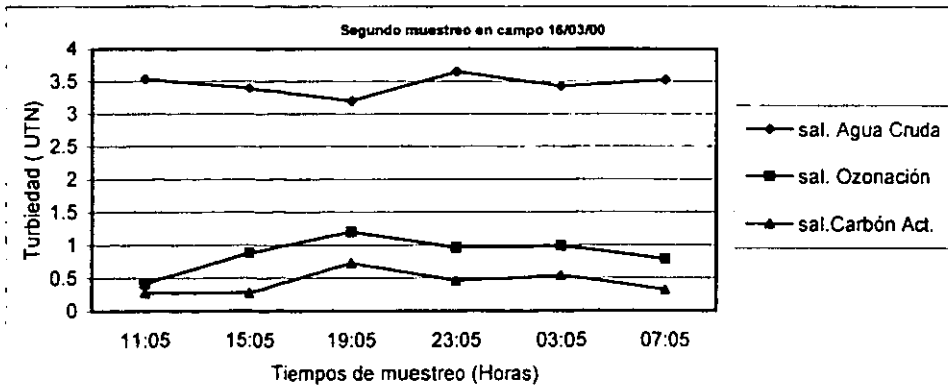


FIGURA 3.14 Evolución de la turbiedad del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

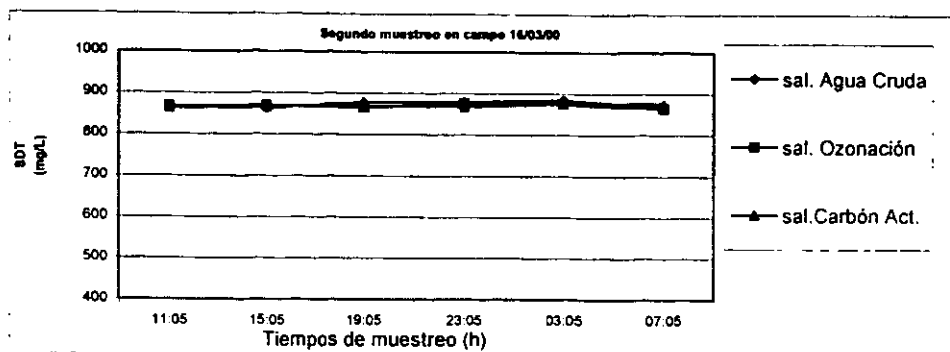


FIGURA 3.15 Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

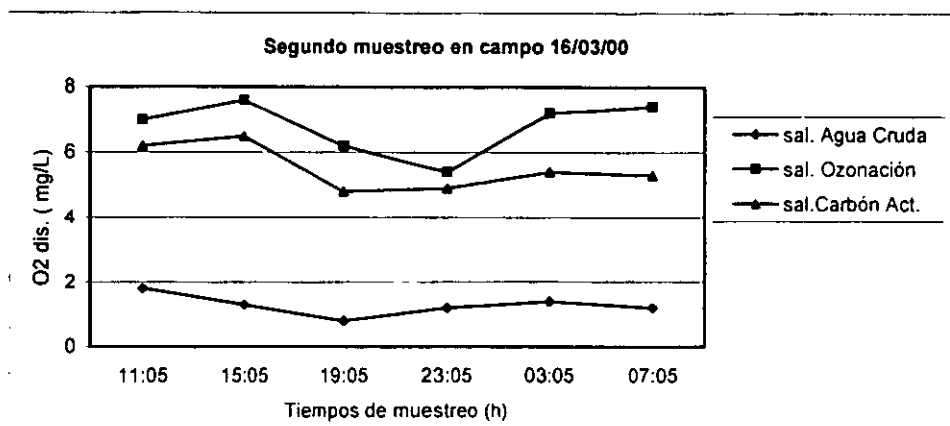


FIGURA 3.16 Evolución del oxígeno disuelto del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

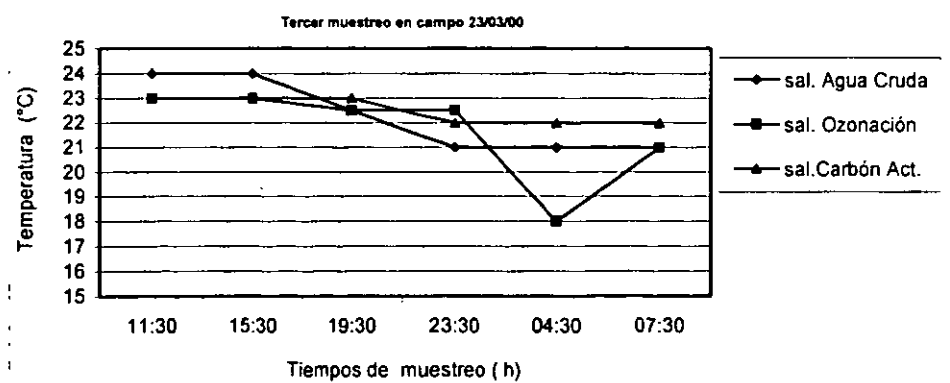


FIGURA 3.17 Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

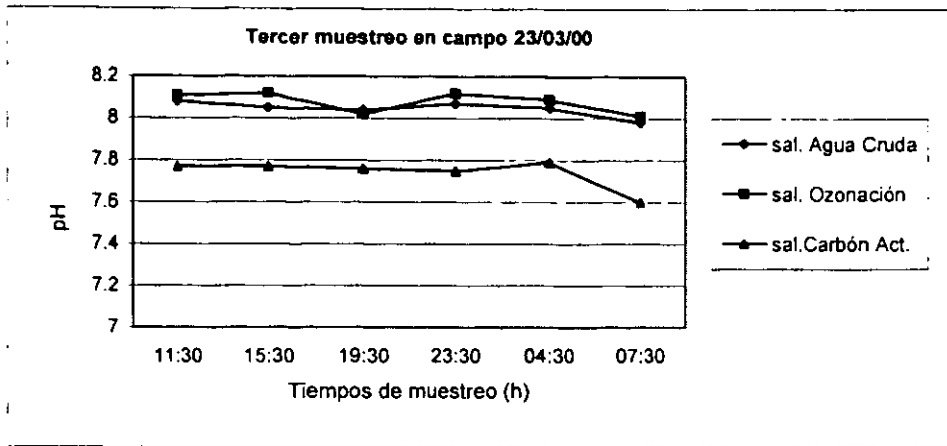


FIGURA 3.18 Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

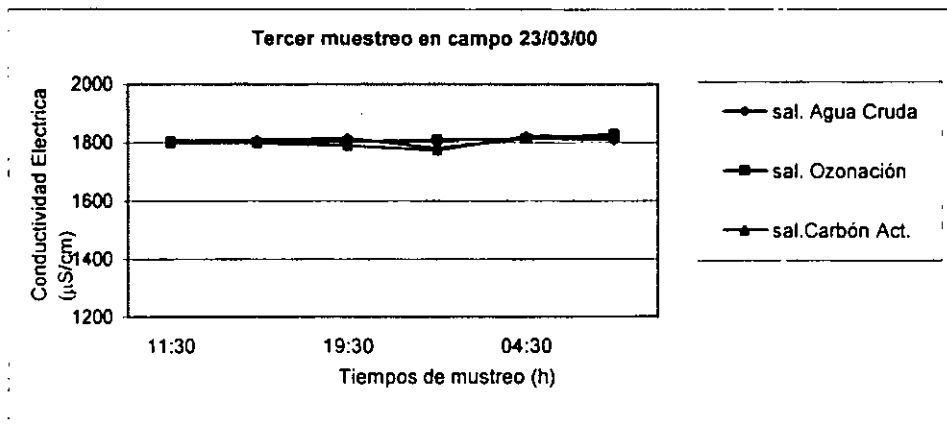


FIGURA 3.19 Evolución de la conductividad eléctrica del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

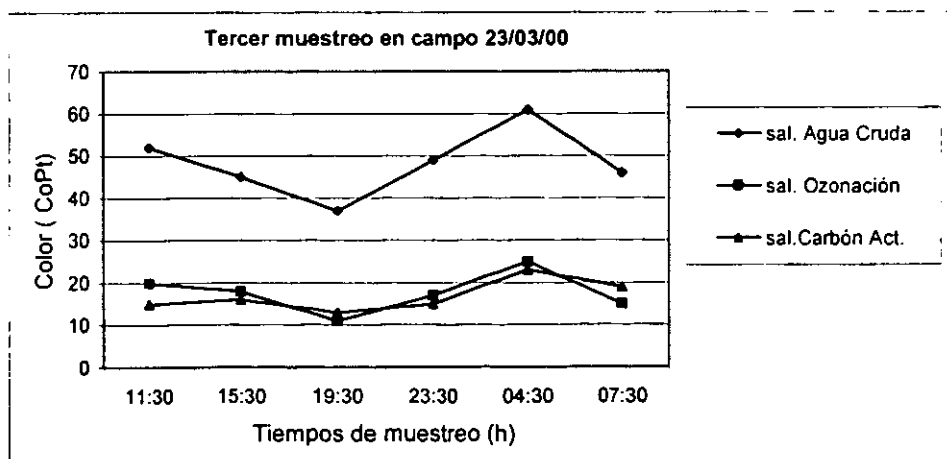


FIGURA 3.20 Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

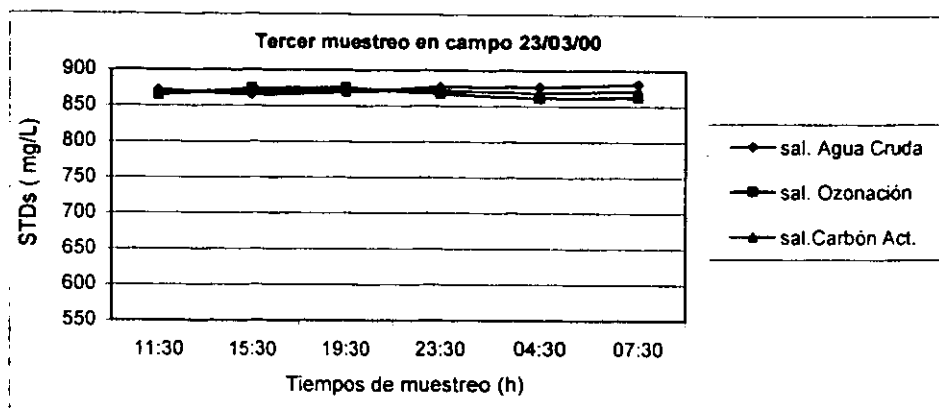


FIGURA 3.21 Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

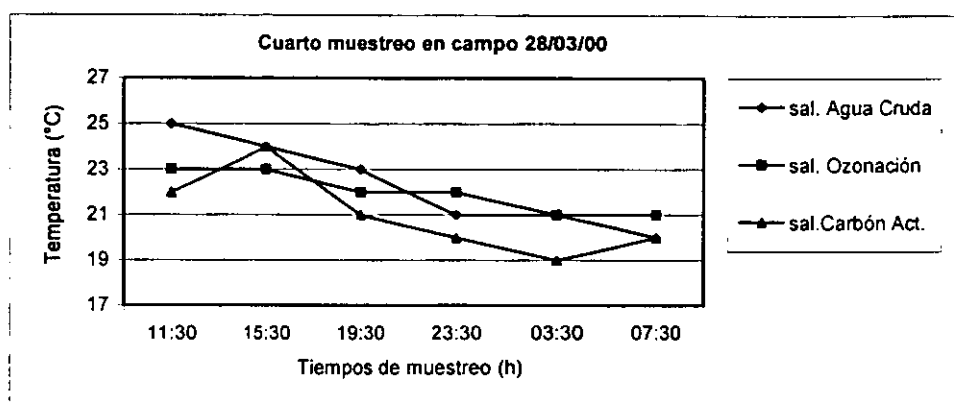


FIGURA 3.22 Evolución de la temperatura del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

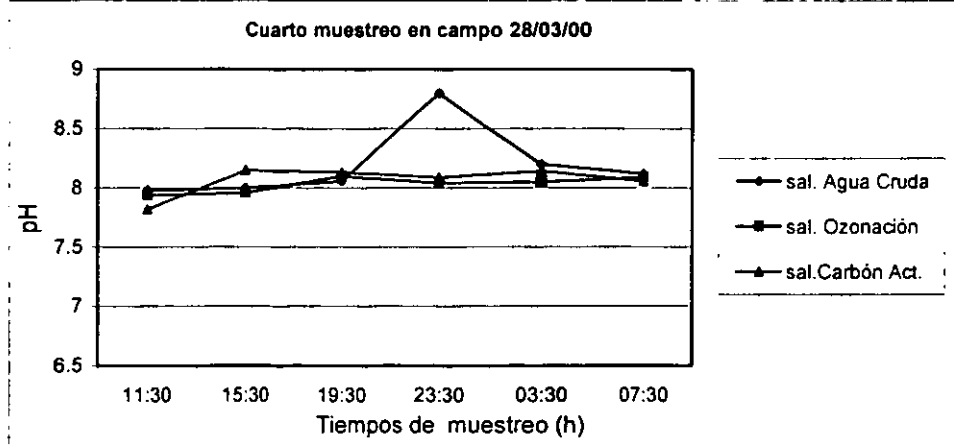


FIGURA 3.23 Evolución del pH del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

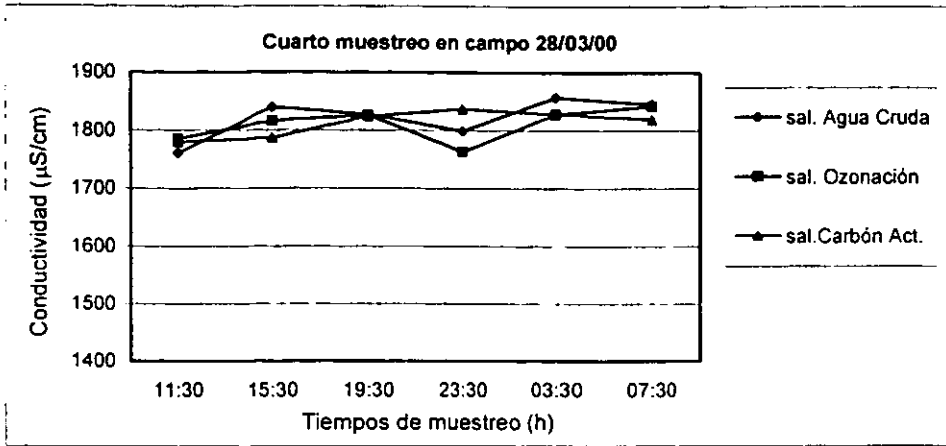


FIGURA 3.24 Evolución de la conductividad eléctrica del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

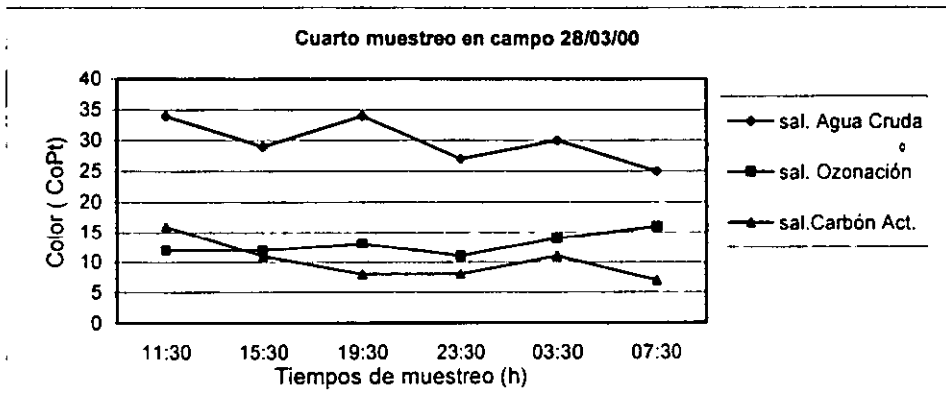


FIGURA 3.25 Evolución del color del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

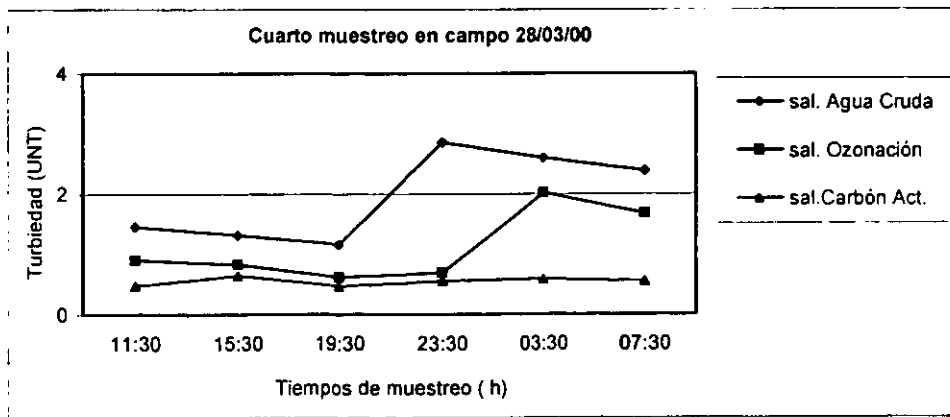


FIGURA 3.26 Evolución de la turbiedad del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

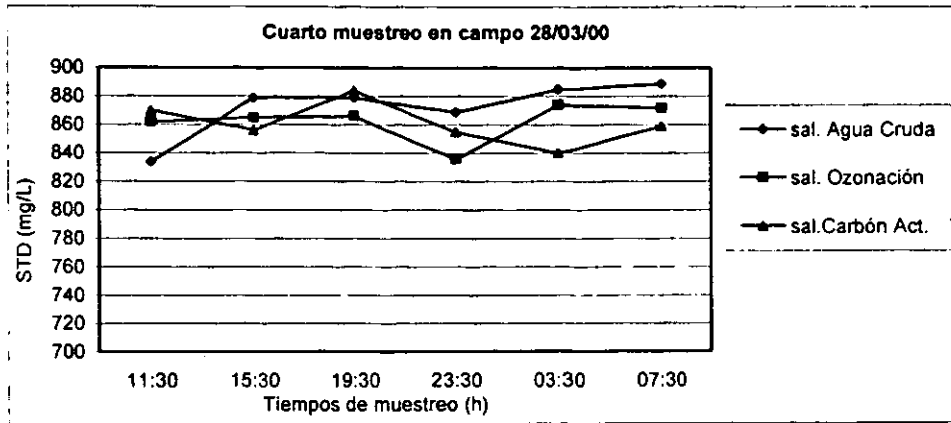


FIGURA 3.27 Evolución de la concentración de SDT del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

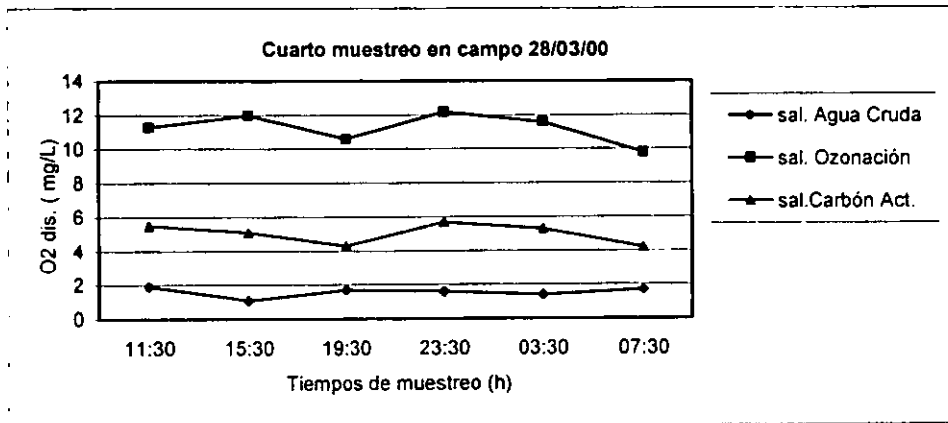


FIGURA 3.28 Evolución del oxígeno disuelto del agua en función del tiempo de muestreo para las diferentes etapas del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

Un análisis de estas figuras permite concluir que, de manera general, los parámetros fisicoquímicos del agua, medidos en campo, se comportaron de manera homogénea a lo largo del tiempo y durante el período total del muestreo (cuatro días). Lo anterior no es aplicable para la temperatura debido a que este parámetro no es propio a la naturaleza del agua, ya que depende de las condiciones ambientales.

En el caso del agua cruda, este comportamiento indica que sus características no cambian significativamente con respecto al tiempo, lo cual es normal para un agua subterránea. Para el agua tratada en cada etapa del tren de tratamiento, este comportamiento homogéneo permite inferir que las condiciones operacionales de los equipos son constantes a lo largo del tiempo. Estas propiedades de homogeneidad mostradas por el agua cruda y las tratadas a lo largo del tiempo se muestran de manera más clara en los valores calculados de ciertos parámetros estadísticos (Anexo IV). Se presentan las tablas correspondientes al agua cruda y al efluente del proceso de ozonación:

TABLA 3.13 *Parámetros estadísticos calculados para la temperatura y pH del agua cruda (Punto 1), en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada*

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 1	T (°C)				pH			
Media	21.7	21.6	22.2	22.3	8.3	8.1	8.0	8.2
σ	1.29	1.28	1.47	1.97	0.22	0.11	0.04	0.31
x.máxima	23.5	23	24	25	8.45	8.22	8.08	8.8
x.mínima	19	20.5	21	20	7.72	7.95	7.98	7.98

TABLA 3.14 *Parámetros estadísticos calculados para la conductividad y color del agua cruda (Punto 1), en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada*

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 1	Conductividad $\mu\text{S/cm}$				Color U. Pt-Co			
Media	1715	1731	1788	1821	24.3	31.2	47.8	29.6
σ	30.20	17.87	45.07	35.64	3.85	6.49	7.99	3.66
x.máxima	1749	1750	1816	1857	30	39	61	34
x.mínima	1640	1700	1700	1761	18	22	37	25

TABLA 3.15 *Parámetros estadísticos calculados para la turbiedad y SDT del agua cruda (Punto 1), en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada*

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 1	Turbiedad UTN				SDT mg/L			
Media	1.1	3.4	7.4	1.8	876.0	873.8	873.5	872.3
σ	0.70	0.29	1.00	0.74	8.03	8.68	5.92	0.28
x.máxima	2.36	3.65	8.72	2.86	892	885	881	889
x.mínima	0.32	2.87	6.3	1.16	866	863	865	834

TABLA 3.16 *Parámetros estadísticos calculados para el oxígeno disuelto del agua cruda (Punto 1), en los muestreos realizados en la planta potabilizadora evaluada*

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 1	O ₂ disuelto mg/L			
Media	1.6	1.2	N.R.	1.5
σ	0.743	0.325	N.R.	0.280
x.máxima	2.7	1.8	N.R.	1.9
x.mínima	0.45	0.8	N.R.	1.1

N.R. = No se realizó

En estas tablas se puede observar que no existe una diferencia significativa entre el valor mínimo y el valor máximo de cada parámetro.

3.3.1 Evolución de la calidad del agua tratada en los procesos de ozonación y bioadsorción

Las figuras 3.29 a la 3.46 presentan la evolución de los parámetros fisicoquímicos del agua correspondiente a muestreos compuestos en cada una de las tres etapas del tratamiento: 1) agua cruda, 2) salida de la torre de oxidación (agua ozonada) y 3) agua de salida del filtro de carbón activado biológico. Los análisis de las muestras se realizaron en campo y en laboratorio.

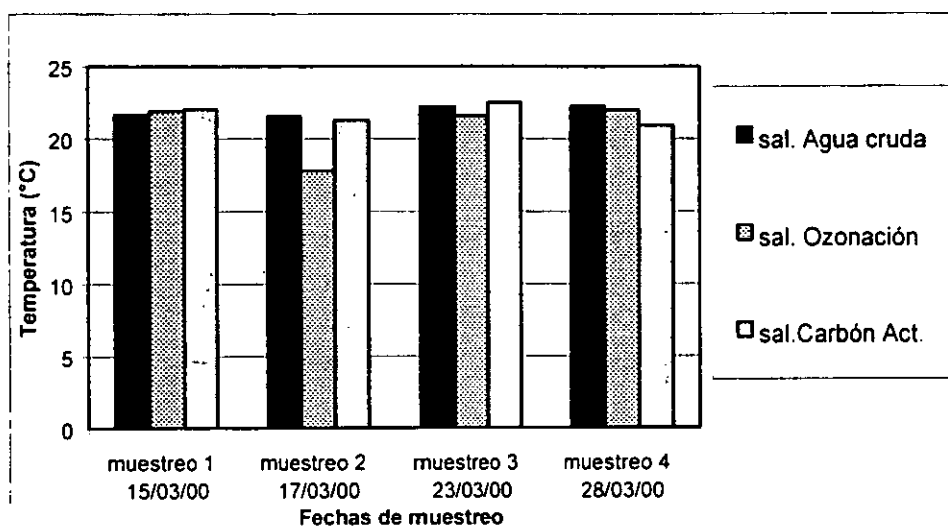


FIGURA 3.29 Evolución de la temperatura del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

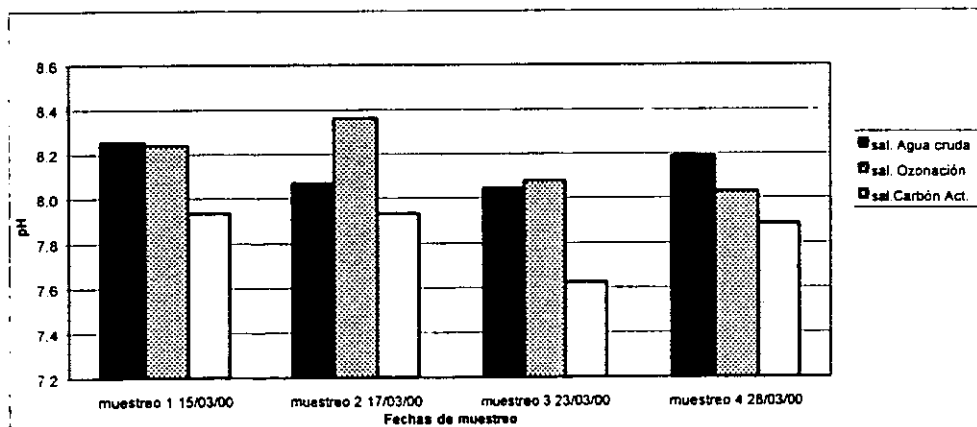


FIGURA 3.30 Evolución de pH del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

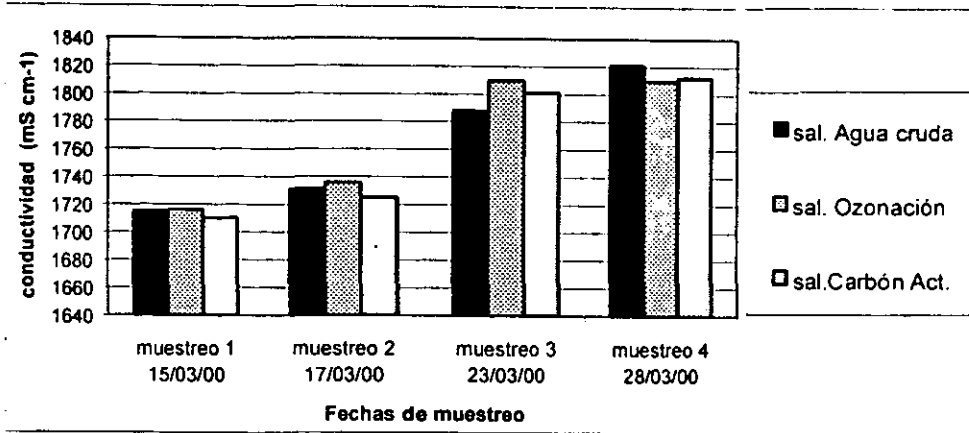


FIGURA 3.31 Evolución de la conductividad del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

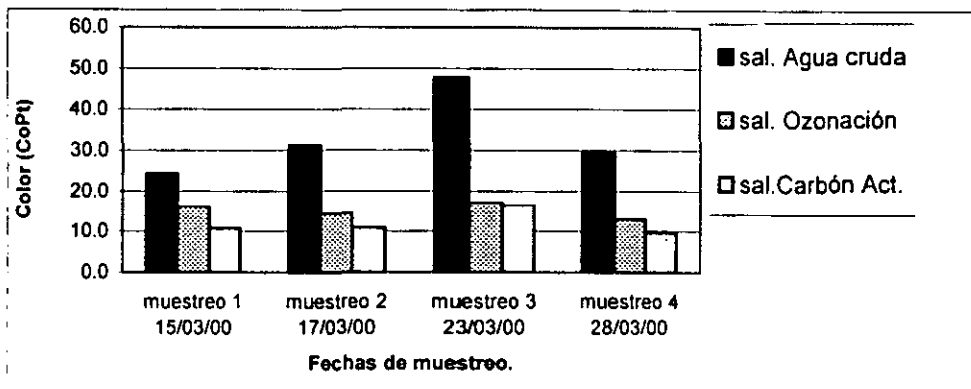


FIGURA 3.32 Evolución de color la del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

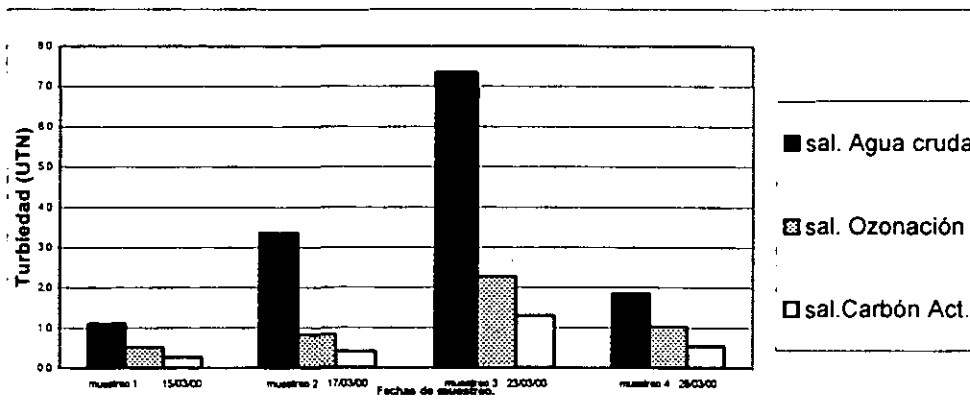


FIGURA 3.33 Evolución de la turbiedad del agua en función de la etapa del tren de la planta potabilizadora evaluada.

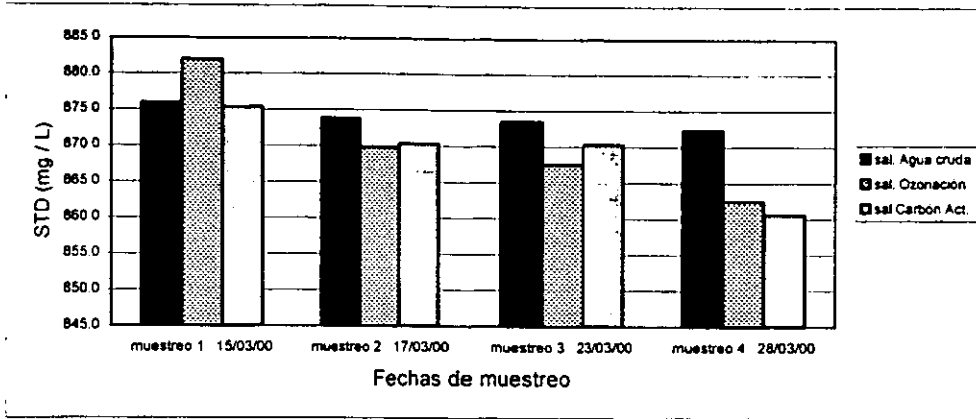


FIGURA 3.34 Evolución de los sólidos disueltos totales del agua en función de la etapa del tren de la planta potabilizadora evaluada.

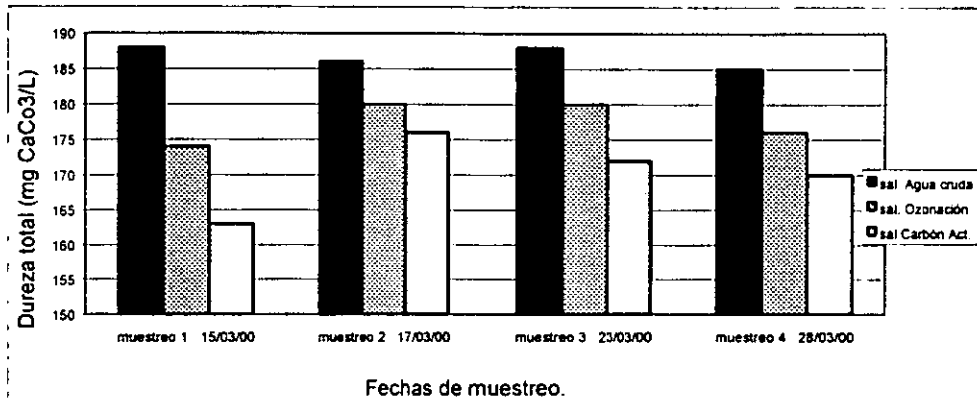


FIGURA 3.35 Evolución de la dureza total del agua en función de la etapa del tren de la planta potabilizadora evaluada.

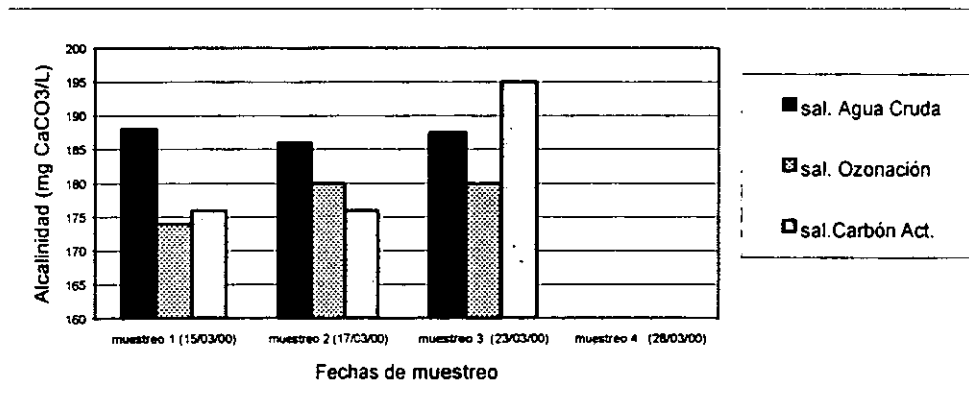


FIGURA 3.36 Evolución de la alcalinidad del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

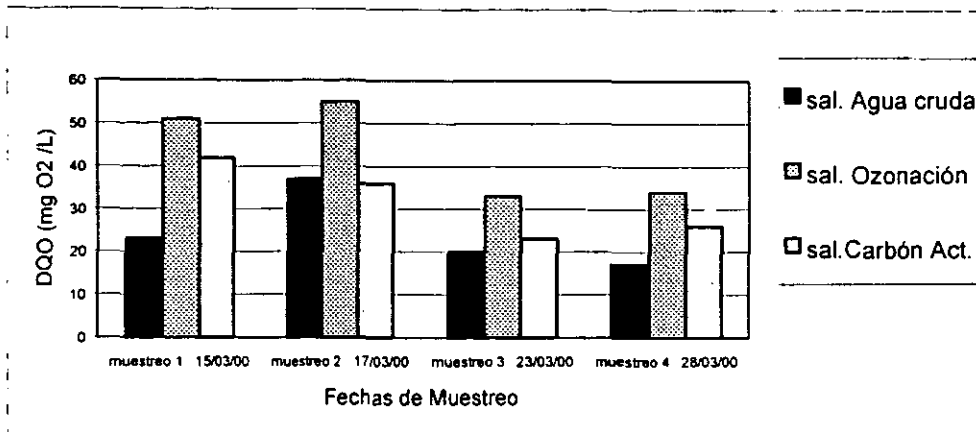


FIGURA 3.37 Evolución de la DQO del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

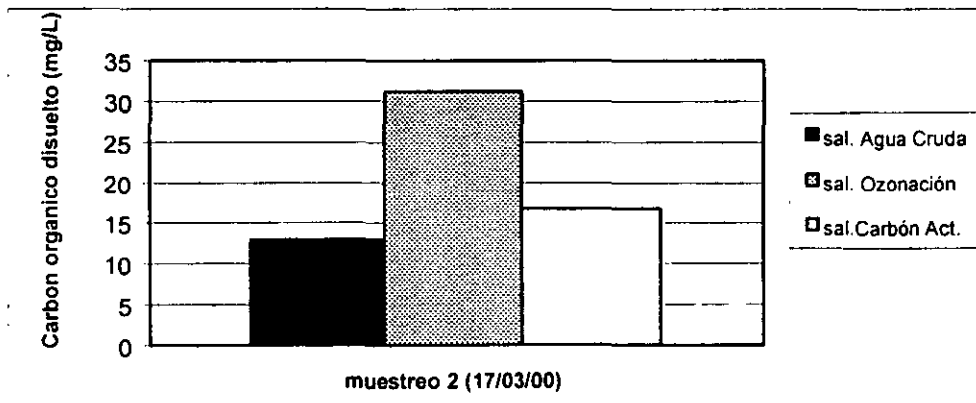


FIGURA 3.38 Evolución del COD del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

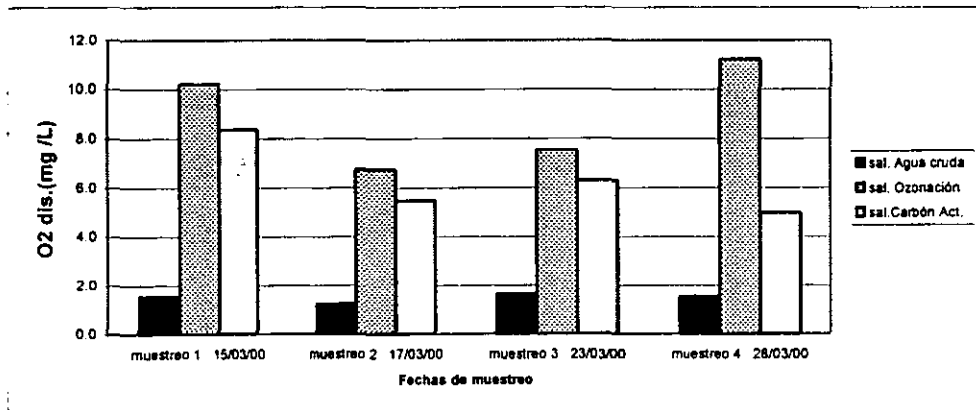


FIGURA 3.39 Evolución de O₂ disuelto del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada..

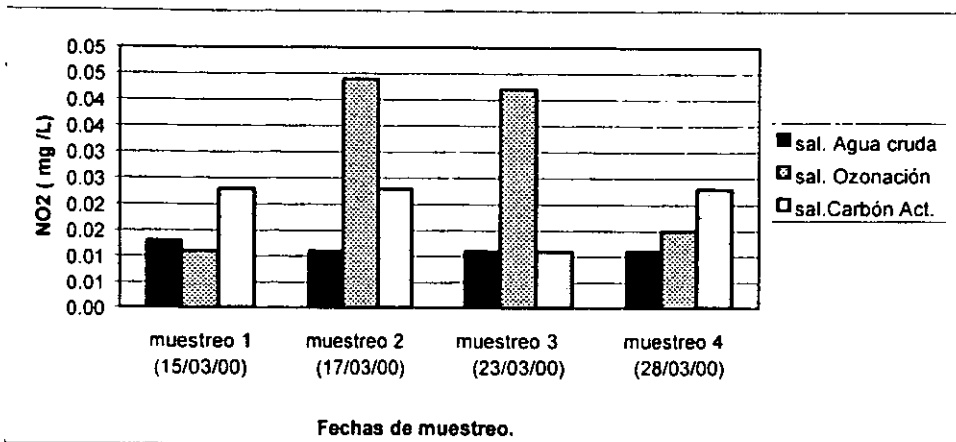


FIGURA 3.40 Evolución de los nitritos del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

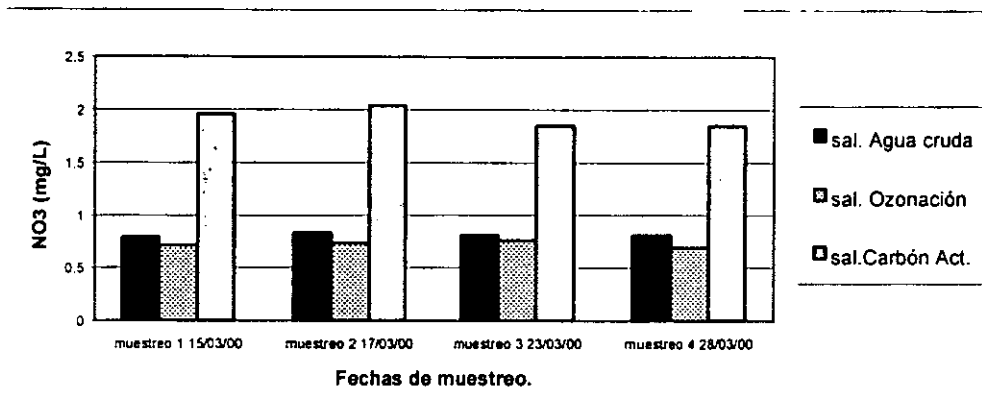


FIGURA 3.41 Evolución de los nitratos del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

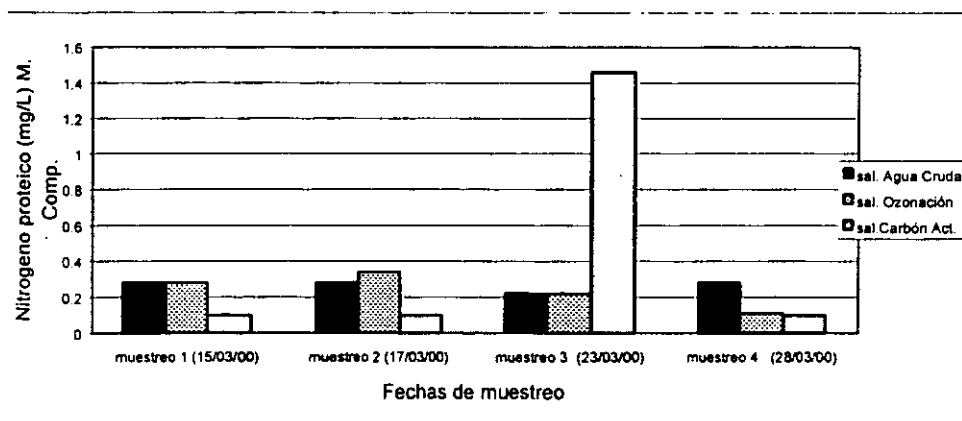


FIGURA 3.42 Evolución de Nitrógeno proteico del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

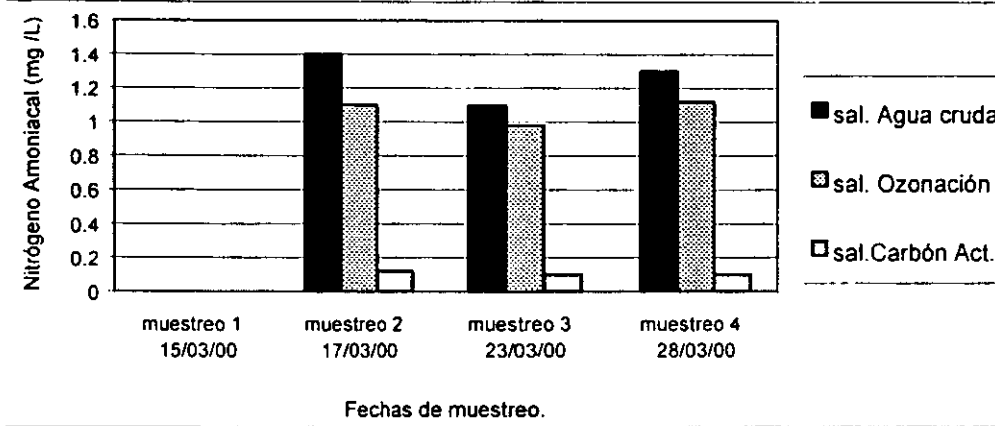


FIGURA 3.43 Evolución de Nitrógeno amoniacal del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

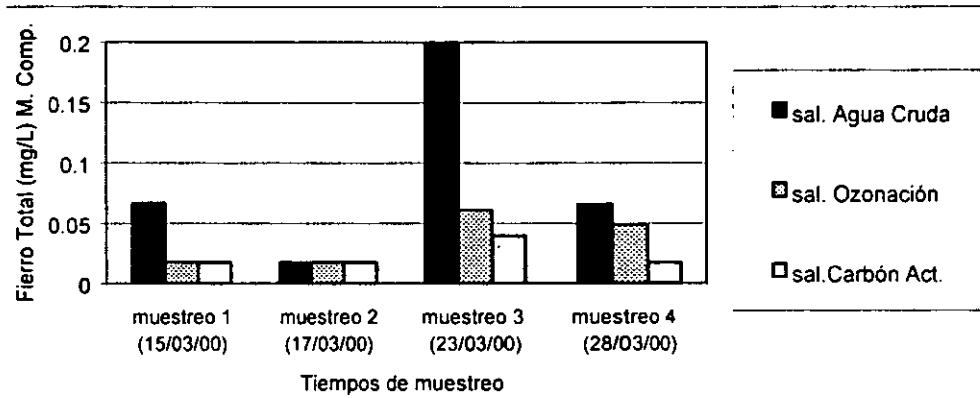


FIGURA 3.44 Evolución de Hierro total del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

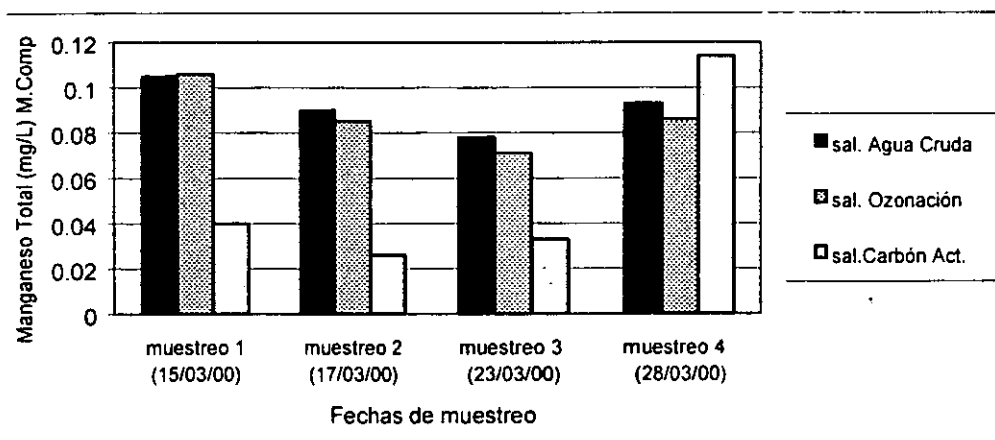


FIGURA 3.45 Evolución de Manganeseo total del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

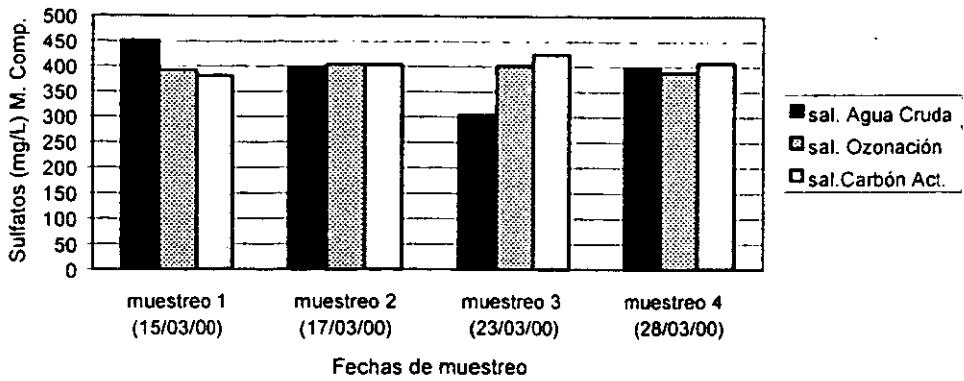


FIGURA 3.46 Evolución de Sulfatos del agua en función de la etapa del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

La propiedad de homogeneidad de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda y tratada, permite realizar observaciones sobre la calidad del agua a lo largo del tren de tratamiento y su influencia en la eficiencia de operación de los procesos de ozonación y bioadsorción.

3.3.2 Proceso de ozonación

El influente de este proceso es el agua cruda del pozo. Con base en los datos analíticos determinados, es un agua que presenta características organolépticas aceptables desde el punto de vista normativo; color (20 Pt Co). El valor observado para estos parámetros en el agua cruda oscila entre 20-30 mg Pt Co/L y en los cuatro muestreos compuestos realizados.

Ciertos parámetros como COD, DQO, NH_4^+ , alcalinidad presentan valores ligeramente elevados (figuras 3.37, 3.38 3.39 y 3.43). Es importante señalar que el contenido importante de alcalinidad (180 mg/L) influye negativamente sobre la eficiencia del proceso de ozonación.

En efecto, la alcalinidad, en forma de hidrógenocarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}), es un parámetro inhibitor del mecanismo de descomposición del ozono (O_3) en fase acuosa en entidades más oxidantes como son los radicales hidroxilos (OH^\bullet). Los iones HCO_3^- y CO_3^{2-} reaccionan con el O_3 limitando su acción con compuestos orgánicos y con otras entidades químicas (iones hidroxilo OH^\bullet , peróxido de hidrógeno H_2O_2) que promueven la descomposición de la molécula de O_3 en radicales OH^\bullet . Estos oxidantes poseen un poder de oxidación más elevado que el O_3 molecular, lo que les permite oxidar compuestos orgánicos recalcitrantes y otros contaminantes.

La presencia de NH_4^+ , HCO_3^- y CO_3^{2-} constituyen parámetros fisicoquímicos que pueden disminuir la eficiencia de oxidación de compuestos orgánicos. Lo anterior se debe a que las constantes de reacción del O_3 con los compuestos inorgánicos, como los carbonatos (k) son más importantes con respecto a las presentadas por las sustancias orgánicas con este oxidante. (Masschelein, W.J 1982)

En el caso presente, la influencia sobre la oxidación de la materia orgánica de NH_4^+ , CO_3^- y CO_3^{2-} no se reflejó de manera importante ya que como puede observarse en la Figura 3.37, después del proceso de ozonación, hay un incremento del contenido de DQO. Dicho resultado indica la oxidación de compuestos orgánicos recalcitrantes. Estos compuestos por sus características recalcitrantes no se pudieron cuantificar por el método analítico de la DQO. Sin embargo, al fragmentarse las moléculas recalcitrantes en compuestos más simples estos últimos si se cuantificaron aumentando el valor de la DQO.

Este último resultado, además del incremento importante de oxígeno (figura 3.39), permiten concluir que se cumple parcialmente el objetivo del proceso de ozonación. Es decir, los compuestos recalcitrantes se oxidan para obtener subproductos no recalcitrantes, susceptibles de eliminarse por biodegradación y, en función del grado de oxidación, por absorción en sistemas de carbón activado asistidos biológicamente o etapa subsecuente a la ozonación del tren de tratamiento de la planta potabilizadora evaluada.

Cabe señalar que algunos parámetros medidos (pH, temperatura, NO_2^-) tienen también una influencia sobre el proceso de oxidación de compuestos orgánicos. En el caso de este estudio, los valores de estos parámetros en el agua cruda no representan una influencia negativa al proceso, por lo que, después de la etapa de ozonación no se observa una variación importante de sus valores (figuras 3.29 a 3.46).

Es necesario mencionar que en este estudio no se pudo realizar un análisis completo del funcionamiento del sistema de ozonación, ya que no se pudo evaluar la operación del generador de ozono (producción y concentración de ozono) y del destructor catalítico (eficiencia de destrucción del ozono contenido en la fase gas). Lo anterior se atribuye a un acceso restringido, por parte del personal de la planta potabilizadora, al interior de dichos sistemas y a la consulta de las bitácoras de operación y manuales de los equipos.

El análisis del funcionamiento del sistema de carbón activado biológico permitirá concluir si se cumple totalmente el objetivo de la ozonación, es decir, la oxidación de compuestos orgánicos y su transformación en subproductos más adsorbibles y biodegradables.

3.3.3 Proceso de bio-adsorción

El objetivo de la bio-adsorción es la eliminación de los subproductos de la oxidación de compuestos orgánicos recalcitrantes. Los parámetros físicoquímicos como conductividad eléctrica y SDT, no deben, después de cierto tiempo de funcionamiento, presentar normalmente variación entre el influente y el efluente de este proceso, como puede observarse en las figuras 3.31 y 3.34. Los parámetros DQO, color, COD son indicadores de la eficiencia de remoción de la concentración residual de los compuestos orgánicos recalcitrantes y de sus subproductos de oxidación. El valor de estos 3 parámetros disminuye de manera poco significativa después del proceso de bio-adsorción lo cual es indicativo de eficiencia baja de remoción de compuestos orgánicos recalcitrantes y de sus subproductos de oxidación.

La baja remoción se puede atribuir a una adsorción y una biodegradación deficientes de compuestos orgánicos presentes en agua. El primer caso se puede presentar porque los compuestos orgánicos recalcitrantes se oxidaron demasiado, a tal punto que los subproductos resultantes presentan características hidrofílicas (alcoholes, cetonas). Estas

propiedades los vuelven menos adsorbibles sobre carbón activado. Una consecuencia de la baja adsorción de estos compuestos disminuye paralelamente su eliminación por la biomasa de las partículas de carbón activado. La baja remoción por biodegradación también se puede presentar por bajas densidades de bacterias o por falta de nutrientes o de oxígeno.

En el caso presente, es posible que se tengan bajas densidades de bacterias en el carbón debido a la frecuencia importante del retrolavado y a la presencia de cloro en el agua del retrolavado. En efecto, la frecuencia practicada del retrolavado es de cada tercer día y el valor recomendado es de 1 semana mínimo. Además, el agua utilizada en el retrolavado del filtro (efluente clorado de la planta) inhibe el crecimiento bacteriano y deteriora la superficie de las partículas de carbón activado. Esta hipótesis se puede confirmar mediante un muestreo del carbón y su análisis posterior en microscopio electrónico de barrido.

Otra observación importante a hacer a la etapa de bio-adsorción es la presencia del mecanismo de nitrificación. En efecto, después de la columna de carbón, el contenido de amoníaco disminuye (figura 3.42) y los nitratos aumentan (figura 3.41). Sin embargo, no se observa el mecanismo complementario "desnitrificación" ya que la concentración de nitritos no disminuye a la salida de la columna de carbón activado biológico (Fig.3.40).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los procesos de ozonación y de bioadsorción son procesos de tratamiento fisicoquímico avanzado altamente eficientes para la remoción de compuestos orgánicos recalcitrantes.

Estos métodos son altamente complejos por lo que es necesario aplicar una metodología adecuada para obtener un diseño y operación correctos de los sistemas integrantes de estos procesos.

El diseño de los procesos en una planta eficiente requiere de un estudio de ingeniería cuidadoso basado en la calidad de la fuente y en la selección de las operaciones de tratamiento más adecuadas para producir agua de la calidad requerida.

La metodología propuesta en este trabajo se aplicó parcialmente para realizar el análisis funcional de estos procesos instalados en una planta potabilizadora. El análisis se realizó con base en datos obtenidos en campo sobre las características físicas (dimensiones), de operación (flujos, dosis, potencias de bombas), de eficiencia de tratamiento de los procesos (muestreo y caracterización del agua en cada etapa del tratamiento).

Los resultados obtenidos en ese análisis permiten elaborar las siguientes conclusiones:

- El agua cruda presenta un contenido de compuestos orgánicos (carbón orgánico disuelto 40 mg/L) significativamente elevado con respecto al que presentan aguas subterráneas (1-2 mg/L) destinadas a la producción de agua potable. Esta carga orgánica se puede eliminar mediante la combinación de procesos fisicoquímicos avanzados como la ozonación y la bioadsorción.

Sin embargo, la alcalinidad demasiado alta del agua cruda (180 mg/L), con respecto al valor recomendado (50 mg/L; Chramosta N, 1991), disminuye significativamente la eficiencia de oxidación de compuestos orgánicos recalcitrantes por parte del ozono. Este parámetro fisicoquímico (iones hidrógenocarbonato y carbonato), por reacciones de competición, inhibe significativamente la descomposición del ozono en agua (Langlais et al., 1991).

- Con base en los resultados obtenidos de los análisis de muestras de agua en este estudio se determinó que el porcentaje total que se obtiene de remoción de los parámetros indicadores de compuestos orgánicos (carbón orgánico disuelto, demanda química en oxígeno, color, nitrógeno proteico, etc.) es de 50% aproximadamente. Este valor debería ser más elevado considerando que el carbón activado solo permite obtener remociones de 75-90%.

Estas bajas eficiencias están relacionadas con la alta alcalinidad del agua. Esto se podría resolver con el uso de peróxido de hidrógeno, el cual permitiría aumentar la eficiencia de la oxidación. La aplicación de H_2O_2 se debe fundamentar en pruebas de tratabilidad y en un estudio económico.

- En general, las características más importantes (potencias, diámetros y alturas de tanques, tiempos de contacto, etc.) de los equipos principales de ozonación (generador

y contactor de ozono) y de bioadsorción (columna empacada de carbón) son adecuados de acuerdo a criterios y cálculos realizados.

- En el caso del sistema de ozonación, se encontró como deficiencia importante la aplicación de oxígeno alta pureza como gas generador de ozono, ya que éste es muy costoso.
- El equipo auxiliar del proceso de ozonación (destructor de ozono) responde a los criterios recomendados para su especificación y selección. El sistema auxiliar de la bioadsorción (retrolavado), presenta una tasa y una frecuencia de retrolavado demasiado altas, lo cual afecta negativamente en el desarrollo y la actividad biológica del carbón activado.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION RESEARCH FOUNDATION. (1992). GAC FILTER

BENEDEK, A. (1977). Effect of ozone on activated carbon adsorption – A mechanistic analysis of water treatment data. *IOI Symposium on Advanced Ozone Technology International Ozone Inst. Inc., Toronto, Ontario.*

BENEDEK A., RICHARD Y. (1989) Advances in biological treatment. Special subject 7. Document Dégremont.

CHANG H. AND RITTMANN B. (1987) Mathematical modeling of biofilm of activated carbon, *Environ. Sci. Technol.*, **21**(3): 273-280.

CHARACKLIS, W.G. (1973). Attached microbial growth – I. Attachment and growth. *Water Res.* **7**: 1113-1127.

CHERESMISINOFF, P.N (1981) Carbon adsorption Handbook, Cheresmisinoff, Paul N. and Ellerbusch Fred (eds) Ann Arbor Science Publishers.

CHRAMOSTA, N. De LAAT, J. DORE, M.; (1991) “ Effects of alkalinity and dissolved Organic Matter on the degradation by O₃. IN Proc”. 10th Ozone world congress, March, Vol 1. Monaco.

DE LAAT J. (1988) Contribution à l'étude du mode d'élimination de molécules organiques modèles sur charbon actif en grains: Interactions entre le processus d'adsorption et de biodégradation, Tesis de doctor presentada en la Universidad de Poitiers, No. de orden 485.

DURAN, ALFONSO (1997) contribution a l'étude de l'adsorption et de la biodegradation de composés organiques sur charbon actif cas du phenol et de derives phenoliques, Tesis de doctor presentada en la Universidad de Rennes.

FIESSINGER, F., MALLEVIALLE, J. AND BENEDEK, A. (1983). Interaction of adsorption and bioactivity in full-scale activated carbon filters: The Mont Valerion experiment, In: Treatment of Water by Granular Activated Carbon, M.J. McGuire and I.H. Suffet (Eds.). *Advances in Chemistry Series 202*, Amer. Chem. Soc., Washington, D.C.

FLOODGATE, G. (1972). The mechanism of bacterial attachment to detritus in aquatic environment. Proceedings of the IBP-UNESCO. *Symposium on Detritus and its Role in Aquatic Ecosystems.*

GAID, K., MARTIN, G., CAVALIER, C. (1979). Observations au microscope électronique des populations bactériennes sur charbon actif. *Journal Français d'Hydrologie.* **10** fasc. 2 (29):125-130.

GLAZE W. WT LIN, C. (1986). Adsorption and microbiological mechanisms for removal of natural organics in granular activated carbon columns. *Ozone Science and Engineering*, **8**:299-319.

GOLDSTEIN, B.D Mc DONALD E.M (1909) Effect of ozone on cell membrane protein fluorescence I Environ. Res., 9:179-186.

HUANG, C.P (1970) Chemical interactions between inorganics and activated carbon. In adsorption Handbook . Ann Arbor Science Publishers The butterwith Group Chap 8.

KLOTZ, M., WERNER, P. AND SCHWEISFURTH, R. (1975). Untersuchungen zur Mikrobiologie der Aktivkohlefilter, Veröff. Des Bereichs für Wasserchemie, Univ. Karlsruhe 9: 270.

LAFRANCE, P., MAZET, M., VILLESOT, D. (1983). Croissance bactérienne sur charbon actif granulé. Investigation au microscope électronique à balayage. *Water Res*, 17(10):1467-1470.

LANGLAIS, B., RECKHOW, D., BRINK, D. (1991). Ozone in Water Treatment, AWWA, Compagnie. Générate des Eaux. Lewis Publishers.

LE CLOIREC P. (1983). Elimination de polluants organiques de l'eau au moyen de filtres biologiques a charbon actif. These de Doctorat, *Université de Rennes 1*, B, 156, 108.

LEGERON, J.P (1978) Chemical ozone demand of a water sample by laboratory evaluation". *Ozonews*, International Ozone Institute, August 5:8 Part 2

MARSHALL, K. STOUT, R. AND MITCHELL, R. (1971). Mechanism of the initial events in the sorption of marine bacteria to surface, *J. of General Microbiol.* 68: 337-348.

MASSCHELEIN, W.J (1982) Contacting of ozone with water and contactor offgas treatment. In handbook of ozone technology and application Vol 1. R.G Rice and A Netzer (ed) Ann Arbor MI. USA.

OLMSTEAD, K. ET WEBER JR. W. J. (1991). Interactions between microorganism and activated carbon water and waste treatment operations. *Chem. Eng. Comm.* 108: 113-125.

ORGLER, K (1982) Methods and operating cost of ozone destruction in offgas. *Ozonation Manual of water treatment* . W.J Masschelein (ed). Inc. New York.

PREVOST. M.O (1990) "Chlorine demand removal by biological activated carbon filtration in cold water". AWWA, Water quality conference proceedings, November.

RAMIREZ, ROSA MARIA.(1996). Contribution a l'étude de l'oxydation et de l'adsorption sur charbon actif de quelques phenylurees et de leurs mabolites, Tesis de doctor presentada en la Universidad de Rennes.

RICE R.G., ROBSON C.M., (1982) Biological activated carbon: enhanced aerobic biological activity in GAC systems. *Ann Arbor Science*, Ann Arbor, Mich.

ROBSON, T.(1989), Status of U.S drinking water treatment ozonation systems C.M

SONTHEIRMER H., HEILKER E., JEKEL M.R., NOLTE H. Et VOLLMER F.J. (1978) *The Mulneim Process*, *JAWWA*, 70 (7), 393-396.

SPEITEL, G.E. Jr, AND ZHU X.J. (1990) Sensitivity analyses of biodegradation/adsorption models. *J. Environ. Engrg.* 116: 32-48.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, Seventeen Edition, Edited by Lenore S. Clesceri, Arnold E. Greenberg 1989.

WEBER, W.J (1980) " Control de la calidad del agua. Procesos Fisicoquimicos., Editorial Reverté Tr. Jorge Bessa, Barcelona, 379 pp.

WEBER JR., W, PIRBAZARI, M. AND MELSON, G. (1978). Biological growth on activated carbon: An investigation by scanning electron microscopy. *Environ. Sci. Technol.* 12(7):817-819.

WERNER, P. (1983). La microbiologie de la filtration sur charbon actif dans la preparation d' eau potable, L'eau, L'industrie, Les Nuisances 72: 65-69.

YING, W. AND WEBER JR., W. (1979). Bio-physicochemical adsorption model systems for wastewater treatment, *J. Water Pollution Control Fed.* 51(11):2661-2677.

ZOBELL, C. AND ANDERSON, D. (1936). Observation on the multiplication of bacteria in different volumes of stored sea water and the influence of oxygen tension and solid surface, *Biological Bulletin* 71: 324-342.

ZOBELL, C. (1943). The effects of solid surfaces upon bacterial activity, *J. of Bacteriology* 46: 39-56.

ANEXOS

**ESTUDIO FOTOGRAFÍCO DE LOS EQUIPOS E INSTALACIONES DE LA
PLANTA POTABILIZADORA A PIE DE POZO**

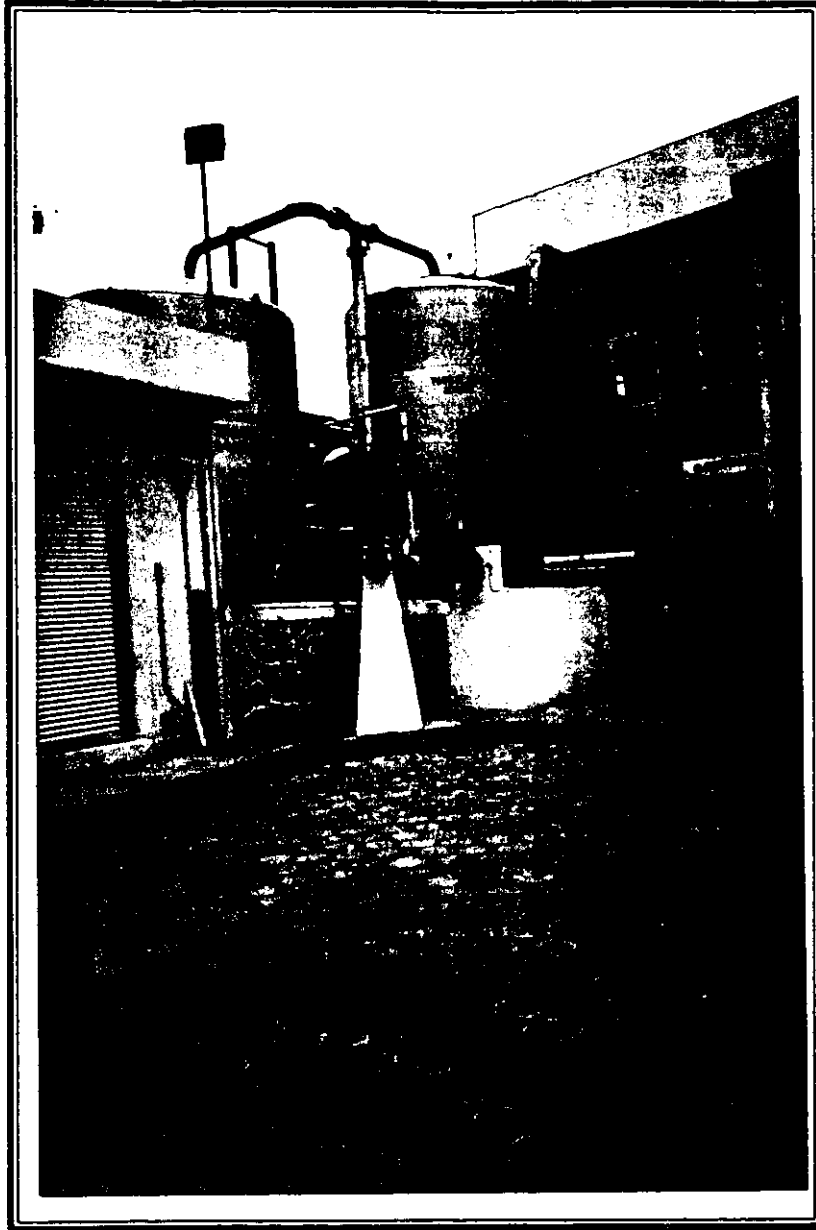


FOTO I.1 Vista frontal parcial del tren de tratamiento de la planta potabilizadora. Al fondo se observan los tres principales procesos fisicoquímicos avanzados que integran la planta, en orden secuencial: el cuarto del generador de ozono y torre de ozonación (izquierda), filtro de carbón activado biológico (centro) y el cuarto de la electrodiálisis reversible (izquierda).

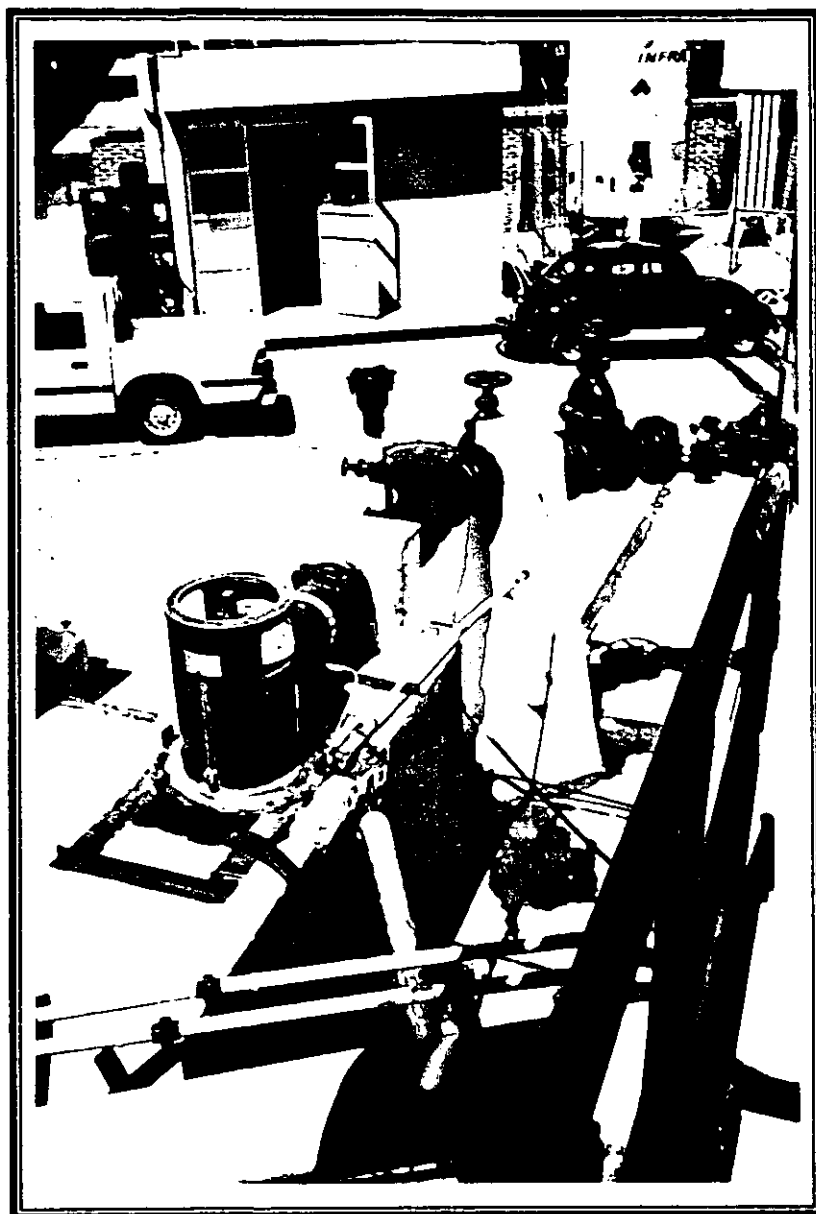


FOTO I.2 Vista frontal de la bomba que extrae el agua cruda del pozo, la cual es conducida al tren de tratamiento.



FOTO I.3 Vista frontal de los reactores de ozonación y de carbón activado biológico. En esta foto también se aprecian los bidones de solución de HCl, que se utiliza en el lavado de membranas de EDR.

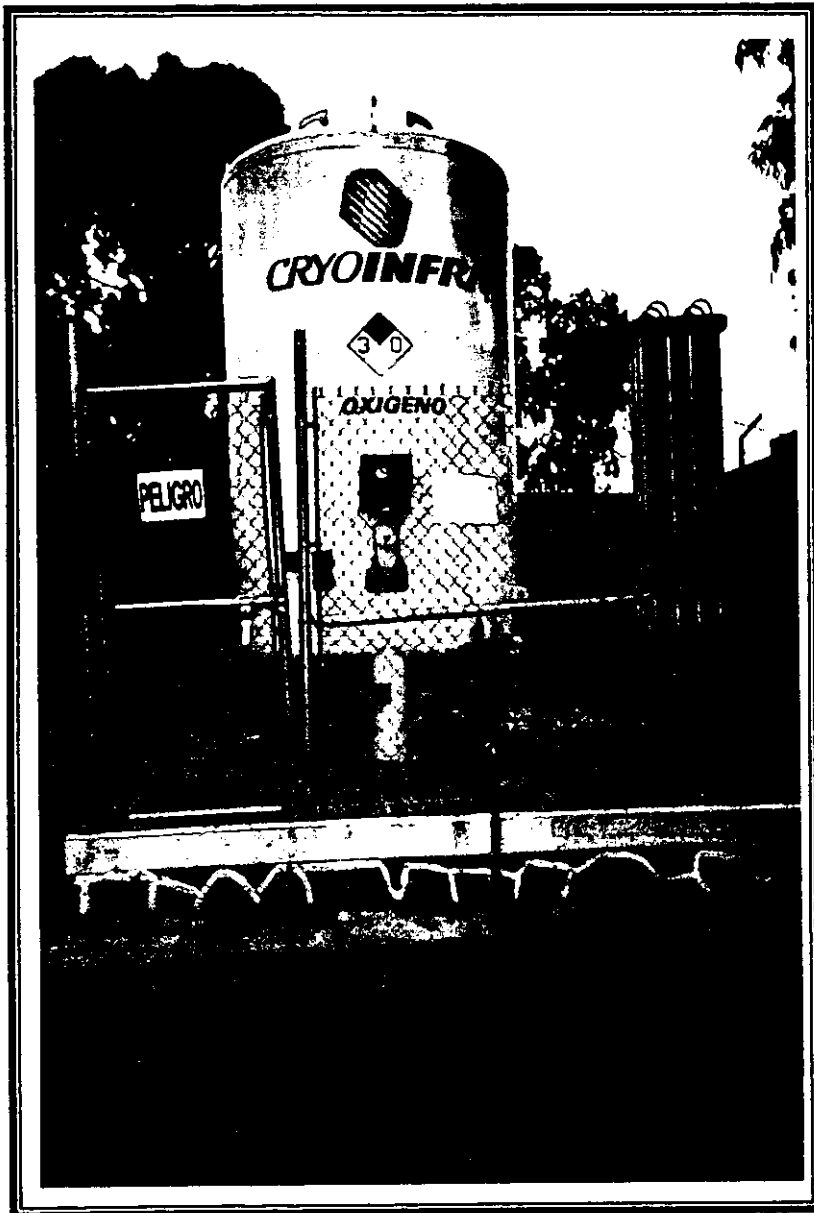


FOTO I.4 Detalle del tanque de almacenamiento y alimentación de gas (oxígeno) del generador de ozono.

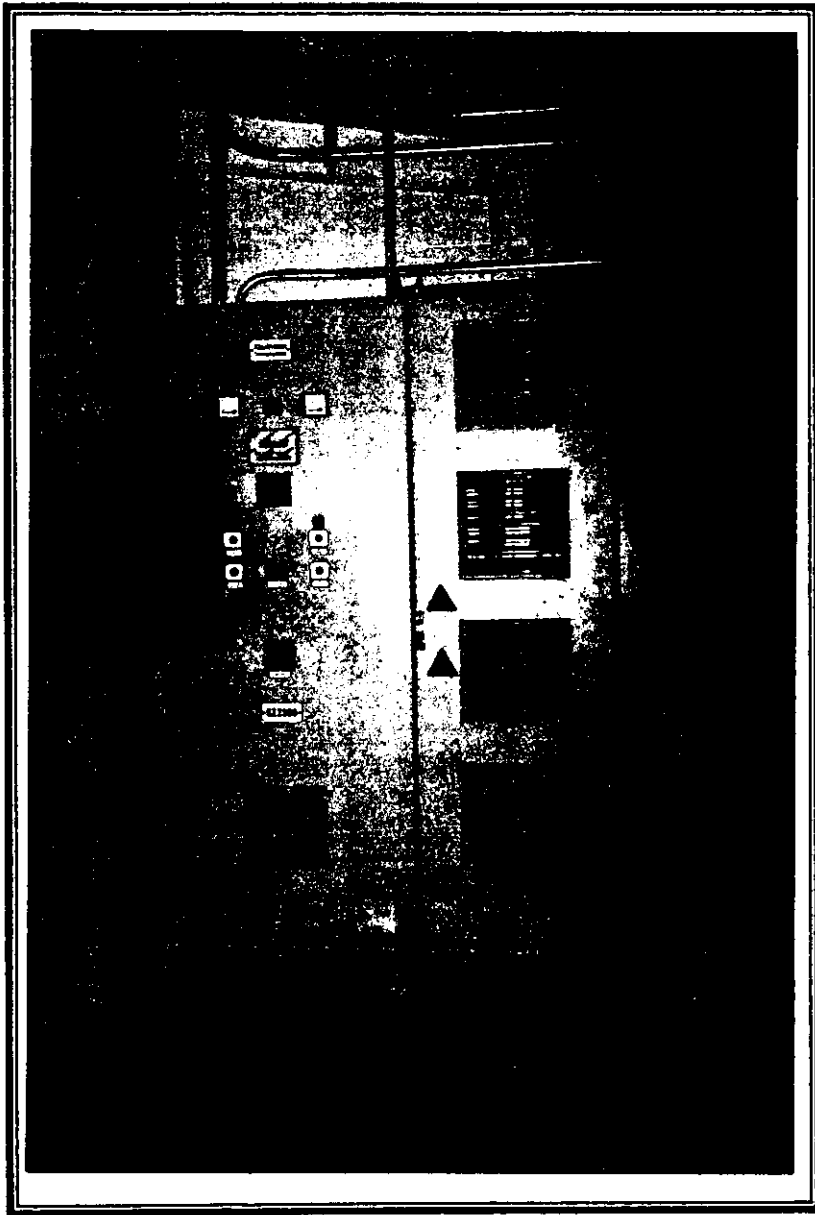


FOTO I.5 Vista del generador de ozono. En esta foto se observa el tablero de control del generador.

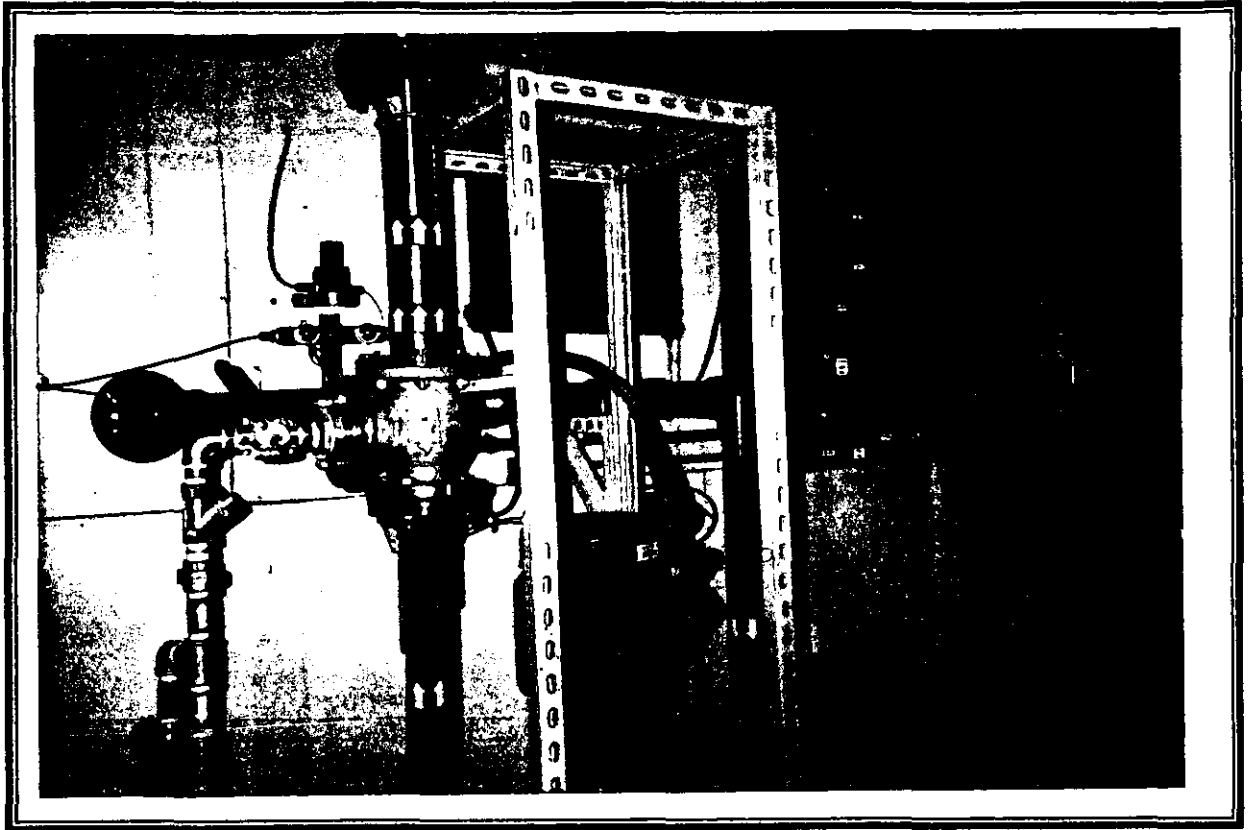


FOTO I.6 Detalle del generador de ozono. En esta foto se observa la tubería que conduce el gas con ozono hacia la torre de ozonación.

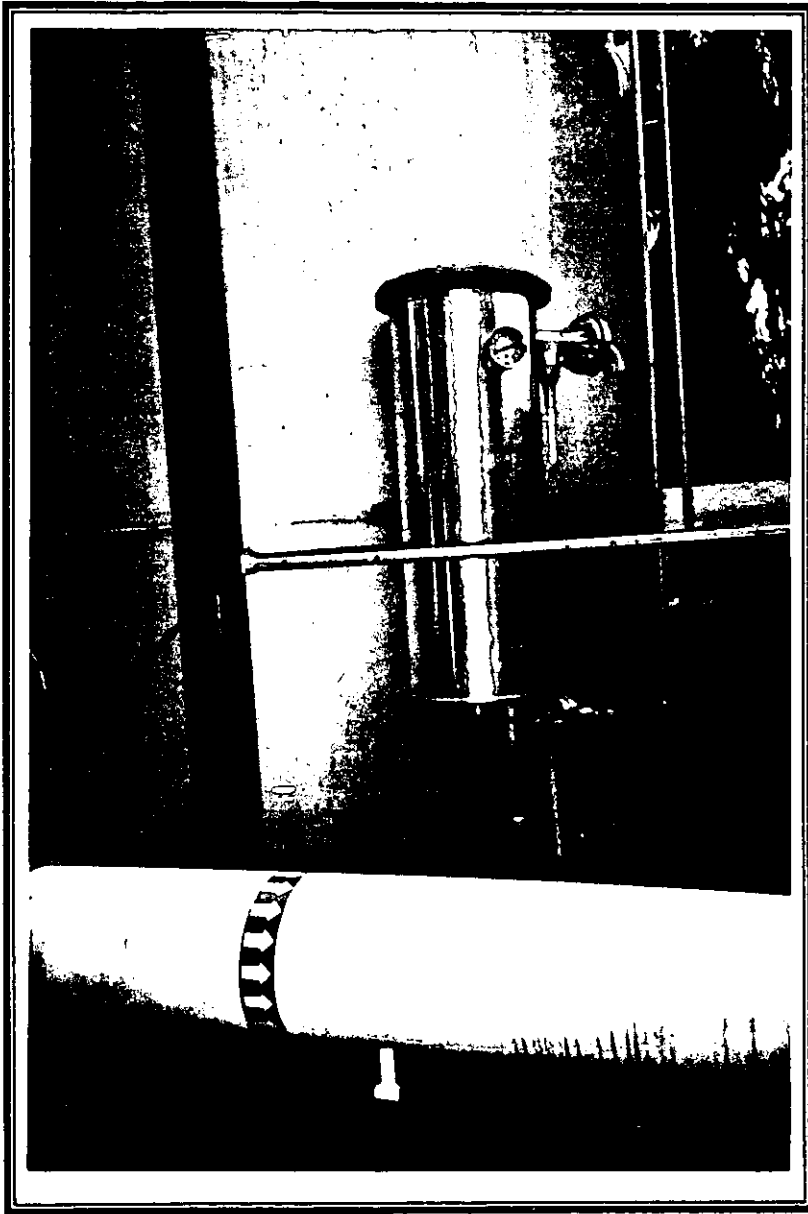


FOTO I.7 Detalle de la torre de ozonación. En esta foto se observa el destructor térmico de ozono, localizado a un costado de la torre de ozonación. El gas que sale de este equipo de destrucción es finalmente liberado a la atmósfera.

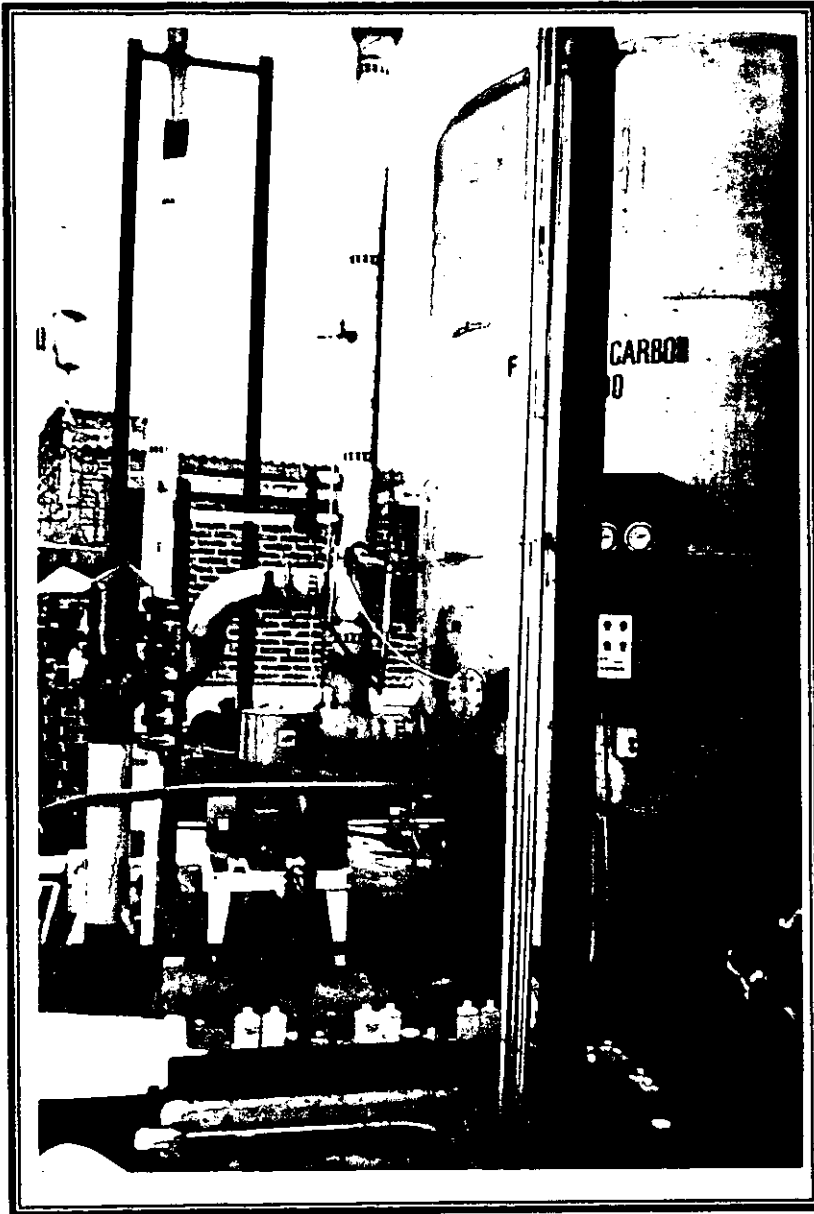


FOTO I.8 Vista del filtro de carbón activado biológico. En esta foto se observa al lado izquierdo del filtro, la bomba y el control del retrolavado automático del filtro.

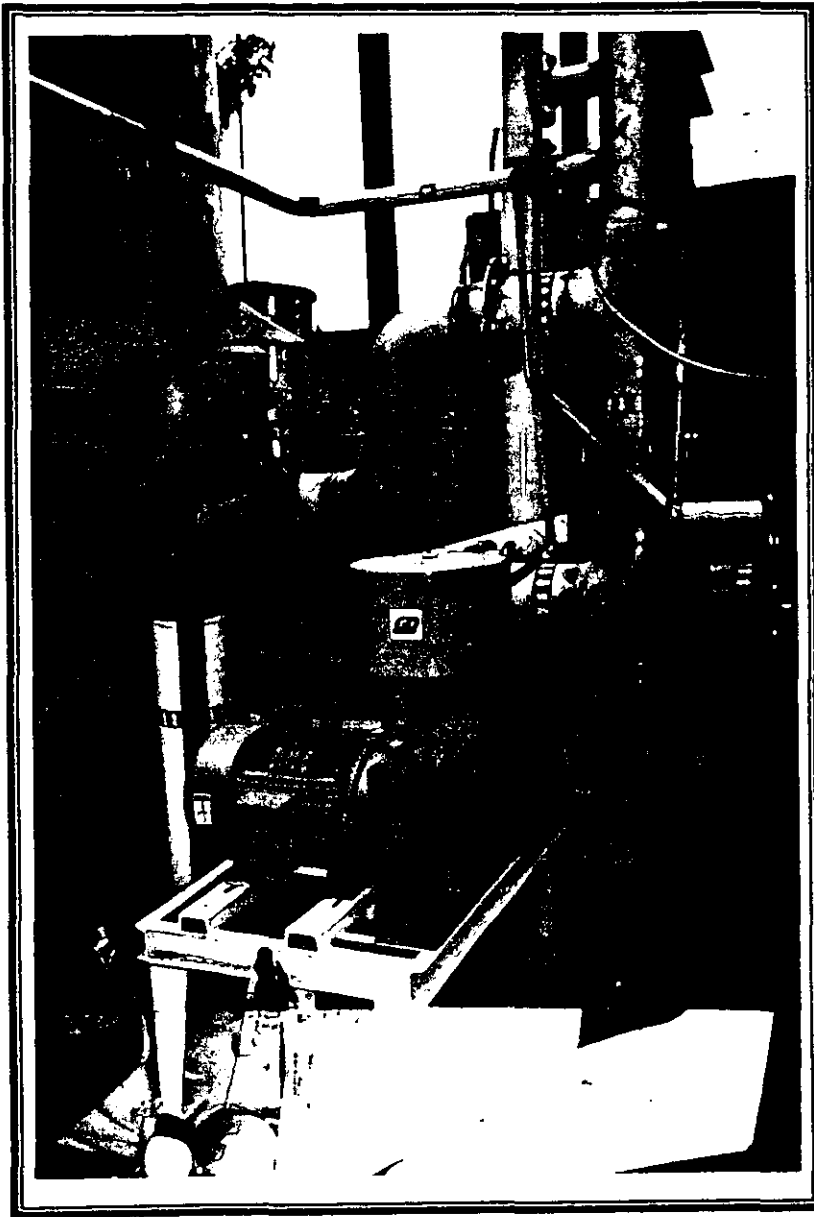


FOTO I.9 Detalle de la bomba de retrolavado del filtro de carbón activado biológico de la planta Iztapalapa 5. En esta foto se observa también la configuración de la tubería que conecta la torre de ozonación con el filtro de carbón, asimismo las válvulas que intervienen en la operación de retrolavado manual ó automático.

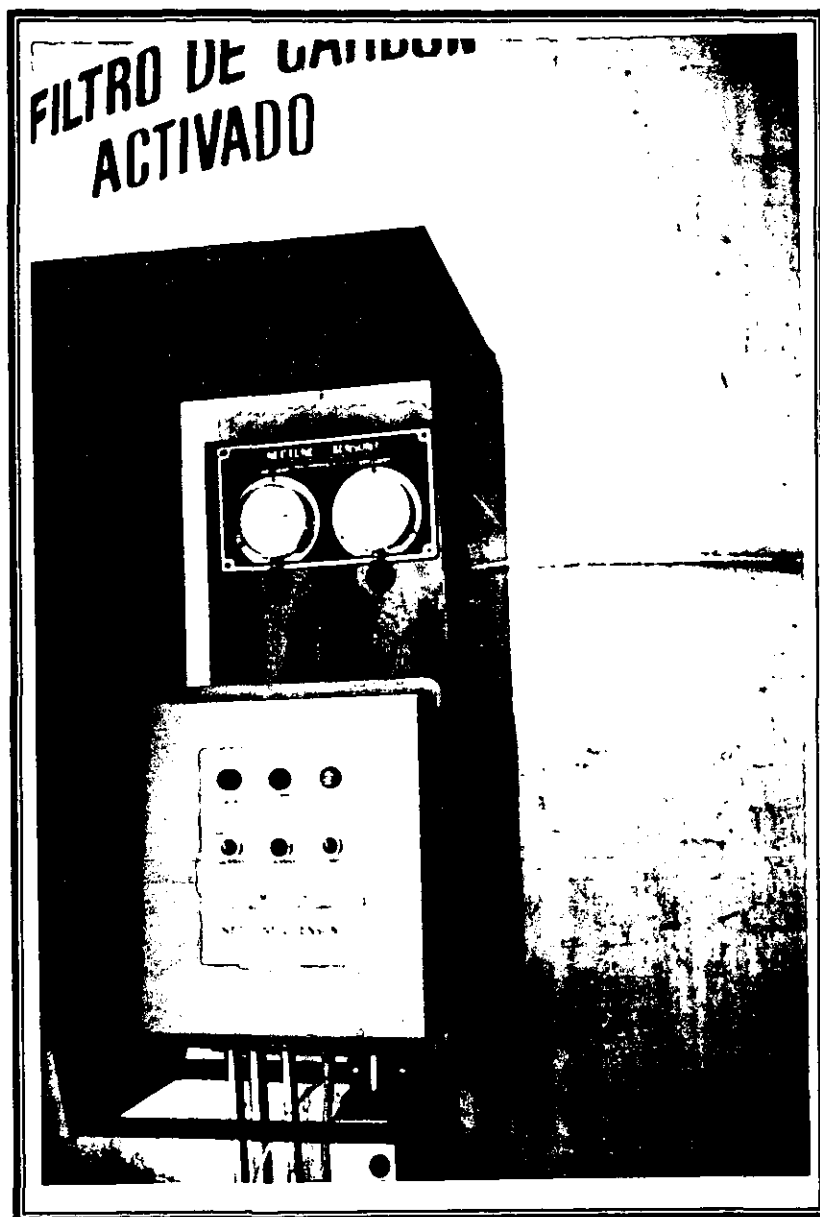


FOTO I.10 Tablero de control del sistema de retrolavado del filtro de carbón activado. En la parte superior se observan dos manómetros que indican la presión interna del equipo. Cuando se rebasa el valor de 5 psig se debe de retrolavar el filtro. Los botones verde, rojo y amarillo indican el estado de retrolavado.

**REPORTE FOTOGRAFICO DE LA CAMPAÑA DE MUESTREO Y ANÁLISIS EN CAMPO
DE LA "PLANTA POTABILIZADORA A PIE DE POZO**

Abastecimiento

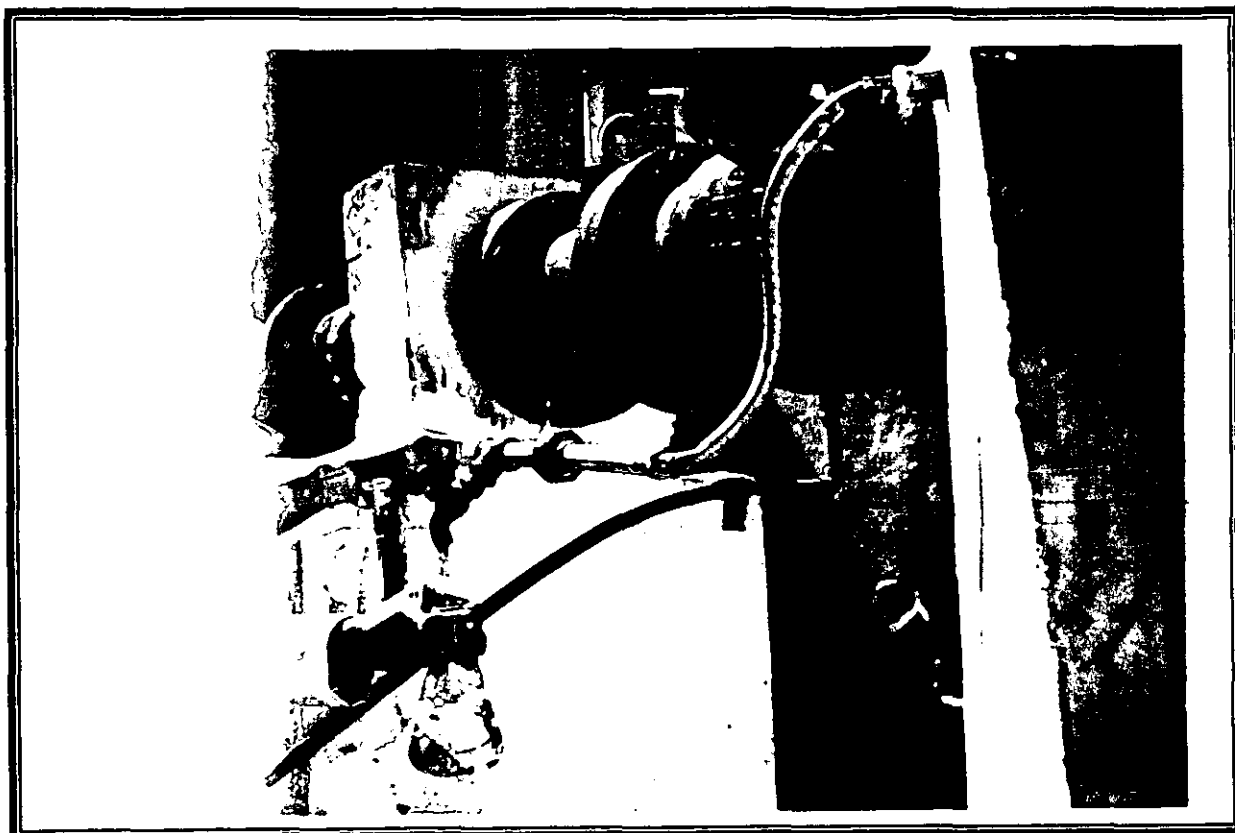


FOTO II.1 Toma de muestras provenientes del pozo de abastecimiento a la columna de ozonación.

Ozonación



FOTO II.2 Muestreo a la salida del sistema de ozonación, a la izquierda se presenta la columna de ozonación y a la derecha la columna de carbón activado.



FOTO II.5 Determinación de oxígeno disuelto.

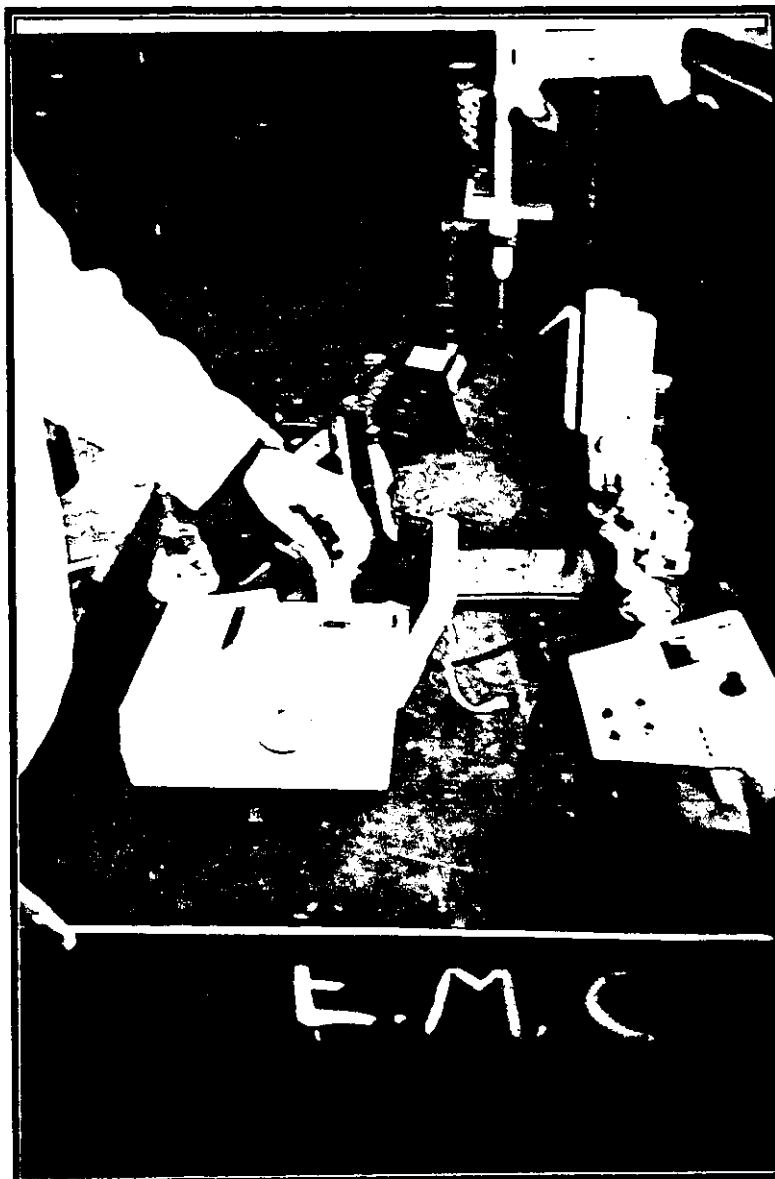


FOTO II.6 Determinaciones de color de acuerdo a los Métodos Normalizados.

Carbón Activado



FOTO II.3 Toma de muestras a la salida de la columna de carbón activado.

Análisis en campo

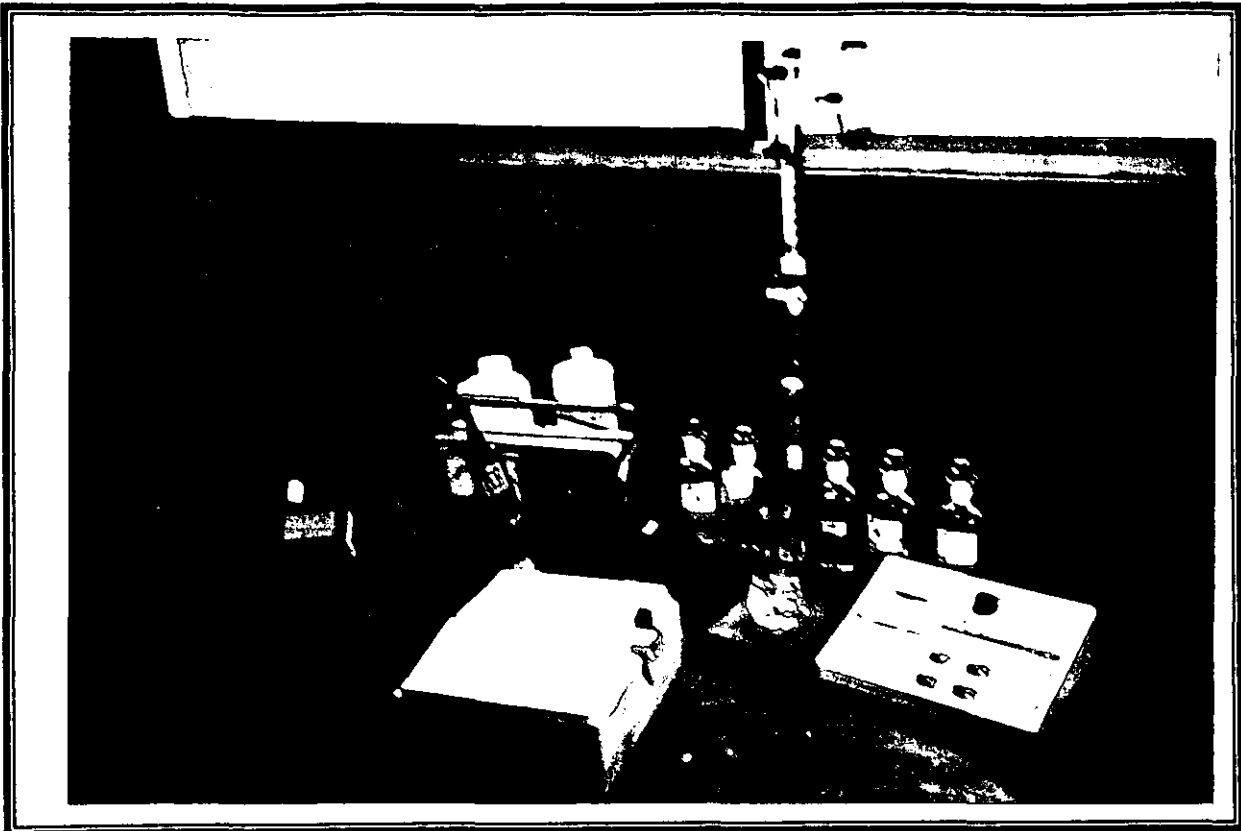


FOTO II.4 Equipo analítico empleado durante el muestreo en campo se puede apreciar el medidor de oxígeno disuelto, conductímetro, espectrofotómetro y turbidímetro y equipo para determinar alcalinidad.



FOTO II.7 Determinaciones de conductividad y sólidos disueltos totales.

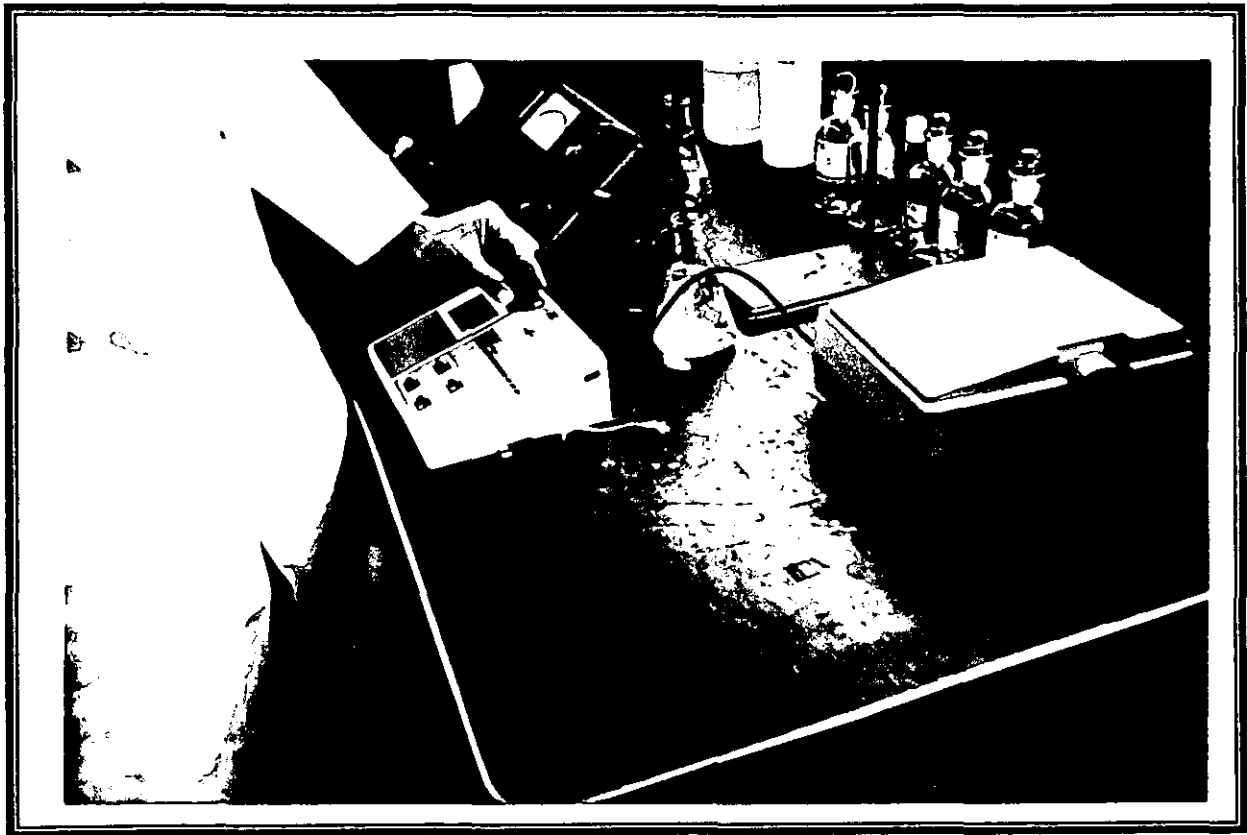


FOTO II.8 Equipo para determinar turbiedad, utilizado durante el muestreo y análisis en campo.



FOTO II.9 Análisis de alcalinidad realizado en campo.

ANEXO III

Resultados analíticos del agua del muestreo de la planta potabilizadora a pie de pozo.

a) Campo-Muestras Instantáneas PRIMER MUESTREO (14 DE MARZO DE 2000).

TABLA III.1 Primer muestreo de campo-muestras instantáneas.

Punto	Hora Real	Temperatura	pH	Conductividad	Color	Turbiedad	SDT	O ₂ disuelto	Cloro dis.
		°C		mS/cm	Pt-Co	UNT	mg/L	mg/L	mg/L
1	12:15	23,5	8,27	1710	21	0,72	867	0,95	<0,2
2	12:20	22,5	8,26	1685	20	0,67	867	7,2	N.R
3	12:25	22,5	7,9	1700	13	0,23	864	6	N.R
4	12:30	16	7,28	1024	11	0,48	482	-	N.R
5	12:35	22	8,27	1713	58	5,4	875	-	<0,2
1	14:20	23	8,35	1690	19	1,15	863	1,6	<0,2
2	14:25	23	8,29	1620	20	0,36	870	10,2	N.R
3	14:30	23	7,97	1663	17	0,28	867	8	N.R
4	14:35	17	7,4	1034	10	0,24	476	-	N.R
5	14:40	23	7,98	1695	52	5,7	870	-	<0,2
1	16:20	23	8,28	1718	23	0,88	879	2,3	<0,2
2	16:25	22,5	8,28	1720	14	0,27	866	9,3	N.R
3	16:30	23	7,96	1700	11	0,21	870	8	N.R
4	16:35	18	7,3	1050	8	0,1	479	-	N.R
5	16:40	23	8,09	1730	48	6,1	876	-	<0,2
1	18:20	22,5	8,33	1730	22	0,32	870	0,45	<0,2
2	18:25	22,5	7,95	1717	14	0,22	874	9,2	N.R
3	18:30	22,5	7,84	1737	10	0,12	865	7,1	N.R
4	18:35	23,5	7,52	1029	4	0,08	490	-	N.R
5	18:40	21,5	8,09	1759	52	6,5	850	-	<0,2
1	20:20	22	8,25	1723	23	0,63	866	2,7	<0,2
2	20:25	22	8,1	1687	19	0,27	874	11	N.R
3	20:30	22	7,68	1685	14	0,19	871	8,3	N.R
4	20:35	18	7,3	1040	9	0,13	500	-	N.R
5	20:40	18	7,89	1709	54	6,3	850	-	<0,2
1	22:15	20	7,72	1710	21	0,8	882	2,3	<0,2
2	22:20	22	8,05	1722	12	0,45	892	10,3	N.R
3	22:25	21,5	7,85	1718	18	0,2	867	8,1	N.R
4	22:30	17	7,55	1020	11	0,05	483	-	N.R
5	22:35	18,7	8,4	1640	56	6,8	850	-	<0,2

TABLA III.2 Continuación. Campo-Muestras Instantáneas

Punto	Hora Real	Temperatura °C	pH	Conductividad mS/cm	Color Pt-Co	Turbiedad UNT	SDT mg/L	O ₂ disuelto mg/L	Cloro dis. mg/L
1	0:15	21.5	8.36	1731	21	1.11	889	1.1	<0.2
2	0:20	21.5	8.32	1727	17	0.52	899	9.3	N.R
3	0:25	21.5	7.92	1697	15	0.41	876	8.3	N.R
4	0:30	17	7.39	1021	9	0.16	486	-	N.R
5	0:30	19.5	8.08	1704	54	6.7	917	-	<0.2
1	2:15	20	8.42	1728	23	2.3	892	1.6	<0.2
2	2:20	21.5	8.39	1743	12	0.45	907	9.9	N.R
3	2:25	21.5	8.02	1743	14	0.15	885	8.1	N.R
4	2:30	16	7.33	1027	5	0.09	468	-	N.R
5	2:35	19	8.75	1727	57	6.1	858	-	<0.2
1	4:15	21	8.42	1736	24	1.5	876	2.6	<0.2
2	4:20	21.5	8.34	1747	13	0.54	895	10.6	N.R
3	4:25	21	8.02	1692	16	0.19	875	9.1	N.R
4	4:30	16	7.46	1010	4	0.15	465	-	N.R
5	4:35	18	8.37	1724	58	5.75	836	-	<0.2
1	6:15	21.5	8.34	1749	21	1.31	870	1.2	<0.2
2	6:20	21	8.35	1743	19	0.74	880	12.3	N.R
3	6:25	22	7.98	1734	12	0.52	886	10.9	N.R
4	6:30	16	7.44	1027	6	0.32	466	-	N.R
5	6:35	18	7.97	1735	58	6.32	877	-	<0.2
1	8:15	21.5	8.45	1736	20	2.36	873	2.6	<0.2
2	8:20	20	8.43	1729	17	1.56	880	11.6	N.R
3	8:25	22	8.16	1739	15	0.59	889	9.3	N.R
4	8:30	15	7.42	1025	9	0.22	473	-	N.R
5	8:35	21	8.15	1734	59	6.2	873	-	<0.2
1	10:15	22	7.9	1689	19	2.3	879	1.6	<0.2
2	10:20	23	8.13	1758	19	1.2	882	13	N.R
3	10:25	22	7.94	1716	15	0.51	884	10.4	N.R
4	10:30	16	7.54	1013	7	0.4	476	-	N.R
5	10:35	23	7.8	1720	60	5.69	876	-	<0.2

Punto 1. -Extracción del pozo (agua cruda o influente)

Punto 2. - Salida de la torre de ozonación.

Punto 3. Salida del tanque de Carbón activado

N.A. = No Aplica

N.R. = No Requerido

Resultados analíticos del agua de muestreo de la planta potabilizadora a pie de pozo

TABLA 111.3 Campo-Muestras Instantáneas: SEGUNDO MUESTREO (16 DE MARZO DE 2000).

Punto	Hora Real	Temperatura °C	pH	Conductividad mS/cm	Color Pt-Co	Turbiedad UNT	SDT mg/L	O2 disuelto mg/L	Cloro dis. mg/L
1	11:05	23	8	1736	38	3,54	867	1.8	<0.2
2	11:10	22	8,1	1735	18	0,42	867	7	N.R
3	11:15	22	7,8	1722	15	0,28	864	6.2	N.R
4	11:20	17	7,4	1031	9	0,11	482		N.R
5	11:25	23	7,7	1745	12	3,9	875		<0.2
1	15:05	23	8	1750	33	3,4	863	7,6	<0.2
2	15:10	20	8,4	1740	18	0,88	870	6.4	N.R
3	15:15	23	7,7	1728	15	0,28	867	6.5	N.R
4	15:20	17	7,2	1029	9	0,04	476		N.R
5	15:25	23	7,7	1738	13	5,3	870		<0.2
1	19:05	22	8,1	1738	30	3,2	879	0.8	<0.2
2	19:10	19	8,4	1744	16	1,2	866	6.2	N.R
3	19:15	22	7,8	1729	11	0,73	870	4.8	N.R
4	19:20	18	7,4	1037	7	0,58	479		N.R
5	19:25	22	7,7	1710	9	4,6	876		<0.2
1	23:05	21	8,2	1722	33	3,65	880	1.2	<0.2
2	23:10	17	8,5	1723	17	0,96	876	5.4	N.R
3	23:15	22	7,8	1705	14	0,46	869	4.9	N.R
4	23:20	16	7,7	1021	9	0,12	484		N.R
5	23:25	21	7,4	1720	13	5,3	878		<0.2
1	3:05	20	8,2	1742	22	3,43	885	1.4	<0.2
2	3:10	16	8,4	1751	6	0,99	875	7.2	N.R
3	3:15	20	7,7	1722	3	0,54	877	5.4	N.R
4	3:20	16	7,5	1028	6	0,27	479		N.R
5	3:25	21	7,6	1729	10	6,2	888		<0.2
1	7:05	20,5	8,1	1700	35	3,53	869	1.2	<0.2
2	7:10	14	8,4	1722	17	0,79	865	7.4	N.R
3	7:15	19	7,8	1745	15	0,32	875	5.3	N.R
4	7:20	14	7,6	1038	12	0,12	484		N.R
5	7:25	17	7,8	1708	11	6,3	869		<0.2

Resultados analíticos del agua de muestreo de la planta potabilizadora a pie de pozo

TABLA III.4 Campo-Muestras Instantáneas: TERCER MUESTREO 23 DE MARZO DE 2000.

Punto	Hora Real	Temperatura °C	pH	Conductividad mS/cm	Color Pt-Co	Turbiedad UNT	SDT mg/L	Cloro dis. mg/L
1	11:30	24	8,08	1806	52	6.3	872	<0.2
2	11:35	23	8.11	1804	20	1.66	865	N.R
3	11:40	23	7,77	1800	15	0,82	869	N.R
4	11:45	22	7,1	1258	11	0,52	585	N.R
5	11:50	24	8,26	1817	76	8,95	877	<0.2
1	15:30	24	8,05	1810	45	8,72	865	<0.2
2	15:35	23	8,12	1800	18	3,11	874	N.R
3	15:40	23	7,77	1800	16	2.03	871	N.R
4	15:45	19	7.2	1256	9	1.16	587	N.R
5	15:50	25	7,77	1825	89	9,3	873	<0.2
1	19:30	22,5	8,04	1816	37	7.56	869	<0.2
2	19:35	22,5	8,02	1804	11	2.29	875	N.R
3	19:40	23	7,76	1790	13	1,2	870	N.R
4	19:45	19	7,21	1280	2	0,51	580	N.R
5	19:50	21,5	8,16	1800	91	10.91	872	<0.2
1	23:30	21	8,07	1782	49	6.89	877	<0.2
2	23:35	22,5	8,12	1810	17	1.69	867	N.R
3	23:40	22	7,75	1774	15	1,32	872	N.R
4	23:45	19	7,23	1341	13	0.29	580	N.R
5	23:50	19	8,17	1792	102	9.7	875	<0.2
1	4:30	21	8,05	1816	61	6.55	877	<0.2
2	4:35	18	8,09	1814	25	2.35	861	N.R
3	4:40	22	7.79	1822	23	1.29	868	N.R
4	4:45	17,5	7,05	1381	12	0,58	581	N.R
5	4:50	22	8,42	1815	110	10.54	872	<0.2
1	7:30	21	7,98	1810	46	8,42	881	<0.2
2	7:35	21	8,01	1828	15	2,92	863	N.R
3	7:40	22	7,6	1822	19	1,42	872	N.R
4	7:45	16	7,01	1375	7	0,26	572	N.R
5	7:50	17	7,9	1821	93	9,72	870	<0.2

Resultados analíticos del agua muestreada en la planta potabilizadora a pie de pozo

TABLA III.5 Campo-Muestras Instantáneas: CUARTO MUESTREO 28 DE MARZO DE 2000.

Punto	Hora Real	Temperatura °C	pH	Conductividad mS/cm	Color Pt-Co	Turbiedad UNT	SDT mg/L	O ₂ disuelto mg/L	Cloro dis. mg/L
1	11:00	25	7.98	1761	34	1.46	834	1,9	<0.2
2	11:05	23	7.94	1785	12	0.91	862	11,3	N.R
3	11:10	22	7.82	1780	16	0.48	870	5,5	N.R
4	11:15	19	7.03	1468	5	0.39	728	2,45	N.R
5	11:20	28	7.72	1778	173	14.6	846	5,9	<0.2
1	15:00	24	8	1840	29	1.32	879	1,1	<0.2
2	15:05	23	7.96	1816	12	0.83	865	12	N.R
3	15:10	24	8.15	1787	11	0.65	856	5.1	N.R
4	15:15	21	7.07	1539	6	0.62	733	1,8	N.R
5	15:20	24	7.77	1811	153	12,3	857	7,5	<0.2
1	19:00	23	8.06	1827	34	1.16	879	1,7	<0.2
2	19:05	22	8.1	1826	13	0.62	866	10,6	N.R
3	19:10	21	8.13	1824	8	0.47	884	4,3	N.R
4	19:15	22	6.94	1598	5	0.27	720	1.5	N.R
5	19:20	22	7.7	1815	170	15.1	875	6,3	<0.2
1	23:00	21	8.8	1799	27	2.86	869	1.6	<0.2
2	23:05	22	8.04	1763	11	0.7	836	12,2	N.R
3	23:10	20	8.09	1837	8	0.56	855	5.7	N.R
4	23:15	21	7.02	1611	19	0.25	765	1.4	N.R
5	23:20	20	8.15	1807	160	13,8	848	5.7	<0.2
1	3:00	21	8.2	1857	30	2.6	885	1.4	<0.2
2	3:05	21	8.05	1828	14	2.02	874	11,6	N.R
3	3:10	19	8.14	1828	11	0.59	840	5.3	N.R
4	3:15	20	6.98	1672	7	0.49	766	1.7	N.R
5	3:20	20	7.9	1862	180	10.6	806	6.2	<0.2
1	7:00	20	8.12	1845	25	2.39	889	1.7	<0.2
2	7:05	21	8.09	1842	16	1.68	872	9.8	N.R
3	7:10	20	8.06	1819	7	0.56	859	4.2	N.R
4	7:15	18	6.97	1700	20	0.74	787	1.9	N.R
5	7:20	20	7.73	1830	150	12.3	861	6.9	<0.2

ANEXO IV

Resultados analíticos del agua de muestreo de la planta potabilizadora a pie de pozo.

Campo-muestras Instantáneas:

TABLA VI.1 Primer muestreo instantáneo tarde 15:00 hr.

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	18.89	0.016	0.77	0.28	1.29	0.018	0.115	135.7	403.20	0	negativo
2	18.02	0.011	0.71	0.28	1.4	0.037	0.122	136.3	409.80	0	negativo
3	17.47	0.1	1.96	<0.1	<0.1	<0.018	0.051	138.9	403.40	0	negativo
4	12.77	<0.011	1.09	<0.1	<0.1	<0.018	0.013	74.8	195.84	0	negativo
5	18.14	<0.011	2.07	<0.1	<0.1	0.007	0.066	131.5	414.20	0	negativo

TABLA VI.2 Primer muestreo instantáneo mañana 7:00 am

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	18.81	<0.011	0.8	0.28	1.34	<0.012	0.104	136.8	373.20	0	negativo
2	17.39	0.012	0.72	0.28	1.23	0.021	0.101	137.9	381.80	0	negativo
3	18.54	0.067	1.99	<0.1	<0.1	<0.018	0.031	139.1	403.40	0	negativo
4	13.20	<0.011	1.07	<0.1	<0.1	<0.018	0.020	74.7	184.64	0	negativo
5	15.14	<0.011	2.1	<0.1	<0.1	0.078	0.045	138.8	425	0	negativo

TABLA VI.3 Segundo muestreo instantáneo tarde

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	18.06	<0.011	0.91	0.28	1.34	0.023	0.09	140.1	373.2	0	negativo
2	17.98	0.038	0.73	0.50	0.90	<0.018	0.096	140.5	377.4	0	negativo
3	16.47	0.026	2.04	<0.1	<0.1	<0.018	0.035	138.8	425	0	negativo
4	14.68	<0.011	1.66	<0.1	<0.1	<0.018	<0.005	78.7	195.84	0	negativo
5	17.63	<0.011	2.14	<0.1	<0.1	0.149	0.049	143.9	371	0	negativo

Resultados analíticos del agua de muestreo de la planta potabilizadora a pie de pozo

Campo-muestras Instantáneas:

TABLA VI.4 Segundo muestreo instantáneo mañana

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	20.30	<0.011	0.78	0.28	1.46	0.020	0.093	145	407.6	0	negativo
2	19.10	0.040	0.73	0.45	1.29	< 0.018	0.091	142.3	450.8	0	negativo
3	18.82	0.025	2.04	<0.1	<0.1	< 0.018	0.034	139.1	403.4	0	negativo
4	14.48	<0.011	1.19	<0.1	<0.1	< 0.018	< 0.005	78	204.48	0	negativo
5	20.42	<0.011	2.12	<0.1	<0.1	0.155	0.045	143.4	394.8	1	negativo

TABLA VI.5 Tercer muestreo instantáneo tarde 19:30 hrs.

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	18.31	0.81	0.81	0.28	1.15	0.096	0.079	-	435.6	0	negativo
2	17.15	0.080	0.75	0.28	1.18	0.054	0.08	-	373.2	0	negativo
3	18.43	<0.011	2.06	0.22	<0.1	0.04	0.022	-	392.6	10	negativo
4	14.33	<0.011	1.22	<0.1	<0.1	0.029	0.007	-	228.6	0	negativo
5	14.88	0.022	1.84	0.22	<0.1	3.85	0.114	-	394.8	0	negativo

TABLA VI.6 Tercer muestreo instantáneo mañana 11:40 hrs.

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	19.38	<0.011	0.83	0.17	<0.1	0.077	0.075	-	401.2	0	negativo
2	18.63	0.031	0.74	0.22	1.62	0.056	0.088	-	379.6	0	negativo
3	17.35	<0.011	2.05	<0.1	<0.1	0.034	0.023	-	412	0	negativo
4	15.32	<0.011	1.22	0.22	<0.1	0.30	0.013	-	201.92	0	negativo
5	16.88	0.016	2.04	0.34	0.22	0.792	0.105	-	416.2	0	negativo

Resultados analíticos del agua de muestreo de la planta potabilizadora a pie de pozo ""
Campo-muestras Instantáneas:

TABLA VI.7 Cuarto muestreo instantáneo tarde 15:40 hrs.

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	Mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	18,22	0,011	0,76	0,11	1,18	0,075	0,086	136,1	416,22	0	negativo
2	17,31	0,011	0,69	0,22	1,12	0,057	0,084	136,7	418,4	0	negativo
3	16,83	0,026	1,91	<0,1	<0,1	0,031	0,031	137	429,2	0	negativo
4	16,51	0,021	1,23	<0,1	<0,1	<0,018	0,08	147,5	271,8	2	negativo
5	18,61	<0,011	2,01	<0,1	<0,1	0,155	0,047	139,7	392,6	0	negativo

TABLA VI.8 Cuarto muestreo muestreo instantáneo mañana 8:00 am

Punto	*DQO	* NO ₂	* NO ₃	* N Proteico	*N. Amoniacal	* Fierro Total	* Manganeso total	* Cloruros	* SO ₄	* Coliformes	* Coliformes
	mg/L	Mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	totales (UFCs)	Fecales (UFC)
1	18,50	<0,011	0,85	0,28	0,28	0,084	0,076	134,5	403,4	0	negativo
2	16,76	0,024	0,7	0,17	0,17	0,072	0,088	135,3	416,2	0	negativo
3	16,64	0,02	1,9	<0,1	<0,1	0,036	0,028	136,3	412	0	negativo
4	16,88	0,02	1,12	0,22	<0,1	<0,018	0,086	149,8	277,2	1	negativo
5	16,64	0,012	1,92	0,22	<0,1	1,1	0,073	139,9	403,4	0	negativo

TABLA VI.9 Parámetros estadísticos para la temperatura y pH en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la ozonación (Punto 2).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 2	T (°C)				pH			
Media	21.9	17.8	21.6	22.0	8.2	8.4	8.1	8.0
σ	0.87	2.90	1.94	0.89	0.15	0.14	0.05	0.07
x.máxima	23	22.000	23	23.000	8.43	8.46	8.12	8.1
x.mínima	20	14.00	18	21.00	7.95	8.08	8.01	7.94

TABLA VI.10 Parámetros estadístico para la conductividad y color en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la ozonación (Punto 2).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 2	Conductividad μS/cm				Color U. Pt-Co			
Media	1716	1736	1810	1810	16.2	14.4	17.1	12.9
σ	37.59	11.58	10.12	29.91	3.34	4.63	4.72	1.79
x.máxima	1758	1751	1828	1842	21	18	25	16
x.mínima	1620	1722	1800	1763	12	6	11	11

TABLA VI.11 Parámetros estadísticos de la turbiedad y los SDT en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la ozonación (Punto 2).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 2	Turbiedad UTN				SDT mg/L			
Media	0.5	0.8	2.3	1.0	882.0	869.8	867.5	862.4
σ	0.40	0.26	0.60	0.58	13.53	4.71	5.79	0.91
x.máxima	1.56	1.2	3.11	2.02	907	876	875	874
x.mínima	0.22	0.42	1.66	0.62	864	865	861	836

TABLA VI.12 Parámetros estadísticos del oxígeno disuelto en los muestreo realizados en la planta potabilizadora a la salida de la ozonación (Punto 2).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 2	O₂ disuelto mg/L			
Media	10.2	6.8		11.2
σ	1.553	0.839		0.907
x.máxima	13	7.6		12.2
x.mínima	7.2	5.4		9.8

TABLA VI.13 Parámetros estadísticos para la temperatura y pH en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida del carbón activado (Punto 3).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 3	T (°C)				pH			
Media	22.0	21.3	22.5	20.9	7.9	7.9	7.6	7.9
σ	0.620	1.5055	0.548	1.789	0.117	0.481	0.278	0.433
x.máxima	23	23.000	23	24	8.16	8.92	7.79	8.15
x.mínima	21	19.00	22	19	7.68	7.69	7.08	7.05

TABLA VI.14 Parámetros estadístico para la conductividad y color en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida del carbón activado (Punto 3).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 3	Conductividad μS/cm				Color U. Pt-Co			
Media	1710	1725	1801	1812	10.7	10.8	16.5	9.8
σ	24.974	12.983	18.619	23.330	3.298	4.750	3.601	3.312
x.máxima	1743	1745	1822	1837	17	15	23	16
x.mínima	1663	1705	1774	1780	6	3	13	7

TABLA VI.15 Parámetros estadísticos de la turbiedad y los SDT en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida del carbón activado (Punto 3).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 3	Turbiedad UTN				SDT mg/L			
Media	0.3	0.4	1.3	0.5	875.4	870.3	870.3	860.6
σ	0.163	0.179	0.394	0.068	9.100	4.885	1.633	0.627
x.máxima	0.59	0.73	2.03	0.65	889	877	872	884
x.mínima	0.12	0.28	0.82	0.47	860	864	868	840

TABLA VI.16 Parámetros estadísticos del oxígeno disuelto en los muestreo realizados en la planta potabilizadora a la salida del carbón activado (Punto 3).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 3	O₂ disuelto mg/L			
Media	8.4	5.5		5.0
σ	1.330	0.691		0.627
x.máxima	10.9	6.5		5.7
x.mínima	6	4.8		4.2

TABLA VI.17 Parámetros estadísticos para la temperatura y pH en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la EDR (Punto 4).

TABLA VI.17 Parámetros estadísticos para la temperatura y pH en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la EDR (Punto 4).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 4	T (°C)				pH			
Media	16.6	16.3	18.7	20.1	7.4	7.5	7.1	7.0
σ	0.98	1.37	1.99	1.47	0.10	0.15	0.09	0.05
x.máxima	18	18	22	22	7.55	7.66	7.23	7.07
x.mínima	15	14	16	18	7.28	7.23	7.01	6.94

TABLA VI.18 Parámetros estadístico para la conductividad y color en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la EDR (Punto 4).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 4	Conductividad $\mu\text{S/cm}$				Color U. Pt-Co			
Media	1027	1031	1314	1596	7.5	8.5	7.7	8.6
σ	11.01	6.28	57.60	85.36	3.00	2.07	4.05	7.15
x.máxima	1050	1038	1381	1700	13	12	13	20
x.mínima	1010	1021	1256	1468	4	6	2	5

TABLA VI.19 Parámetros estadísticos de la turbiedad y los SDT en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la EDR (Punto 4).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 4	Turbiedad UTN				SDT mg/L			
Media	0.2	0.1	0.5	0.4	479.4	480.7	580.8	747.5
σ	0.14	0.20	0.32	0.19	10.44	3.20	5.19	0.37
x.máxima	0.48	0.58	1.16	0.74	500	484	587	787
x.mínima	0.05	0.04	0.26	0.25	465	476	572	709

TABLA VI.20 Parámetros estadísticos del oxígeno disuelto en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la EDR (Punto 4).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 4	O₂ disuelto mg/L			
Media	5.4	4.2		1.8
σ	1.425	0.709		0.372
x.máxima	7.5	5		2.45
x.mínima	3.2	3.4		1.4

TABLA VI.21 Parámetros estadísticos para la temperatura y pH en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la cloración (Punto 5).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 5	T (°C)				pH			
Media	19.4	21.1	21.2	22.2	8.1	7.7	8.1	7.8
σ	3.09	2.23	3.01	3.20	0.26	0.07	0.24	0.17
x.máxima	23	23	25	28	1759	7.8	8.42	8.15
x.mínima	14.5	17	17	20	1640	7.61	7.77	7.7

TABLA VI.22 Parámetros estadístico para la conductividad y color en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la cloración (Punto 5).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 5	Conductividad $\mu\text{S/cm}$				Color U. Pt-Co			
Media	1716	1725	1812	1817	54.9	8.6	92.9	170.7
σ	29.15	14.99	12.86	27.77	4.93	4.20	11.64	21.92
x.máxima	1759	1745	1825	1862	61	13	110	205
x.mínima	1640	1708	1792	1778	45	2	76	150

TABLA VI.23 Parámetros estadísticos de la turbiedad y los SDT en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la cloración (Punto 5).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 5	Turbiedad UTN				SDT mg/L			
Media	6.3	4.3	9.8	12.7	856.1	876.0	873.2	848.6
σ	0.98	1.98	0.74	2.02	34.18	6.84	2.48	0.67
x.máxima	8.4	6.3	10.91	15.1	917	888	877	875
x.mínima	5.29	1.2	8.95	10.4	783	869	870	806

TABLA VI.24 Parámetros estadísticos del oxígeno disuelto en los muestreos realizados en la planta potabilizadora a la salida de la cloración (Punto 5).

Muestreo	1° muestreo	2° muestreo	3° muestreo	4° muestreo
Punto 5	O ₂ disuelto mg/L			
Media	7.3	5.7		6.4
σ	2.263	0.561		0.671
x.máxima	11.5	6.3		7.5
x.mínima	4.2	4.8		5.7

ANEXO V NORMATIVIDAD

** NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION"

Introducción

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización.

1. Objetivo y campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

4. Límites permisibles de calidad del agua

4.1 Límites permisibles de características bacteriológicas

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 1. Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes deben establecer los agentes biológicos nocivos a la salud a investigar.

TABLA 1

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

TABLA 2

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

4.3 Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA 3

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO ₄ =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

4.4 Límites permisibles de características radiactivas

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

TABLA 4

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	1.0

5. Tratamientos para la potabilización del agua

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes biológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua enlistados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4.

5.1 Contaminación biológica

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus.- Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta.

5.2 Características físicas y organolépticas

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, adsorción en carbón activado u oxidación.

5.3 Constituyentes químicos

5.3.1 Arsénico.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.3 Cloruros.- Intercambio iónico, ósmosis inversa o destilación.

5.3.4 Dureza.- Ablandamiento químico o intercambio iónico.

5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos.- Adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

5.3.6 Hierro y/o manganeso.- Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.7 Fluoruros.- Ósmosis inversa o coagulación química.

5.3.8 Materia orgánica.- Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

5.3.9 Mercurio.- Proceso convencional: coagulación-floculación-precipitación-filtración, cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Procesos especiales: en carbón activado granular y ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l; con carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

5.3.10 Nitratos y nitritos.- Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos.

5.3.11 Nitrógeno amoniacal.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

5.3.12 pH (potencial de hidrógeno).- Neutralización.

5.3.13 Plaguicidas.- Adsorción en carbón activado granular.

5.3.14 Sodio.- Intercambio iónico.

5.3.15 Sólidos disueltos totales.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

5.3.16 Sulfatos.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.17 Sustancias activas al azul de metileno.- Adsorción en carbón activado.

5.3.18 Trihalometanos.- Aireación u oxidación con ozono y adsorción en carbón activado granular.

5.3.19 Zinc.- Destilación o intercambio iónico.

5.3.20 En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no especificadas en el apartado 4, se deben coordinar con la autoridad sanitaria competente, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas involucrados en la contingencia, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

****Información tomada de la norma NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994; Para una consulta mas amplia de la presente norma consultar las direcciones:**

Indice de normas oficiales <http://www.cft.gob.mx/html/9-publica/normas.html>.

Secretaria de medio ambiente recursos naturales y pesca <http://www.semarnap.gob.mx/gestion/legislacion.htm>