



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

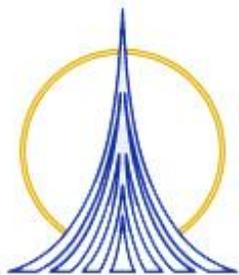
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**ALTERNATIVAS PARA LA
MITIGACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO
EN EL
DRENAJE PROFUNDO**

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO
PRESENTA:

RAÚL VILLEGAS MARTÍNEZ

DIRECTOR: I.Q. JOSÉ ANTONIO ZAMORA PLATA



MÉXICO D.F.

AGOSTO DE 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Doy gracias a Dios por otorgarme la vida, permitirme la salud, darme la oportunidad de tener una familia y rodearme de gente buena.

Por permanecer a mí lado en la experiencia de la vida, por el amor, respeto y comprensión que siempre ha manifestado, le doy gracias a mi esposa;

Amada de la Cruz Ríos

Gracias por el cariño y motivación a mis hijos;

María de Lourdes Villegas de la Cruz

Ana María Villegas de la Cruz

Mariana Villegas de la Cruz

Raúl Villegas de la Cruz

Por su comprensión y apoyo a:

Mis padres

Juan Villegas Hernández

Petra Martínez Rocha

Por la convivencia y respeto a:

Beatriz Villegas y familia

Juan Villegas y familia

Irma Villegas y familia

Felipe Villegas y familia

Marcos Villegas y familia

Marcela Villegas y familia

Gracias por sus valiosas observaciones y sugerencias a los Sinodales, que hicieron posible que este trabajo cumpliera con los objetivos y las metas planteadas:

I.Q. Gonzalo Rafael Coello García

I.Q. Mariano Ramos Olmos

I.Q. Dominga Ortiz Bautista

Biol. Ma. Eugenia Ibarra Hernández

En forma muy especial doy gracias a mi Director de Tesis, que siempre manifestó su apoyo incondicional y a quien aprecio como amigo:

I.Q. José Antonio Zamora Plata

También doy gracias a los Ingenieros encargados del mi centro de trabajo, por la oportunidad y la confianza otorgada:

Ing. Alfonso García Vargas

Ing. Porfirio Gutiérrez Ortíz

Ing. Efraín Montes Velázquez

Al Ing. Rodolfo García Vargas por ayudarme en mi desarrollo como profesionista.

Y a todos mis compañeros de trabajo gracias por su amistad y respeto.

ÍNDICE

CAPÍTULO	CONTENIDO	PÁGINA
I	Introducción	4
II	Objetivos	16
III	Identificación de los sitios de riesgo	18
IV	Factores Físicos, Químicos y Biológicos	31
V	Procesos existentes para el control de las emisiones de ácido sulfhídrico	38
VI	Selección de una alternativa de tratamiento a nivel piloto para la mitigación del ácido sulfhídrico	57
VII	Legislación laboral y Normatividad	61
VIII	Propiedades generales del ácido sulfhídrico	63
IX	Planteamiento y bases de experimentación	69
X	Desarrollo Experimental para la absorción del ácido sulfhídrico con agua residual tratada	73
XI	Desarrollo Experimental para la absorción del ácido sulfhídrico con hidróxido de sodio al 2% peso	94
XII	Desarrollo Experimental para la absorción del ácido sulfhídrico con hipoclorito de sodio al 2% peso	106
XIII	Control de variables en el desarrollo experimental para la absorción del ácido sulfhídrico	114
XIV	Resultados	122
XV	Análisis de resultados	129
	Conclusiones	132
	Bibliografía	134
Anexo A.	Descripción del dispositivo experimental	136
Anexo B.	Planteamiento para el sistema que emplea hipoclorito de sodio al 2% en peso como solución de lavado	142
Anexo C	Álbum fotográfico	148
Glosario		159

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales y pluviales de la Ciudad de México que por circunstancias históricas se encuentra enclavada en un valle rodeado de montañas, formando un gran vaso natural que antes fue inclusive enorme lago, no tenía lógicamente una salida y por muchos años originaron inundaciones a veces catastróficas, amenazando desbordar los viejos e insuficientes canales de desagüe; hoy tienen en cambio dichas aguas un cause subterráneo de 164,333 m. de longitud, creado por el ingenio mexicano para conducir las al exterior del Valle, donde además serán aprovechadas para fines de riego agrícola en beneficio de la zona del Mezquital, hasta ahora una de las más áridas y castigadas del país.

El inicio de la construcción del Sistema de Drenaje Profundo fue en el mes de mayo de 1967, con una construcción de 68 kilómetros de túnel cuyo tiempo de construcción fue de 8 años, concluyendo el 19 de mayo de 1975, estando a cargo de la supervisión el Departamento del Distrito Federal.

Actualmente, el sistema de drenaje es combinado, conduciendo tanto aguas de lluvia como residuales a través de una red primaria de 1,212 kilómetros, una red secundaria de 12,326 kilómetros, plantas de bombeo, tanques de tormenta, causes abiertos, ríos entubados, presas, sifones, lagunas, colectores y hasta el momento 164 kilómetros de drenaje profundo, en donde se incluyen las lumbreras.

Como una respuesta prioritaria a las necesidades de la operación de la infraestructura de drenaje actual, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, desarrolló estudios tendientes tanto al conocimiento de la capacidad instalada para determinar políticas de operación propias que aseguren el funcionamiento eficiente (actual y futuro) del sistema. En los análisis se recurrió al uso de técnicas y modelos matemáticos de simulación que se ajustaron para representar las condiciones del sistema de drenaje.

Así mismo, se realizaron análisis de funcionamiento, tanto para cada dren individual, como de conjunto. Con el primero se determinaron capacidades de los conductos (gastos máximos en función de la altura de precipitación media de su área de aportación), niveles y gastos de descarga en las captaciones del Drenaje Profundo y plantas de bombeo así como los tiempos de traslado de la corriente de agua, resultados que se utilizan en la definición de parámetros, criterios y datos básicos para la operación. Mientras que con el segundo tipo de análisis se determinaron las políticas de transferencia más adecuadas entre conductos, en función de la zona donde se presenten las lluvias.

Los análisis anteriores se complementaron con estudios sobre los tipos de medición e información que se genera y transmite desde los puntos de control del sistema como son: Las captaciones del Drenaje Profundo, descargas entre conductos, plantas de bombeo y sitios de medición de niveles. En cada uno de ellos se analizó el tipo de medición, la forma en que se registran y transmiten los datos obtenidos, la operación efectuada y los problemas o carencias más comunes. Además, se verificó el tipo de medición de las lluvias y el procedimiento de los datos registrados en las estaciones pluviográficas. A partir de estos análisis y de las necesidades de información para una operación eficiente del drenaje.

Sin embargo no se pensó en la formación de ácido sulfhídrico, problema que desde años atrás se ha estado incrementando en forma considerable, a medida que aumenta también el volumen de agua residual que se traslada dentro del sistema de drenaje profundo, generando afectación en la salud de la comunidad circunvecina a las lumbreras, al personal operativo así como el daño que se presenta por corrosión a las instalaciones en lo que corresponde a las estructuras metálicas y de concreto.

Siendo el Sistema de Aguas de la Ciudad de la México, perteneciente a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, con funciones específicas descritas en la Ley de Aguas del Distrito Federal, publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 27 de mayo de 2003, el Organismo operador encargado de la captación, conducción y manejo de las aguas residuales, así como la construcción y mantenimiento de las estructuras hidráulicas, por lo que el personal esta en contacto permanente con estas estructuras y todas las actividades que realiza son de suma importancia, permitiendo que la ciudadanía goce de servicios de buena calidad.

El mantenimiento en este sentido juega un papel de suma importancia, las medidas preventivas también permiten que los efectos nocivos a la operación del sistema sean mínimos, una de estas medidas aplicadas a la prevención es el monitoreo.

Dentro de toda la organización existente en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, se tiene la Subdirección de Control de Calidad del Agua, que a través de la Unidad Departamental de Atención a Emergencias por Agentes Químicos, Oficina de Emergencias Hidráulicas realiza los monitoreos preventivos en el sistema de drenaje dentro del Distrito Federal, utilizando programas de trabajo a sitios considerados problemáticos por los datos obtenidos en campo, para evitar que existan riesgos por explosión, asolvamiento, emisión de gases tóxicos u otro efecto nocivo para las estructuras que integran el sistema o para el mismo usuario, a razón de éstas actividades se ha determinado que en lo que corresponde a la operación del sistema de drenaje profundo, éste presenta una peculiar característica, que es el mal olor, generando malestar a la población circunvecina y problemas de salud a los trabajadores que se encargan de dar el mantenimiento correspondiente.

En los monitoreos realizados se incluyen datos de velocidad de flujo en metros por segundo, concentración en partes por millón de ácido sulfhídrico, explosividad en porcentaje, deficiencia de oxígeno en porcentaje, condiciones físicas del carbón

activado, condiciones físicas de las estructuras metálicas como rejillas, registros y compuertas, de estructuras de cemento como pisos, bardas y chimeneas.

El equipo de medición utilizado es el multianalizador de gases modelo Watchman marca MSA, con tres sensores, para determinar (%de explosividad, ppm de ácido sulfhídrico y % volumen de oxígeno), anemómetro de bolsillo digital y bomba para muestreo de aire, ambos marca Cole Parmer.

En algunas actividades de mantenimiento se requiere utilizar un monitor de medición en tiempo real, ya que el periodo de ejecución es por varios días, la instalación se realiza colocando los sensores en las zonas de trabajo y las lecturas de las concentraciones de ácido sulfhídrico y niveles de explosividad se obtienen en la pantalla del monitor, en la mayoría de los casos se aplica inyección y extracción de aire como medida auxiliar, así como el cierre de las compuertas para suspender el paso de la corriente de agua residual, lo que reduce los riesgos potenciales de explosión e intoxicación que se manifiestan en el sistema.

El equipo de seguridad consiste en overol, casco protector, botas de casquillo, mascarilla, goggles, guantes de carnaza, guantes de hule látex y equipo de respiración autónoma.

Las herramientas básicas son: barreta, mazo, cincel, pala, cuerda, hilo de alta resistencia y manguera flexible.

Los monitoreos realizados a las estructuras que integran el sistema de drenaje profundo consisten en lo siguiente:

- Ø Se ubican las lumbreras que integran un Emisor, Interceptor, drenaje semiprofundo, captación o colector dentro de una delegación con la finalidad de tener un ahorro en el consumo de combustible en los vehículos que se utilizan para realizar los recorridos.

- Ø Identificación del tipo de reporte (Queja, Apoyo a otras áreas, Programa o Emergencia).
- Ø En los formatos destinados a estos monitoreos se anotan los datos correspondientes a la estructura, como son:
 - ✓ Ubicación (calle y número), colonia y delegación
 - ✓ Fecha y hora del reporte
 - ✓ Tipo de instalación y sitio de monitoreo
 - ✓ Unidad que atiende (vehículo asignado al monitoreo)
 - ✓ Características dimensionales de la instalación (área del terreno que ocupa y profundidad de la lumbrera)
 - ✓ Estado físico (incluye los registros, rejillas, la cama de carbón activado, chimenea bardas y pisos)
 - ✓ Determinación de % de explosividad, % de oxígeno, ppm de ácido sulfhídrico y velocidad de flujo
 - ✓ Conclusiones y recomendaciones
 - ✓ Nombre y firma del personal que participa
- Ø La información se entrega a las responsables de la Unidad Departamental de Atención a Emergencias por Agentes Químicos, en donde se analiza, captura y toman las medidas pertinentes.

Las estructuras que son monitoreadas por la Unidad Departamental de Atención a Emergencias por Agentes Químicos, que constituyen el sistema de drenaje profundo cuya importancia radica en que funcionan para desalojar el agua residuales que se generan en el Distrito Federal hacia otros Estados como es el caso de Hidalgo, Guanajuato y el Estado de México, donde posteriormente son reutilizadas en la mayoría de los casos como aguas de riego, las características se presentan en la tabla 1.

TABLA 1. ESTRUCTURAS DEL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

NOMBRE DE LA ESTRUCTURA	LONGITUD (Km)	DIÁMETRO (metros)	CAPACIDAD APROX. (m³/s)	PROFUNDIDAD (m)
EMISOR CENTRAL	50.0	6.50	220.00	DE 48 A 217
EMISOR PONIENTE	-	-	-	-
INTERCEPTOR CENTRAL	16.1	5.00	90.00	DE 22 A 41
INTERCEPTOR ORIENTE	24.5	5.00	85.00	DE 37 A 55
INTERCEPTOR ORIENTE-ORIENTE	-	-	-	-
INTERCEPTOR CENTRO-PONIENTE	16.5	4.00	40.00	DE 22-A 51
INTERCEPTOR CENTRO-CENTRO	3.7	5.00	90.00	DE 25 A 26
INTERCEPTOR PONIENTE	16.5	4.00	25.00	DE 24 A 25
INTERCEPTOR ORIENTE-SUR	13.8	5.00	80.00	DE 15 A 30
SEMIPROFUNDO IZTAPALAPA	5.5	3.10	20.00	DE 11.5 A 15.5
SEMIPROFUNDO OBRERO MUNDIAL	0.8	3.10	20.00	DE 10 A 16
SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL-CANAL DE CHALCO	8.7	3.10	20.00	DE 15 A 17
SEMIPROFUNDO 5 DE MAYO	-	-	-	-

A continuación en la figura 1 se presenta el tendido de la línea en la ciudad de México y en la figura 2 se ubican las principales captaciones que incorporan sus aguas residuales al drenaje profundo.

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO EN EL DISTRITO FEDERAL

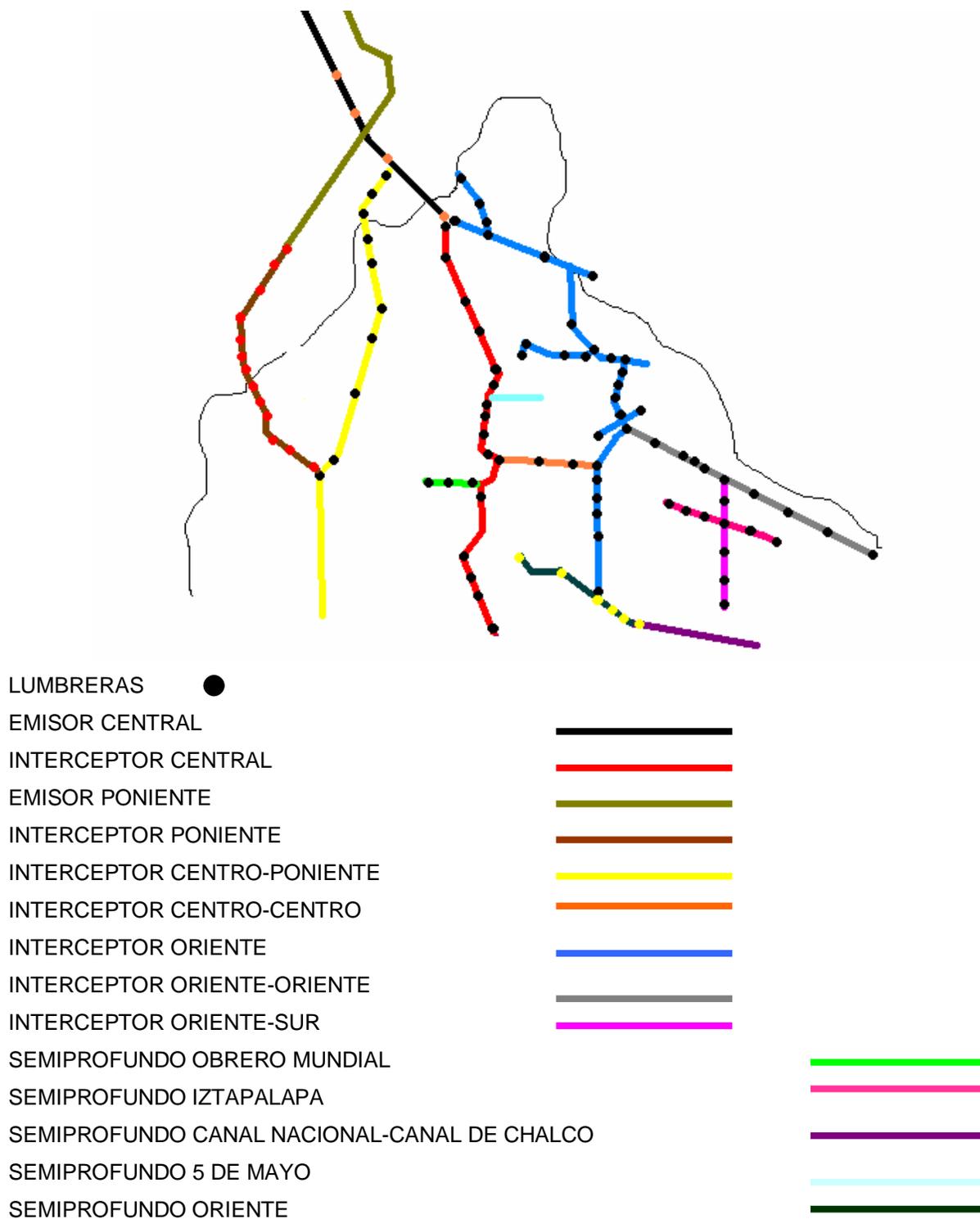
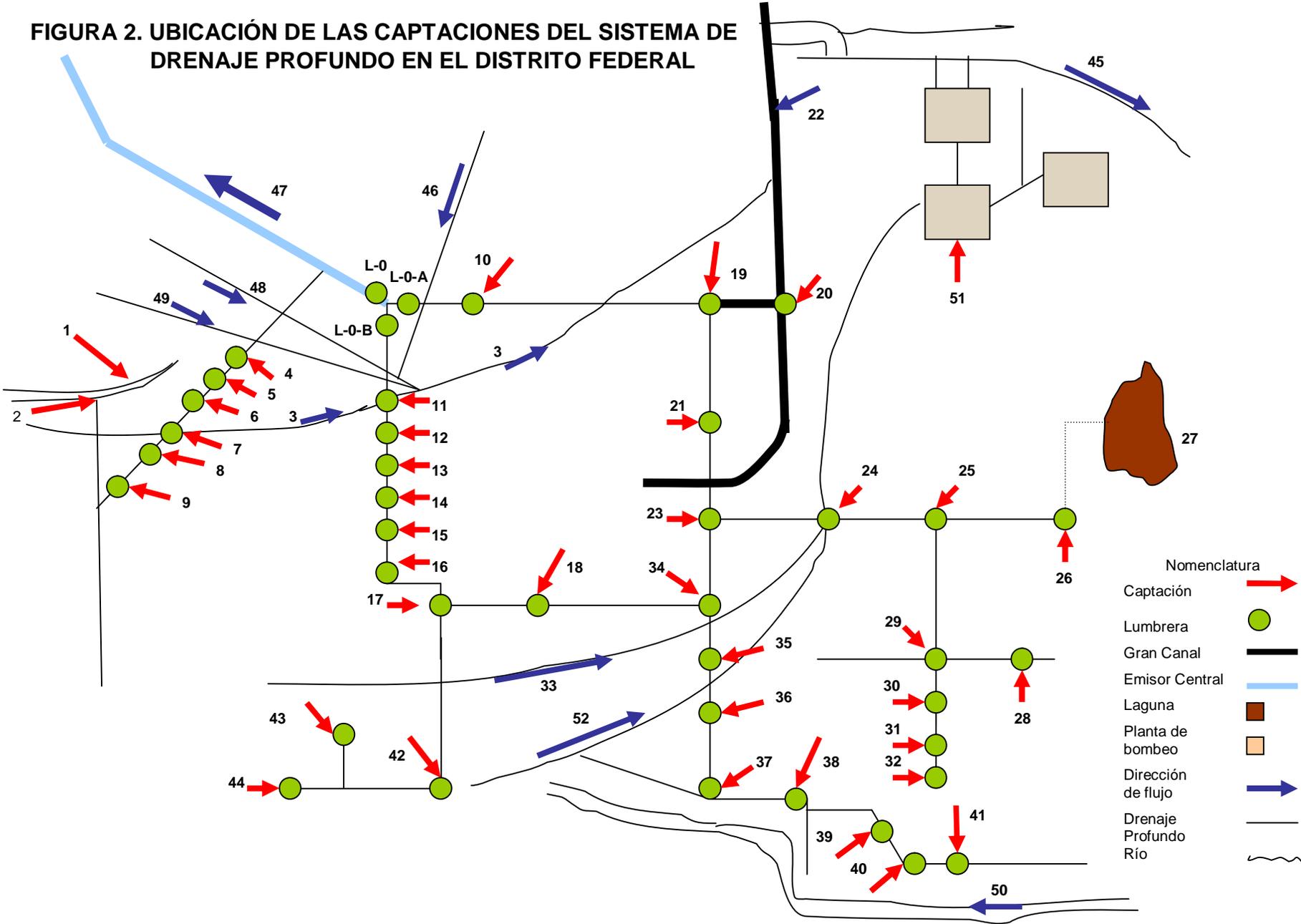


FIGURA 2. UBICACIÓN DE LAS CAPTACIONES DEL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO EN EL DISTRITO FEDERAL



Las características principales de estas instalaciones son las siguientes.

Emisor Central

La función mas importante del Emisor Central es conducir fuera de la cuenca del Valle de México las aguas de los interceptores Centro-Poniente, Central y Oriente, mediante un diámetro de 6.5 m, con una longitud total de 49.7 kilómetros, pendiente media de 0.02 m y con capacidad máxima de conducción de 200 m³/s.

Interceptor Centro-Centro

A fin de beneficiar a algunas colonias de la zona centro del Distrito Federal, se construyó una estructura de captación para el colector 10 en la lumbrera 2 que conducirá las aguas del Interceptor Oriente, aliviara al Río Churubusco y al Interceptor Canal Nacional-Canal de Chalco. Tiene un diámetro de 5 m, una longitud de 3.741 kilómetros y una pendiente media de 0.0003.

Interceptor Central

Capta las aportaciones de la zona centro de la ciudad, y el área de aportación comprendida entre el Interceptor Centro-Poniente y el Interceptor Central, suma un total de 69.71 kilómetros cuadrados.

Alivia al Río de la Piedad mediante el Interceptor Obrero Mundial, y capta los colectores de tabasco, 5 de Mayo, Héroes, Río Consulado, Cuitláhuac, Fortuna y Moyabamba. También cuenta con obras de toma de los Ríos de los Remedios, Tlalnepantla, San Javier y Cuauhtepac.

Interceptor Oriente

La función principal de este túnel es aliviar al gran Canal de desagüe, del cual depende para su drenaje gran parte del centro y norte del D. F., aunque también cuenta con una adaptación en la lumbrera 13 (ubicada en la colonia la pastora) para el desfogue de la laguna de regulación el Arbolillo en Cuautepec.

El área de aportación del tramo norte esta limitada al poniente por los interceptores Central y Poniente, y al sur, por el Río la Piedad.

La longitud total de este interceptor es de 18.7 kilómetros con diámetro de 5 m, pendiente media de 0.0005 y una capacidad de conducción de 85 m³/s.

Las aportaciones recibidas directamente provienen de un área de 13.226 km², de la cuenca del Río Cuautepec, y descarga en el parcialmente, el gran canal del Desagüe.

Interceptor Centro-Poniente

Tiene una longitud total de 16.5 kilómetros que corre en dirección norte, el área de aportación de este sistema es de 39.19 km², con un diámetro de 4 m y una pendiente media de 0.00013. Drena las aguas generadas al oriente del interceptor del poniente, desde el Río Consulado hasta el Emisor Central, y apoya a éste cuando es necesario.

Interceptor Oriente-Sur

Este interceptor descarga en el Río Churubusco por medio de la planta Zaragoza con capacidad de 20 m³/s., a través de sus captaciones en las lumbreras 3, 4 y 6, alivia al colector las Torres, al interceptor Iztapalapa y al interceptor Oriente-Oriente, respectivamente.

El diámetro de este conducto es de 5m con una pendiente media de 0.0005, una longitud de 9.6 kilómetros y con descarga en la lumbrera 7 "B" del Río Churubusco.

Interceptor Oriente-Oriente

Por medio de cuatro lumbreras capta los colectores que drenan la zona nororiente de la Delegación Iztapalapa y la laguna de regulación “El Salado”, que a su vez recibe la aportación de los colectores Kennedy, Zaragoza norte, San Miguel Teotongo, las Torres, Santa Martha y Ejercito de Oriente.

En cuanto a la infraestructura conocida como drenaje semiprofundo, que incorpora sus aguas residuales al sistema profundo, se encuentran:

- Ø Semiprofundo Canal Nacional-Canal de Chalco
- Ø Semiprofundo Iztapalapa
- Ø Semiprofundo Obrero Mundial
- Ø Semiprofundo 5 de Mayo

Otras fuentes generadoras de ácido sulfhídrico que también se monitorean son las lagunas de regulación, los ríos a cielo abierto y los canales, estos sitios al tener intercambio permanente de aire con el medio no son tan problemáticos, por eso no se contemplan en los programas de monitoreo permanente y solo se realizan apoyos cuando por falta de mantenimiento generan quejas de los vecinos de la zona.

Para resolver la problemática de generación de ácido sulfhídrico y la afectación que éste genera a la salud de los habitantes, a los trabajadores que realizan el mantenimiento y a las estructuras metálicas y de concreto que las integran, se plantean los siguientes objetivos.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

- 1. CONOCER LAS CONDICIONES AMBIENTALES QUE PROPICIAN LA GENERACIÓN DE ÁCIDO SULFHÍDRICO EN EL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO.**

- 2. ESTABLECER LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA MITIGAR LA PROBLEMÁTICA DE MALOS OLORES OCASIONADOS POR LA PRESENCIA DE ÁCIDO SULFHÍDRICO EN LAS INSTALACIONES DEL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO.**

- 3. DESARROLLAR Y APLICAR UN SISTEMA DE TRATAMIENTO A NIVEL PILOTO PARA SIMULAR LAS CONDICIONES DE EMISIÓN MÁS CRÍTICAS QUE SE PRESENTAN EN LAS LUMBRERAS DEL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO.**

- 4. MOSTRAR MEDIANTE UN ESQUEMA GENERAL EL PROTOTIPO DE TRATAMIENTO PARA LA MITIGACIÓN Y CONTROL DE EMISIONES DE ÁCIDO SULFHÍDRICO EN LAS LUMBRERAS DEL DRENAJE PROFUNDO.**

CAPÍTULO III

IDENTIFICACIÓN DE LOS SITIOS DE RIESGO

Cada interceptor esta constituido de un número determinado de lumbreras que dependen de la longitud del mismo, en general hay más de 5 lumbreras por interceptor.

Las lumbreras son estructuras empleadas como grandes pozos de visita para la construcción del sistema de drenaje profundo y posteriormente sirven como respiradero del mismo, a través de las cuales, los gases generados por la descomposición de la materia orgánica contenida en el agua residual son emitidos a la atmósfera. Forman parte fundamental en el funcionamiento del sistema de drenaje ya que son accesos a los túneles que alcanzan profundidades variables entre 15 y 250 metros, con diámetros de 6 a 12 metros. Las lumbreras se localizan a lo largo de los interceptores del drenaje profundo, su número varía en cada interceptor.

Dentro de algunas estructuras existe una acumulación de gases de diversa naturaleza, entre ellos el ácido sulfhídrico, que le confiere inicialmente características de olor desagradable, y en ciertos casos, se detectan índices de explosividad considerables originados por otros subproductos de descomposición, como el metano.

Otras instalaciones que también influyen en la emisión de ácido sulfhídrico, son las conocidas como captaciones, que hacen referencia a los sitios en donde las aguas residuales provenientes de la red primaria, colectores, ríos, lagunas de regulación, canales u otro medio en donde se almacene o se transporte agua residual que se incorporan al drenaje profundo y que se mostraron en la figura 2, los nombre de estas instalaciones se mencionan en la tabla 2.

TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE CAPTACIÓN

No	NOMBRE DE LA INSTALACIÓN
1	RÍO HONDO
2	DESCARGA DEL INTERCEPTOR PONIENTE
3	RÍO DE LOS REMEDIOS
4	CAPTACIÓN FERRERÍA
5	CAPTACIÓN TEJADA
6	CAPTACIÓN TRUJILLO
7	CAPTACIÓN HONGOS
8	CAPTACIÓN GANDI
9	CAPTACIÓN INTERCEPTOR PONIENTE
10	CAPTACIÓN CUAUTEPEC
11	CAPTACIÓN RÍO DE LOS REMEDIOS
12	CAPTACIÓN MOYABAMBA
13	CAPTACIÓN CUITLAHUAC
14	CAPTACIÓN HÉROES
15	CAPTACIÓN 5 DE MAYO
16	CAPTACIÓN TABASCO
17	INTERCONEXIÓN DEL INTERCEPTOR CENTRO-CENTRO CON EL INTERCEPTOR CENTRO
18	CAPTACIÓN COLECTOR 10
19	CAPTACIÓN EDUARDO MOLINA
20	OBRA DE TOMA GRAN CANAL
21	COLECTOR 11 Y 11-A
22	GRAN CANAL
23	INTERCONEXIÓN DEL INTERCEPTOR ORIENTE SUR CON EL INTERCEPTOR ORIENTE
24	PLANTA DE BOMBEO ZARAGOZA

TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE CAPTACIÓN (CONTINUACIÓN)

No	NOMBRE DE LA INSTALACIÓN
25	INTERCONEXIÓN DEL INTERCEPTOR ORIENTE SUR CON EL INTERCEPTOR ORIENTE-ORIENTE
26	CAPTACIÓN SANTA MARTHA
27	LAGUNA EL SALADO
28	CAPTACIÓN INDECO II
29	CAPTACIÓN SEMIPROFUNDO IZTAPALAPA
30	CAPTACIÓN M. ROJAS
31	CAPTACIÓN L. M. ROJAS
32	CAPTACIÓN CANAL DE GARAY
33	RÍO LA PIEDAD
34	INTERCONEXIÓN DEL INTERCEPTOR ORIENTE CON EL INTERCEPTOR CENTRO-CENTRO
35	CAPTACIÓN APATLACO
36	CAPTACIÓN RÍO CHURUBUSCO
37	CAPTACIÓN SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL-CANAL DE CHALCO
38	CAPTACIÓN BOMBAS
39	CAPTACIÓN SIRACUSA
40	CAPTACIÓN TELEVISA
41	CAPTACIÓN CANAL DE CHALCO
42	CAPTACIÓN XOCHICALCO
43	CAPTACIÓN OBRERO MUNDIAL
44	CAPTACIÓN PESTALOZZI
45	RÍO LA COMPAÑÍA
46	RÍO CUAUTEPEC
47	EMISOR CENTRAL
48	RÍO SAN JAVIER
49	RÍO TLALNEPANTLA
50	CANAL DE CHALCO
51	PLANTA LAGO
52	RÍO CHURUBUSCO

Del total de estas instalaciones (lumbreras y captaciones) se tienen identificadas un total de 28 sitios problemáticos que han incrementado sus concentraciones de ácido sulfhídrico a través del tiempo, a continuación se hace una descripción de esta situación.

Los datos históricos de los monitoreos realizados permiten determinar el incremento constante de las concentraciones de ácido sulfhídrico en sitios específicos, que requieren de atención especial ya que la falta de un dispositivo que mitigue la generación del gas mencionado, da como resultado el incremento de quejas por mal olor, afectación a las instalaciones y la salud de los operadores, los datos de las instalaciones problemáticas que se han generado a la fecha son:

Captación Bombas

Fecha	%	ppm
	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1999	2	35
2000	0	30
2001	0	32
2002	2	40
2003	4	45
2004	3	70
2005	2	100
2006	0	190

Captación Canal Nacional-Canal de Chalco

Fecha	%	ppm
	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
2000	0	75
2001	0	30
2002	0	100
2003	0	155
2004	2	145
2005	6	190
2006	2	210

Captación Santa Martha

Fecha	%	ppm
	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
2002	0	12
2003	4	39
2004	2	73
2005	0	135
2006	2	135

Captación Eduardo Molina

Fecha	%	ppm
	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
2003	2	45
2004	3	70
2005	2	100
2006	0	356

Captación Apatlaco

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	0	150
1999	3	35
2000	0	300
2001	0	32
2002	0	40
2003	4	45
2004	0	70
2005	2	100
2006	3	321

Captación Cuauhtepic

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
2000	2	3
2001	0	32
2002	2	48
2003	No hay datos	No hay datos
2004	4	70
2005	0	100
2006	0	275

Captación Colector 11 y Colector 11-A

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	2	15
1999	2	35
2000	0	30
2001	0	32
2002	0	40
2003	0	45
2004	2	70
2005	0	100
2006	2	98

Captación Semiprofundo Iztapalapa

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	2	75
1999	2	34
2000	2	30
2001	2	38
2002	2	40
2003	0	46
2004	0	66
2005	2	60
2006	2	163

Captación Tabasco

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1999	2	16
2000	0	22
2001	0	21
2002	2	30
2003	4	47
2004	3	73
2005	2	150
2006	0	178

Captación Héroes

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	0	15
1999	2	35
2000	2	30
2001	0	32
2002	2	40
2003	3	45
2004	3	70
2005	2	100
2006	2	144

Captación 5 de Mayo

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
2002	0	19
2003	4	29
2004	2	67
2005	2	60
2006	0	105

Captación Moyobamba

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	0	31
1999	0	39
2000	0	30
2001	0	32
2002	2	40
2003	4	45
2004	2	70
2005	2	198
2006	0	317

Planta de Bombeo Zaragoza

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
2000	0	10
2001	0	139
2002	0	145
2003	2	125
2004	2	170
2005	2	200
2006	2	319

Lumbrera 8 del Interceptor Oriente

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1996	0	22
1997	3	232
1998	2	75
1999	2	66
2000	0	69
2001	0	72
2002	2	38
2003	4	65
2004	3	60
2005	2	110
2006	2	255

Lumbrera 13 del Interceptor Oriente

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	0	65
1999	0	94
2000	2	200
2001	0	72
2002	2	38
2003	4	45
2004	3	70
2005	2	100
2006	2	219

Lumbrera 8"A" del Interceptor Oriente

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1997	0	37
1998	2	59
1999	2	48
2000	0	67
2001	0	72
2002	2	38
2003	4	45
2004	3	70
2005	2	100
2006	2	389

Lumbrera 5 del Interceptor Oriente

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	1	47
1999	0	40
2000	2	70
2001	0	72
2002	6	38
2003	5	45
2004	3	70
2005	2	100
2006	2	239

Lumbrera 1B del Interceptor Oriente

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	0	57
1999	3	13
2000	3	90
2001	0	72
2002	2	31
2003	2	46
2004	2	80
2005	1	200
2006	2	300

Lumbrera 2 del Interceptor Oriente

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1995	0	17
1996	3	10
1997	5	115
1998	2	90
1999	0	70
2000	0	72
2001	6	149
2002	2	33
2003	4	49
2004	3	77
2005	2	100
2006	2	249

Lumbrera 0"A" del Interceptor Central

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1996	0	179
1997	1	198
1998	3	200
1999	5	234
2000	4	254
2001	0	197
2002	2	100
2003	5	292
2004	8	278
2005	2	300
2006	2	311

Lumbrera 0 del Interceptor Central

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1997	0	167
1998	0	160
1999	0	100
2000	2	99
2001	0	75
2002	2	39
2003	4	45
2004	3	70
2005	2	120
2006	2	171

Lumbrera 8 del Interceptor Central

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1997	1	250
1998	1	268
1999	0	200
2000	0	327
2001	0	296
2002	2	369
2003	0	299
2004	1	353
2005	1	300
2006	0	392

Lumbrera 0"B" del Interceptor Central

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1996	0	177
1997	5	200
1998	4	288
1999	3	309
2000	3	321
2001	0	238
2002	2	355
2003	2	298
2004	3	354
2005	2	300
2006	0	378

Lumbrera 7 del Interceptor Central

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1997	1	130
1998	0	88
1999	0	65
2000	0	27
2001	0	96
2002	1	69
2003	0	99
2004	2	53
2005	2	90
2006	1	143

Lumbrera 6 del Interceptor Central

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1997	1	33
1998	1	45
1999	0	125
2000	0	112
2001	0	102
2002	2	67
2003	0	92
2004	1	99
2005	1	112
2006	0	137

Lumbrera 3 del Interceptor Centro-Centro

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	1	276
1999	0	290
2000	4	337
2001	2	196
2002	3	329
2003	3	309
2004	3	333
2005	1	310
2006	0	367

Lumbrera 2 del Interceptor Centro-Centro

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	0	368
1999	1	290
2000	5	377
2001	0	295
2002	4	369
2003	0	392
2004	3	373
2005	0	390
2006	0	400

Lumbrera 1 del Semiprofundo Iztapalapa

	%	ppm
Fecha	Explosividad promedio	Ácido sulfhídrico Valor máximo
1998	1	68
1999	0	70
2000	0	27
2001	0	96
2002	2	69
2003	0	99
2004	1	83
2005	1	90
2006	0	103

El resumen de los sitios problemáticos se muestran en la tabla 3.

TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE CAPTACIÓN PROBLEMÁTICOS

INSTALACIÓN	CONCENTRACIÓN DE H₂S (ppm)
CAPTACIONES	
Captación bombas	190
Captación Semiprofundo(Canal Nacional-Canal de Chalco)	210
Captación Apatlaco	321
Captación Colector 11 y Colector 11-A	98
Captación Eduardo Molina	356
Captación Cuautepec	275
Captación Santa Martha	135
Captación Semiprofundo Iztapalapa	163
Captación Tabasco	178
Captación 5 de Mayo	105
Captación Héroes	144
Captación Moyobamba	317
Planta de bombeo Zaragoza	319
LUMBRERAS	
CONCENTRACIÓN DE H₂S (ppm)	
Lumbrera 13 del Interceptor Oriente	219
Lumbrera 8 del Interceptor Oriente	255
Lumbrera 8"A" del Interceptor Oriente	389
Lumbrera 5 del Interceptor Oriente	239
Lumbrera 2 del Interceptor Oriente	249
Lumbrera 1-B del Interceptor Oriente	300
Lumbrera 0 del Interceptor Central	171
Lumbrera 0"A" del Interceptor Central	311
Lumbrera 0 "B" del Interceptor Central	378
Lumbrera 8 del Interceptor Central	392
Lumbrera 7 del Interceptor Central	143
Lumbrera 6 del Interceptor Central	137
Lumbrera 2 del Interceptor Centro-Centro	400
Lumbrera 3 del Interceptor Centro-Centro	367
Lumbrera 1 del Semiprofundo Iztapalapa	103

De este listado, **La Lumbra 2 del Interceptor Centro-Centro**, es la seleccionada para obtener los datos necesarios en el diseño del dispositivo de prueba, esto por las condiciones existentes en la lumbra en lo referente a su concentración y su propia ubicación, ya que esta rodeada de casas habitación que padecen los efectos y las molestias de los olores generados.

La explicación de los incrementos en la concentración de ácido sulfhídrico, es sin duda alguna el aumento de la carga orgánica en las aguas residuales, producto del crecimiento de la población, además de la incorporación que por necesidad se ha hecho de las lagunas de regulación, ríos y cauces a cielo abierto, consecuencia de las precipitaciones pluviales que se han manifestado en los últimos años.

Por lo descrito anteriormente y por la preocupación de encontrar una solución a este problema, se realizaron los siguientes análisis partiendo de los factores químicos, físicos y biológicos.

CAPÍTULO IV

FACTORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y
BIOLÓGICOS

Las aguas residuales son una fuente potencial de olores desagradables, los que en ocasiones emanan de las alcantarillas de los sistemas de drenaje y provocan molestias a la población circunvecina. Una de las principales causas de este mal olor en las aguas residuales es la presencia de ácido sulfhídrico, un gas detectable a muy bajas concentraciones menores a 1 mg/l. Además, el ácido sulfhídrico es importante por su toxicidad y por la capacidad de corroer varios de los materiales usados en la construcción de los sistemas de drenaje.

Los compuestos que generan olores desagradables en las aguas residuales son escasos y se trata de sustancias relativamente volátiles con un peso molecular entre 30 y 150. La presencia de la mayoría de estas sustancias es el resultado de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica que contiene azufre. Los gases producidos por la descomposición de las aguas residuales comúnmente incluyen ácido sulfhídrico, amoníaco, bióxido de carbono y metano. De éstos gases sólo el ácido sulfhídrico y el amoníaco son mal olientes. A menudo, las sustancias productoras del olor incluyen vapores orgánicos tales como indoles, escatoles, mercaptanos y compuestos nitrogenados.

Por su olor, el H_2S es el gas que se asocia más comúnmente con los sistemas de recolección de aguas residuales domésticas. Tiene un olor característico a huevo podrido, es tóxico y corrosivo frente a metales como fierro, zinc, cobre, plomo y cadmio. El H_2S también es precursor en la formación de ácido sulfúrico, el cual corroe pinturas base plomo, concreto, metales y otros materiales. Las principales condiciones para la formación del H_2S , generalmente favorecen la producción de otros compuestos orgánicos malolientes. La investigación de dichas condiciones puede ayudar a cuantificar el potencial de generación de olor por otros compuestos. Por tanto, resolviendo los problemas de olor por causa del H_2S , se podrán resolver otros inconvenientes causados por el olor.

Los compuestos con azufre se encuentran presentes en las excretas humanas y los sulfatos se localizan en la mayoría de suministros de agua. Normalmente se encuentra suficiente azufre disponible en las aguas residuales domésticas en forma de sulfatos inorgánicos y sulfuros, tales como mercaptanos, tioéteres y disulfuros de la producción de gases olorosos por bacterias anaeróbicas y facultativas.

El ión sulfato (SO_4^{2-}) es uno de los aniones universales que se encuentran en las aguas naturales. Se presentan frecuentemente durante los “aguaceros”, particularmente en las masas de aire de las áreas metropolitanas.

La concentración de sulfatos en el agua residual puede variar desde unos cuantos miligramos por litro (mg/l) hasta cientos de miligramos por litro.

Los compuestos sulfurosos se encuentran presentes en las aguas residuales domésticas, del orden de 1 a 3 mg/l. Todos los compuestos sulfurosos en formas oxidadas o reducidas, orgánicos e inorgánicos, son potencialmente productores de sulfuros. Generalmente, en las aguas residuales domésticas, la principal fuente de generación de sulfuros son los sulfatos. Muchos de los olores detectados en los sistemas de recolección de aguas residuales resultan de la presencia de compuestos derivados del azufre. En la tabla 4, se enlistan los compuestos derivados del azufre más comunes.

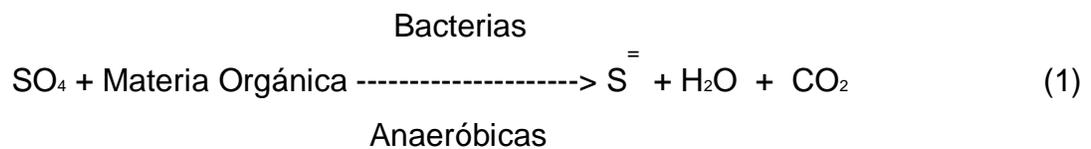
TABLA 4. COMPUESTOS COMUNES DERIVADOS DEL AZUFRE

SUSTANCIA	FORMULA	OLOR CARACTERÍSTICO	UMBRAL DE OLOR	PESO MOLECULAR
ALIL MERCAPTANO	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{SH}$	AJO, CAFÉ FUERTE	0.00005	74.15
AMIL MERCAPTANO	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_3-\text{CH}_2-\text{SH}$	PÚTRIDO, DESAGRADABLE	0.0003	104.22
BENCIL MERCAPTANO	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2-\text{SH}$	FUERTEMENTE DESAGRADABLE	0.00019	124.21
CRUTIL MERCAPTANO	$\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{SH}$	SIMILAR A LA MOFETA	0.000029	90.19
SULFURO DIMETILO	$\text{CH}_3-\text{S}-\text{CH}_3$	VEGETALES DESCOMPUESTOS	0.0001	62.13
ETIL MERCAPTANO	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{SH}$	COL DESCOMPUESTA	0.00019	62.10
ÁCIDO SULFHÍDRICO	H_2S	HUEVOS PODRIDOS	0.00047	34.10
METIL MERCAPTANO	CH_3-SH	COL DESCOMPUESTA	0.0011	48.10
PROPIL MERCAPTANO	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{SH}$	DESAGRADABLE	0.000075	76.16
DIÓXIDO DE AZUFRE	SO_2	IRRITANTE, PICANTE	0.009	64.07
TER-BUTIL MERCAPTANO	$(\text{CH}_3)_3\text{C}-\text{SH}$	MOFETA, DESAGRADABLE	0.00008	90.10
TIOCRESOL	$\text{CH}_3-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SH}$	MOFETA RANCIA	0.000062	124.21
TIOFENOL	$\text{C}_6\text{H}_5\text{SH}$	SIMILAR A AJO PODRIDO	0.000062	110.18

De esta tabla se puede observar que las sustancias de alto peso molecular usualmente no generan olores perceptibles, no son volátiles ni solubles en agua. Entonces el peso molecular bajo y la alta volatilidad de un compuesto son factores potenciales para su emisión a la atmósfera.

Los mercaptanos son una forma reducida de compuestos orgánicos azufrosos. Debido a que son malolientes, contribuyen al problema de olores fétidos por su muy bajo umbral de olor (la concentración más baja a la cual una sustancia es detectada por el olfato humano), son compuestos encontrados en las aguas residuales y son análogos a los alcoholes con la sustitución del oxígeno por el azufre en el radical (OH), son una forma reducida de compuestos orgánicos azufrosos.

Los problemas de olor y corrosión asociados con la recolección, manejo y tratamiento de aguas residuales domésticas resultan primordialmente de la reducción de sulfatos a H₂S bajo condiciones anaeróbicas, como se muestra en las siguientes reacciones:



En la oxidación bioquímica de la materia orgánica, la bacteria remueve los átomos de hidrógeno de las moléculas orgánicas ganando energía en el proceso. A través de una serie de reacciones bioquímicas, los átomos de hidrógeno son transferidos a un aceptor del hidrógeno.

El aceptor de hidrógeno puede ser una sustancia orgánica o inorgánica. Bajo condiciones aeróbicas, el oxígeno libre es el aceptor final del hidrógeno, siendo reducido a agua. En ausencia de oxígeno libre, el oxígeno combinado puede ser usado como un aceptor final del hidrógeno.

Las siguientes reacciones indican los aceptores de hidrógeno y sus productos resultantes:

REACCIÓN	ACEPTOR DE HIDROGENO	ÁTOMOS DE HIDROGENO	PRODUCTO REDUCIDO
(A)	O_2	4 H +	2 H_2O
(B)	$2 NO_3^-$	12 H +	$N_2 + 6 H_2O$
(C)	$SO_4^{=}$	10 H +	$H_2S + 4 H_2O$
(D)	ORGÁNICOS OXIDADOS	X H +	ORGÁNICOS REDUCIDOS
(E)	CO_2	8 H +	$CH_4 + 2 H_2O$

Las reacciones (A), (B) y (E) generan productos inodoros, la reacción (C) produce el H_2S , y la reacción (D) a menudo forma productos olorosos, tales como mercaptanos.

La bacteria utilizará los aceptores de hidrógeno preferentemente en el mismo orden que las reacciones listadas; esto es primero el oxígeno, segundo el nitrato, tercero el sulfato, etcétera. Sin embargo, no todos los microorganismos pueden usar cualquier aceptor de hidrógeno, puesto que algunas son bacterias estrictamente aeróbicas. Otros como las bacterias anaeróbicas, solo pueden usar formas combinadas de oxígeno (NO_3^- , $SO_4^{=}$), mientras que existe un amplio número de bacterias facultativas que pueden usar el oxígeno libre o combinado como aceptor de hidrógeno.

En ausencia de oxígeno disuelto (OD) y nitratos, los sulfatos sirven como el aceptor de hidrógeno para la oxidación bioquímica por bacterias obligadamente anaeróbicas como la reacción (1).

El organismo reductor de sulfatos más importante es la especie Desulfoidrio. Esta bacteria se encuentra tanto en tracto digestivo del hombre como en el de animales, vertiéndolo posteriormente en los desechos orgánicos, por lo cual, normalmente está presente en las aguas residuales domésticas. Cuando la fuente de materia orgánica está restringida para estos microorganismos, el amoníaco es su única fuente de nitrógeno.

Las proteínas están constituidas por aminoácidos, algunos de los cuales contiene azufre. El H_2S puede ser producido por la descomposición anaeróbica de aminoácidos tales como cisteno, cistino y metonino. El proceso de fermentación es realizado por muchas especies de bacterias proteolíticas, incluyendo Veillonella, Clostridia y Proteus. Aunque la descomposición orgánica puede contribuir a la producción del H_2S , la reducción de sulfatos es el mecanismo más importante de generación de H_2S en aguas residuales, es por lo tanto importante saber que se está realizando por parte del Sistema de Aguas de la Ciudad de México para su control y cuáles son las alternativas disponibles y aplicables.

CAPÍTULO V

PROCESOS EXISTENTES PARA EL CONTROL DE LAS EMISIONES DE ÁCIDO SULFÚDRICO

Actualmente la Unidad Departamental de Drenaje Profundo es la encargada de la construcción y mantenimiento de todo el sistema de drenaje profundo y conjuntamente con la Unidad Departamental de Atención de Emergencias por Agentes Químicos han intentado controlar las emisiones de ácido sulfhídrico, para ello se tienen colocadas camas de carbón activado impregnado con hidróxido de potasio, que de acuerdo a los resultados de los monitoreos realizados ha sido insuficiente, por ello es importante conocer otras alternativas, en este sentido se tiene la siguiente información que las describe en forma general.

En forma resumida las alternativas de control del H₂S se dividen en:

- a) Drenaje; Para evitar la formación de H₂S**
- b) Emisiones; Para eliminar el H₂S de la corriente gaseosa**

Las anteriores incluyen;

a) Drenaje:

- Ø Oxigenación: Aplicación de aire, aplicación de oxígeno, mantenimiento
- Ø Adición de sustancias Químicas
 - Oxidación: Con cloro, agua oxigenada
 - Inhibición: Con nitratos
 - Precipitación: Con sales metálicas
 - Control con pH: Con álcalis fuertes

b) Emisiones:

- Ø **ABSORCIÓN:** Lavadores de gases
- Ø **ADSORCIÓN:** Con carbón activado, Alúmina, Oxidación Férrico
- Ø **OXIDACIÓN QUÍMICA:** Con ozono
- Ø **COMBUSTIÓN:** Flama directa, catalítica
- Ø **TRATAMIENTO MICROBIOLÓGICO:** Bioabsorción, biofiltros

Puesto que en el inciso a), las técnicas de control se aplican directamente a los sistemas de drenaje en funcionamiento, exigiendo el conocimiento completo de las características de los Sistemas del Drenaje Profundo, por lo que las alternativas consignadas en este inciso no son aún consideradas en la selección de la más adecuada para el control del H₂S. Sin embargo, quedan establecidas para estudios posteriores.

Por otra parte, de las alternativas consideradas en el inciso b), se mencionan sus principales características a fin de seleccionar la que más se apegue para el control del H₂S.

Ø **ABSORCIÓN: Lavadores de gases**

- Los lavadores de gases son adecuados para grandes flujos de aire contaminados (mayores de 1 m³/s) que contengan compuestos de bajo umbral de olor como el H₂S y mercaptanos.
- Líquido de lavado;
 - § AGUA: Absorbente de H₂S, NH₃, gases orgánicos sulfurosos, aminas, ácidos orgánicos y compuestos clorados
 - § SOLUCIONES OXIDANTES DE H₂S: Hipoclorito de sodio (98% de eficiencia) permanganato de potasio (94% de eficiencia)
 - § TIEMPO DE REACCIÓN: En segundos que puede ser hasta de 1 minuto

Ø **ADSORCIÓN:**

- CARBÓN ACTIVADO; Adsorción no selectiva, vida útil limitada, requiere regeneración o cambio, aplicable a flujos bajos y concentraciones bajas (del orden de 20 ppm de H₂S), se recomienda como pulimento después de lavadores, se recomienda por ejemplo;
 - § Lechos delgados (hasta 2 cm): bajas concentraciones (<5 ppm);0.7 m³/min
 - § Lechos gaseosos (0.3-1.8 m): concentración >5 ppm; 1000 m³/min

- CARBÓN IMPREGNADO CON NaOH; Mayor rendimiento que el anterior, adecuado para H₂S y Mercaptanos, se regenera insitu con soluciones al 50% de NaOH
- ALUMINA ACTIVADA CON KmnO₄; Para concentraciones y volúmenes bajos, requiere prefiltración del aire, no se regenera se desecha
- OXIDO FÉRRICO CON ASERRÍN; Aún en etapa de investigación

Ø OXIDACIÓN QUÍMICA:

Se requiere equipo especial para regenerar ozono, con aire limpio, frío y seco, aplicable a bajas concentraciones de H₂S, las emisiones de ozono están ambientalmente restringidas.

Ø COMBUSTIÓN:

Aplicable a emisiones tóxicas, con baja concentración de sustancias combustibles, sin valor de recuperación;

- FLAMA DIRECTA; Capacidad calorífica del aire contaminado de al menos 3700 kj/m.
- CATALÍTICA; Se requiere concentración mínima de gases olorosos de 1000 ppm, los compuestos de azufre neutralizan el catalizador por lo que no es aplicable a emisiones de drenaje.

El control de los malos olores en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) generalmente se logra capturando los compuestos malolientes en una corriente de ventilación, y entonces ya sea oxidándolos químicamente en compuestos inocuos sin olor, o adsorbiéndolos con carbón activado. En vista de que las PTAR tienen gran abundancia de materias orgánicas que contienen azufre y medios anaerobios ya disponibles, el H₂S es el predominante precursor de olores ofensivos. Sin embargo, también hay una gran cantidad de otros compuestos olorosos presentes. Los sistemas de control de gases malolientes en las PTAR generalmente están diseñados para eliminar todos los precursores de los malos olores, no solamente el H₂S. Por esta razón, son populares los sistemas de oxidación química no-selectiva.

Aunque exista una variedad de oxidantes químicos fácilmente disponibles (cloro, ozono, permanganato, etc.), el más popular es una combinación de hidróxido de sodio (NaOH), e hipoclorito (HClO) para generar hipoclorito de sodio (NaClO). Su popularidad resulta de su costo relativamente bajo, disponibilidad y excelente capacidad de oxidación. Los oxidantes son continuamente consumidos en el proceso y por consiguiente, deben ser reemplazados. Esto representa un costo que es directamente proporcional a la cantidad del H₂S que se está eliminando. Por esta razón, los sistemas de oxidación química son solamente económicos para aplicaciones donde la carga de H₂S es relativamente baja (aproximadamente 45 kg por día o menos).

Aunque no existan patentes para los productos químicos utilizados en los sistemas de oxidación, hay muchos tipos de depuradores de gases utilizados en este campo. En el proceso, todas las reacciones ocurren en la fase acuosa, en la cual se disuelven los oxidantes químicos. Por consiguiente, los compuestos gaseosos malolientes deben entrar en contacto con el líquido acuoso, de tal manera, que los compuestos malolientes se disuelvan. Este proceso es llamado **absorción** y se realiza en un recipiente llamado depurador o absorbedor. Aunque las columnas empacadas a contracorriente sean el tipo más común de depuradores, también se utilizan cámaras de rociado, nebulizadores y tubos Venturi. Los productos de las reacciones químicas de oxidación son solubles en agua y se acumulan en la solución del depurador hasta que la solución se sature y se precipiten las sales. Para prevenir que ocurra esto, se purgan porciones pequeñas de la solución en circulación de la unidad ya sea continuamente o por lotes.

La adsorción es el proceso en el cual un gas o un líquido se adhiere químicamente a los poros de la superficie de un sólido (un adsorbente) En el proceso, un fluido que entra en contacto con el adsorbente y dependiendo del tipo que se use, ciertos compuestos del fluido son atraídos químicamente por la superficie sólida. El proceso sigue hasta que los poros del adsorbente estén totalmente saturados con moléculas adsorbidas. En éste punto, el material adsorbido se debe resorber de la superficie sólida, o el adsorbente, debe ser reemplazado con materiales frescos. Por consiguiente, para que el proceso de adsorción no sea costoso, el adsorbente debe poseer una relación superficie-volumen elevada y una afinidad particular por el compuesto a extraerse.

Para extraer el H₂S de flujos de gases, el carbón activado es el adsorbente preferido debido a su alta retención del H₂S.

El carbón activado se puede elaborar prácticamente de cualquier tipo de material carbonoso; carbón bituminoso y cáscara de coco son los que se utilizan más a menudo. En el proceso de fabricación, el material de base carbonosa es tratado a temperaturas altas para eliminar los compuestos volátiles, y después el material se pasa al vapor aproximadamente 900 °C , lo que incrementa considerablemente su superficie. La retención de H₂S del carbón activado se puede aumentar sustancialmente impregnando el carbón ya sea con KOH o con NaOH. Recientemente se han introducido “carbones catalíticos”, los cuales tienen también alta retención de H₂S.

Generalmente, el carbón activado se usa solamente para extraer compuestos orgánicos volátiles y ácidos de corrientes de aire, debido a que el carbón activado probablemente adsorbería sin seleccionar, la mayoría de los compuestos en un flujo anaerobio. Además, cuando se procesan flujos de gas que contienen H₂S, el procedimiento de regeneración del carbón activado impregnado con agentes cáusticos es difícil y toma bastante tiempo.

Los problemas de olor y corrosión son típicamente relacionados con la presencia del H₂S por lo que las alternativas para su control deben estar orientadas a prevenir la generación de sulfuros o la remoción de estos a través de acción química o biológica. Las alternativas del control de sulfuros en la corriente se clasifican en dos principales categorías:

1) Promoción del balance de oxígeno (operación y mantenimiento, inyección de aire o en su caso, inyección de oxígeno).

2) Adición química (Oxidación química, inhibición de la reducción de sulfuros, precipitación, control de pH).

A continuación se describen cada una de estas alternativas así como las técnicas disponibles para poderlas llevar acabo.

1. Promoción de balance de oxígeno

La presencia de oxígeno disuelto (OD) en cantidades mayores a 1 mg/l en la corriente de agua residual es suficiente para prevenir la generación de sulfuros, puesto que cualquier sulfuro que pudiera ser producido en la capa de fango deberá ser aeróbicamente oxidado a tiosulfato. Con sulfuros no disueltos presentes en la corriente, la emisión de H₂S a la atmósfera del drenaje profundo no ocurrirá. Existen algunas técnicas disponibles para promover el balance de oxígeno en sistemas de recolección de aguas residuales las cuales se discuten a continuación.

1.1. Operación y mantenimiento

La operación y el mantenimiento apropiados de los sistemas de drenaje pueden minimizar la disminución innecesaria del oxígeno. Los bloqueos parciales en el drenaje provocan regresos en el flujo, dando como resultado velocidades bajas, adicionalmente al depósito y acumulación de sólidos orgánicos y residuos. Tales condiciones favorecen la reducción de sulfatos a sulfuros y la liberación por consecuencia de H₂S a la atmósfera del drenaje. Sin embargo, estas condiciones pueden ser minimizadas, por la implementación de un programa regular de inspección y limpieza a drenajes. Las inspecciones pueden ser "in situ" o remotas, por ejemplo, con el uso de cámaras de televisión. Existen diferentes técnicas de limpieza de drenajes, las cuales incluyen métodos hidráulicos y sistemas mecánicos. La limpieza regular ha demostrado reducir temporalmente la tasa de generación de sulfuros, particularmente donde el depósito de sólidos orgánicos es un problema.

Puesto que la generación substancial de sulfuros puede ocurrir en un período de tiempo corto en algunas líneas de drenaje usadas para la igualación del flujo, las estaciones de bombeo de velocidad constante deberán ser operadas con ciclos de paro-arranque que sean bastante cortos para evitar excesiva acumulación de materia orgánica por los tiempos de retención.

El efecto de flujos lodosos en el drenaje, incluyendo aumento de la profundidad del flujo y prolongadas condiciones de descarga, pueden aumentar la producción de sulfuros debido a la menor posibilidad de re-aereación. Sin embargo, condiciones de descarga de corta duración causadas por infiltración/influjo son a menudo caracterizadas por nutrientes en agua residual y temperaturas mas bajas que pueden provocar la reducción de sulfuros debido a velocidades mayores, arrastre de sólidos acumulados y reducción de la actividad biológica.

1.2 Inyección de aire

La promoción del balance de oxígeno en los sistemas de recolección, puede ser realizada por la adición de aire dentro del flujo de agua residual. La adición de suficiente oxígeno disuelto (OD) puede prevenir o reducir significativamente y favorecer la oxidación bioquímica de sulfuros disueltos existentes.

Los métodos de adición de aire incluyen:

- I.- Inyección directa de aire comprimido dentro del ducto**
- II.- Uso de aspiradores Venturi en los ductos o estaciones elevadas**
- III.- Dilución con tubo –U- usando compresores de aire o aspiradores Venturi en líneas de gravedad**

1.2.1 Inyección de aire comprimido

Inyección directa de aire comprimido forzado dentro del drenaje ha sido practicada por algunas poblaciones en los Estados Unidos. El aumento de presión de aire en los ductos de drenaje permite la mayor disolución del oxígeno dentro de la corriente. A presión atmosférica y 21°C el agua disuelve aproximadamente 2% de aire por volumen; esto aumenta 4% a 103 KPa (15 psig) y 6% a 207 KPa (30 Psig).

Las tasas de inyección de aire requeridas varían en función de las características del agua residual (tasa de oxígeno considerada), el tiempo de retención en el drenaje, la temperatura y presión del sistema, el perfil hidráulico del drenaje, y el grado deseado de control de sulfuros.

La práctica sugiere suministrar aire a razón de 0.75 a 2.25 m³/m³ de agua residual o proporcionar un flujo de aire de 0.7 a 1.3 m³/hr/cm de diámetro de tubería. La caracterización total del agua residual y la formación de las características hidráulicas de la tubería son necesarias antes de que los requerimientos de aire puedan ser exactamente estimados.

1.2.2 Aspiradores Venturi

Los aspiradores tipo Venturi han sido usados para el control de sulfuros en drenaje y estaciones elevadas. Un aspirador Venturi opera bajo el principio de un líquido que fluye a alta velocidad a través de una boquilla de diámetro decreciente la cual crea una presión negativa en la carga del lado de la restricción. Una abertura a la atmósfera en este punto permite la entrada de aire dentro del dispositivo. La turbulencia en la descarga proporciona un mezclado profundo del aire y del agua.

1.2.3 Tubo U de aireación

En este sistema el oxígeno existente en el aire es introducido en la cima de la rama descendente, el cual se mezcla con el aire del drenaje durante el flujo descendente en una sección expandida de tubería. Esto permite reducir la velocidad y aumentar el tiempo de residencia para promover la transferencia de oxígeno bajo condiciones de aumento de la presión hidrostática. El agua residual enriquecida de oxígeno continúa entonces a través de la rama ascendente de diámetro reducido para incrementar la velocidad y prevenir el depósito de sólidos.

2. Adición química

Sí la prevención de la generación de olores no es factible o los costos efectivos son altos usando las diferentes técnicas anteriormente discutidas, entonces, los gases dentro de un espacio confinado pueden ser removidos y tratados antes de que sean enviados a la atmósfera circundante. En tal caso se pueden usar lavadores húmedos, carbón activado u otros absorbentes o procesos de absorción, para remover los compuestos olorosos del aire. A continuación se describen dichos procesos de control de olores.

2.1 Lavadores húmedos

El proceso de lavado húmedo involucra el contacto de un gas con un líquido de lavado típicamente en contracorriente o en flujo cruzado, para permitir la transferencia de las sustancias contaminantes de la corriente gaseosa al líquido del lavado por uno o más de los siguientes mecanismos.

- Ø Condensación de vapores
- Ø Remoción de partículas
- Ø Absorción de compuestos dentro de la solución lavadora
- Ø Reacción de compuestos con una solución lavadora oxidante
- Ø Emulsión de gases en un reactivo químico

El proceso de lavado húmedo es idealmente aceptable para el tratamiento de grandes flujos de aire mayores a 1 m³/s, contaminados con compuestos de bajo umbral de olor tales como mercaptanos y H₂S a niveles mayores que 100 unidades de olor por litro.

El diseño del lavador puede ser orientado verticalmente del tipo a contracorriente, u horizontalmente del tipo flujo cruzado. El típico sistema contracorriente emplea boquillas aspersoras para la inyección de la solución de lavado y un material inerte como empaque que proporciona la superficie de contacto gas/líquido. La corriente gaseosa entra por el fondo de la unidad de lavado distribuyéndose tan uniforme como es posible y pasa a través del material de empaque, el cual es irrigado con líquido de lavado. Entonces, la corriente gaseosa pasa a través del eliminador de niebla para remover cualquier gota del líquido, y se envía a la atmósfera por medio del ventilador. También existen lavadores húmedos con sistemas que generan nieblas muy finas de la solución lavadora para alcanzar una amplia superficie de contacto gas-líquido con lo cual se elimina la necesidad de empaque. Estos equipos, a menudo se identifican como cámaras de aspersión.

La selección del equipo de lavado depende principalmente de los compuestos específicos a ser removidos. El agua solubiliza gases tales como el H₂S, amoníaco y gases orgánicos sulfurosos; compuestos orgánicos nitrogenados tales como aminas; ácidos orgánicos, y también compuestos clorados pueden ser removidos por lavado con agua. Sin embargo, en

la práctica es común, utilizar un reactivo como cloro, permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno u ozono, en el líquido de lavado para obtener una reacción química con los compuestos presentes en el aire contaminado. En algunos casos, se usan soluciones ácidas o alcalinas para neutralizar compuestos olorosos o para ajustar el pH y mejorar el rendimiento cuando se usa en combinación con otro aditivo. También se han desarrollado soluciones lavadoras apropiadas para remover altas concentraciones de compuestos olorosos específicos tales como el H_2S .

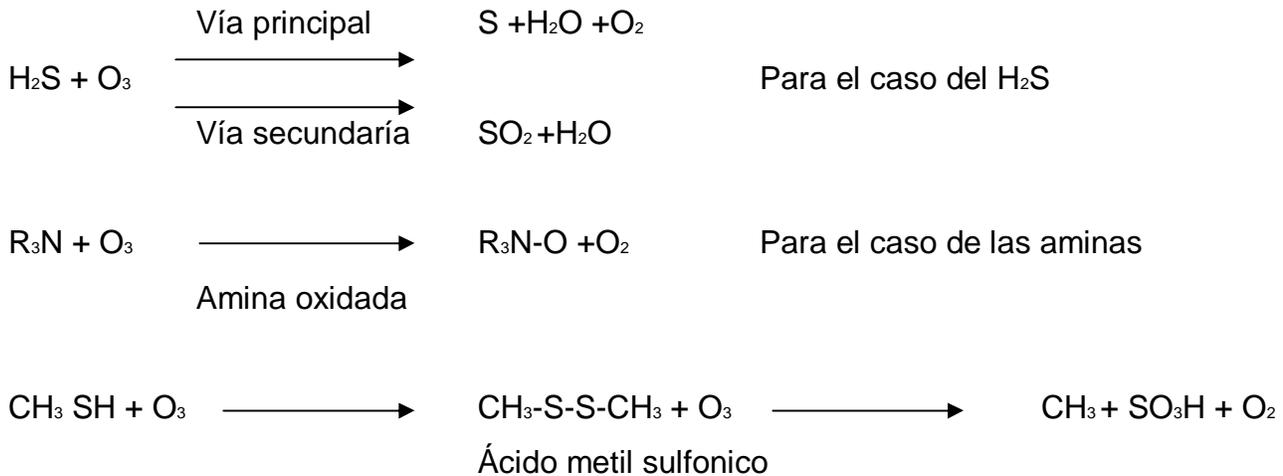
Existen lavadores húmedos con sistemas que generan una solución diluida de hipoclorito de sodio en el sitio para usarse como líquido de lavado. Los lavadores húmedos pueden emplear un sólo paso del líquido de lavado sin recirculación, como en el caso de los sistemas con agua o, más comúnmente, pueden recolectar y recircular el líquido de lavado para reducir los costos por aditivos químicos. Los sistemas lavadores, pueden emplear unidades de una sola etapa o varias unidades para etapas múltiples, dependiendo de la naturaleza y severidad del olor y, pueden utilizar diferentes soluciones lavadoras en cada etapa. Los tiempos de reacción en lavadores húmedos pueden variar desde algunos segundos hasta 1 minuto.

Los líquidos oxidantes para lavado, más comúnmente usados son soluciones cloradas (particularmente hipoclorito de sodio) y de permanganato de potasio. Los lavadores con hipoclorito de sodio removerán gases oxidables cuando las concentraciones de otros gases sean mínimas. En ocasiones pueden emplearse sistemas de lavadores multietapas para el control de gases. El número de etapas y la selección de líquidos lavadores dependen de las características e intensidad del olor y la efectividad de los aditivos químicos particulares añadidos en el agua de lavado.

2.2 Ozono

El ozono es un poderoso oxidante, el cual se ha utilizado en el control de gases, particularmente en aplicaciones industriales.

El principio del tratamiento con ozono de gases olorosos se basa en dar el tiempo suficiente para que se lleve a cabo el contacto de los contaminantes con el ozono, para oxidar numerosos compuestos que causan olor. A continuación se dan algunos ejemplos de reacciones del ozono en aplicaciones de control de olores.



Esta última ecuación para el caso de los metil mercaptanos

El ozono es un gas muy inestable que requiere ser generado en el sitio del tratamiento y para sistemas que requieren más de 0.9 kg (21lb)/día de ozono, este es generado empleando el principio de corona de descarga. Esto implica hacer circular un gas tal como el oxígeno o aire previo tratamiento a través de una descarga circular cruzada de alto voltaje. El gas resultante contiene ozono en concentraciones relativamente bajas (de 1 a 2% en peso). Actualmente se dispone de generadores de ozono que emplean este principio.

Por economía, en la operación de un generador de ozono, el calor debe ser eficientemente eliminado del sistema y el gas alimentado debe estar limpio, frío y seco. El ozono se descompone más fácilmente a altas temperaturas, por lo que requiere sistemas de enfriamiento a base de aire o agua. El agua y las impurezas presentes en el gas de entrada al generador pueden causar la producción de agentes incrustantes los cuales cubren los dieléctricos, provocando menor producción de ozono y mayor consumo de energía. La humedad en el gas de alimentación, también puede causar la formación de ácido nítrico en la corona, el cual es corrosivo, y puede disminuir la eficiencia y aumentar el mantenimiento del equipo.

El equipo que procesa el aire ambiental, incluye compresores, intercambiadores de calor, y varias unidades de filtrado.

Un sistema típico de filtración de aire puede incluir un filtro acondicionador, un filtro de 50 micrones para el compresor de salida, un filtro de 5 micrones y un filtro de nivel molecular de 4 Ångstrom. El tamiz molecular es usado para eliminar el vapor de agua, monóxido de carbono, bióxido de carbono nitrógeno, metano y ácido sulfhídrico. El aire acondicionado es suministrado al generador de ozono bajo condiciones de sequedad y temperatura de congelación de -5°C (-60°F). Alternativamente, se puede utilizar oxígeno puro como gas de alimentación, evitando la necesidad de pretratamiento.

La corriente de gas resultante, que contiene de 1 a 2 % peso de ozono, es introducida a una cámara de contacto con baffles para permitir el mezclado en contacto con el aire a deodorizado. El movimiento de aire oloroso a través de la cámara de contacto se efectúa por medio de ventiladores. El tiempo de contacto puede variar de 3 a 60 segundos, aunque generalmente se recomienda un tiempo mínimo de aire de 15 segundos.

2.3 Adsorción con carbón activado

La adsorción con carbón activado es un método comúnmente usado para el tratamiento de aire con olores desagradables. Se ha utilizado en plantas de tratamiento de agua residual como un sistema de control de olores primario y como una etapa de pulimento después de otras alternativas tales como lavadores. La adsorción es un fenómeno químico mediante el cual las moléculas se adhieren químicamente o adsorben a la superficie con la que entran en contacto. El carbón activado tiene una alta relación de superficie-volumen; por lo tanto tiene una gran área superficial disponible para la adsorción en un volumen relativamente pequeño. Las características físicas del carbón activado se muestran en la tabla 5;

TABLA 5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CARBÓN ACTIVADO PARA EL CONTROL DE OLORES

PARÁMETRO		VALOR
ÁREA SUPERFICIAL	m ² /g	950
ÁREA SUPERFICIAL	m ² /cm ³	380-600
VOLUMEN DE PORO	cm ³ /g	0.6-1.0
VOLUMEN DE PORO	cm ³ /cm ³	0.24-0.25
DIÁMETRO MEDIO DE PORO	angstroms	15-20

Debido a las características no-polares de la superficie, el carbón activado adsorbe compuestos orgánicos y algunos inorgánicos, antes que el vapor de agua. La cantidad de materiales adsorbidos dependen principalmente de las características fisicoquímicas de las sustancias. En general, los compuestos orgánicos con un peso moléculas mayor a 45 y punto de ebullición superior a 0°C son fácilmente adsorbidos.

La adsorción de compuestos orgánicos es relativamente no selectiva, por lo que no está fuertemente afectada por la solubilidad o clase química del compuesto.

Bajo condiciones normales la capacidad de adsorción del carbón activado puede alcanzar del 5 al 40 % de su peso.

La cantidad de material que puede ser adsorbido en un lecho de carbón activado depende de los siguientes factores:

- 1.-La concentración de los compuestos en el espacio circundante al carbón activado
- 2.-Área superficial total del carbón activado
- 3.-Volumen total de poro
- 4.-Temperatura
- 5.-Presencia de otros contaminantes competitivos
- 6.-Características de los compuestos a ser adsorbidos (peso molecular, punto de ebullición, polaridad, tamaño y forma)
- 7.-Polaridad del carbón activado
- 8.-Humedad relativa de la corriente gaseosa
- 9.-Tiempo de contacto de la corriente gaseosa con el lecho de carbón activado

La capacidad máxima de adsorción está favorecida por una alta concentración del compuesto alrededor del carbón activado, áreas superficiales grandes, ausencia de contaminantes competitivos, baja temperatura y agregación de contaminantes en moléculas grandes que se fijen y permanezcan firmemente atadas a los sitios de restricción en el adsorbente.

La no selectividad del carbón activado puede ser una ventaja debido a su capacidad para remover mezclas complejas de compuestos olorosos. Sin embargo, puede ser una desventaja, ya que la capacidad de adsorción del carbón activado puede ser prematuramente agotada por la adsorción de otros contaminantes no olorosos.

3) PROCESOS DE ADSORCIÓN ALTERNATIVOS

Existen otros medios de adsorción usados para el control de olores, además del carbón activado. Dos ejemplos son la alúmina activada impregnada con permanganato de potasio y el aserrín mezclados con óxidos de hierro.

Estas alternativas se sugieren principalmente para pequeñas instalaciones con volúmenes relativamente bajos de aire mal oliente para el tratamiento requerido.

Existen algunos productos comercialmente disponibles, los cuales consisten de pelets secos de alúmina activada impregnada con permanganato de potasio. Los compuestos olorosos son adsorbidos dentro de la superficie del pelet y subsecuentemente son oxidados por el permanganato de potasio. Los diámetros comunes del pelet van de 3 a 9 mm (1/8 a 3/8 in), y contienen aproximadamente 5% en peso de $KMnO_4$. El aire contaminado pasa a través de un grueso lecho o de una serie de lechos delgados que contienen el medio, y que finalmente lo emiten hacia la atmósfera. Existen sistemas prefabricados que manejan hasta 280 m³/min de aire contaminado.

Los sistemas empacados para el control de olores que usan alúmina impregnada con KMnO_4 , son normalmente unidades de flujo vertical u horizontal, las cuales emplean un prefiltro y/o eliminador de niebla para retener las partículas sólidas y humedad, que consiste en una serie de lechos de 7.6 mm de espesor, los cuales contienen al medio adsorbente y un soplador. En algunos casos, se utiliza un filtro al final del sistema.

Los pelets de alúmina activa impregnada con KMnO_4 , tiene una capacidad limitada para remover compuestos olorosos. Cuando dicha capacidad se agota, este medio es desechado, ya que no puede ser regenerado. El tiempo de vida útil del medio depende de la masa total adsorbida del contaminante oloroso. Para el ácido sulfhídrico, se ha estimado que 1 kg de medio adsorbente deberá remover 0.076 kg de gas de ácido sulfhídrico antes de agotarse.

La combustión puede ser un medio efectivo de control de gases generadores de olores desagradables, puesto que ofrece la oxidación casi total de los compuestos olorosos.

Se recomienda emplear la combustión cuando los gases son tóxicos, cuando se tiene una baja concentración de combustible y cuando el calor de combustión de los gases no tiene valor de recuperación.

Los hidrocarburos son oxidados a CO_2 y agua, el nitrógeno y los compuestos sulfurosos son oxidados a óxidos de nitrógeno y azufre, respectivamente. Sin embargo, es importante que la combustión sea completa, ya que de otra manera, los productos intermedios formados pueden llegar a ocasionar impactos importantes.

Existen dos tipos de procesos de combustión empleados en aplicaciones de control de olores;

- Ø Oxidación con flama directa
- Ø Oxidación catalítica

En los procesos de combustión con flama directa, el gas se mezcla con aire de la combustión y expuesto a temperaturas de 480 a 815°C (900 a 1500°F) y velocidades de 4.6 a 9.1 m/s, con tiempos de residencia en la cámara de combustión de 0.25 a 0.6 segundos para dar

resultados satisfactorios. Aunque se han usado tiempos de residencia mayores. Los gases de entrada deben tener una capacidad calorífica de al menos de 3 700 Kj/m³ (100 BTU/ft³).

La capacidad calorífica puede ser estimada por la siguiente ecuación;

$$\text{BTU/lb} = (145.4)(C) + 620 (H) - (0.125)(O_2) + 41 (S)$$

Donde:

C, H, O₂, S = Porcentajes en peso de carbón, hidrógeno oxígeno y azufre, presentes en la corriente entrante.

Se pueden requerir pequeños volúmenes de combustible si los humos olorosos están por debajo del límite de inflamabilidad. La concentración de la mezcla humo-aire debe estar dentro de los límites inferior y superior de inflamabilidad.

En el proceso de oxidación catalítica, la presencia de un catalizador permite que la oxidación se realice a más baja temperatura y en la ausencia de flama. Aunque la reacción no se hace presente en la flama, un quemador precalienta los gases para alcanzar la temperatura requerida por la oxidación catalítica. En general, la temperatura de la corriente de gas antes del catalizador es de 315° a 480°C , 425° a 590°C después del catalizador.

El catalizador más comúnmente usado es de platino o paladio, finalmente dividido sobre una estructura de cerámica de níquel, cobre, cobre, cromo y manganeso. El mecanismo de la combustión catalítica se divide en tres etapas:

- 1) Adsorción sobre la superficie activa
- 2) Reacción química (oxidación) en la superficie
- 3) Desorción de los productos de reacción

La mayor limitante de la oxidación catalítica es que su uso se recomienda sólo en concentraciones mínimas de 1000 ppm en los gases. La mayoría de las aplicaciones de los sistemas de oxidación catalítica son la remoción de solventes y vapores orgánicos de procesos industriales.

Un factor limitante a considerar en los sistemas de combustión catalítica son los agentes de efecto adverso del catalizador, comúnmente definidos como potencial de reconocimiento o bloqueo del catalizador por causa de los contaminantes presentes en el medio. En la siguiente tabla se enlistan varios materiales que pueden provocar un pobre rendimiento del catalizador. Notar que los compuestos de azufre están incluidos como eliminadores de la catálisis, lo cual puede limitar la aplicación de los sistemas de oxidación catalítica para el control de olores en los sistemas de tratamiento de agua residual.

Las ventajas de la oxidación por flama directa sobre la combustión catalítica incluyen costos de mantenimiento más bajos, menores tiempos perdidos, y mejor control de olores. Un sistema catalítico puede requerir menos combustible pero tener un mayor requerimiento de energía total.

La selección de un sistema sobre otro dependerá de la aplicación específica y de las características del contaminante a ser tratado.

Otra alternativa existente, es el tratamiento biológico de gases residuales que consiste en convertir los contaminantes a otros compuestos a través de microorganismos. El tratamiento biológico del agua residual ha desarrollado este tipo de tecnología desde hace más de cien años.

Concretamente, el tratamiento de gases residuales por medio de microorganismos se conoce desde 1957 cuando R.O. Pomeroy registró la patente US- 2.793.096 "Deodoración de corrientes gaseosas por el uso de crecimiento microbiológico".

Existe una gran variedad de microorganismos, por tanto, prácticamente todas las clases de contaminantes orgánicos e inorgánicos pueden ser degradados o transformados a través de microorganismos. Existen especies particularmente adecuadas para la conversión de un tipo especial de contaminante.

Más aún, la evolución biológica dará soporte a la adaptación de los microorganismos a los contaminantes.

Los contaminantes más importantes de interés para la conversión biológica son los compuestos orgánicos, los cuales producen materia celular, bióxido de carbono y agua. Este proceso de conversión es de suma importancia técnica sólo cuando se realiza en solución acuosa. Por tanto, el tratamiento biológico de gases residuales consiste de las siguientes etapas:

- 1.- Transferencia de los contaminantes orgánicos de la fase gas a la fase líquida
- 2.- Tratamiento microbiológico del agua utilizada

En fase acuosa, la transferencia de contaminantes orgánicos gaseosos a un líquido es realizada por absorción.

En la actualidad, el tratamiento biológico de gases residuales va teniendo rápidamente más importancia debido a que puede ser realizado con equipo técnico relativamente simple. El tratamiento no-biológico por procesos convencionales de absorción y adsorción puede ser más complicado, debido principalmente a la regeneración necesaria del líquido y/o sólido. Este proceso de regeneración puede ser realizado por microorganismos. El tratamiento biológico de gases residuales requiere de equipo técnico menos complicado que en los otros procesos convencionales y por tanto, resulta menos costoso.

Una de las ventajas del tratamiento biológico de gases residuales, es que la recuperación de contaminantes queda excluida, ya que el tratamiento implica la transformación de los compuestos. Por tanto, la conversión biológica está restringida a casos donde exista muy baja concentración de contaminantes, especialmente compuestos olorosos. De hecho, el tratamiento microbiológico de gases residuales ha tenido una amplia aplicación en la degradación de sustancias olorosas.

Una vez analizados los procesos disponibles para la eliminación de los olores producidos por el ácido sulfhídrico en las lumbreras del drenaje profundo, se procede a la selección de la alternativa más viable de aplicación.

CAPÍTULO VI

SELECCIÓN DE UNA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO A NIVEL PILOTO PARA LA MITIGACIÓN DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO

El crecimiento de la población en el Distrito Federal ha originado que las autoridades competentes desarrollen programas para mejorar los servicios que ofrecen a la comunidad como son; luz, seguridad, transporte, agua potable y drenaje, entre otros.

En algunos casos el incrementar o acondicionar los ya existentes trae como consecuencia algunos efectos negativos que posteriormente se acentúan y exigen su pronta solución.

A últimas fechas se han presentado con mayor frecuencia quejas por malos olores provenientes de las lumbreras del drenaje profundo, causando por ello, molestias a los habitantes de las áreas circunvecinas, por lo que su atención debe ser inmediata.

Por esta razón, se plantea la necesidad de diseñar algún dispositivo que reduzca dichas emisiones y mitigue las molestias provocadas, debiendo presentar por tal motivo las siguientes características:

- Ø Eliminar y/o de ser posible neutralizar considerablemente el ácido sulfhídrico
- Ø Ser eficiente, de fácil manejo y bajo costo de inversión y operación
- Ø Ser ligero, de instalación rápida y estructuralmente compatible con la instalación existente

El control de estas emisiones gaseosas puede llevarse a cabo de dos maneras:

- 1) Previniendo la formación del ácido sulfhídrico en las aguas residuales que conducen los Sistemas de Drenaje**
- 2) Eliminando el ácido sulfhídrico ya formado en las emisiones gaseosas que se presentan en las lumbreras**

Cabe señalar que se ha seleccionado al ácido sulfhídrico (H_2S) como el contaminante más representativo de todos los posibles gases con características de mal olor, que se generan en los Sistemas de Drenaje Profundo y se emiten a la atmósfera. Por lo tanto, la alternativa de control seleccionada esta dirigida exclusivamente a este gas.

Actualmente el control de las emisiones de ácido sulfhídrico por parte del Sistema, se hace de dos formas que son:

- Ø A través de chimeneas ubicadas a un costado de la salida de la lumbrera, con alturas de 15 m. o más dependiendo de la zona donde este ubicada la lumbrera y de las construcciones circunvecinas.
- Ø De “camas” de carbón activado, con espesores variables de hasta 50 cm., las cuales cubren las áreas que no pueden ser tapadas con lozas de concreto (precolados o marimbas), siendo específicamente las compuertas, registros (entrada hombre) y en la parte bajas del interior de chimeneas, así como en las compuertas de control de flujos en las captaciones cuando la construcción lo permite.

Analizando estos mecanismos de control se tiene lo siguiente:

En lo referente a la chimenea, únicamente transporta los olores al ambiente en donde se pretende efectuar la dilución de los mismos con las corrientes de aire, situación que en algunas épocas del año no se lleva acabo por falta de vientos, por tanto este sistema de control no es suficiente ni efectivo ya que solo translada la contaminación a otro sitio, alterando el equilibrio ecológico por el incremento de sulfuros y otro contaminantes que en el presente trabajo no se contemplan.

Como una alternativa de mayor eficiencia, se utiliza carbón activado impregnado de hidróxido de potasio, que inicialmente da buenos resultados ya que disminuye considerablemente la concentración de ácido sulfhídrico cuando se coloca por vez primera, sin embargo a través del tiempo y por las grandes cantidades de emisión de ácido sulfhídrico de hasta 1017.72 l/min. (Ejemplo descrito en el Capítulo VIII página 68), alcanza su saturación en corto tiempo, el cual no se ha calculado porque no se ha destinado el personal ni el recurso necesario para tal fin, esta saturación se manifiesta por el color blanquecino que presenta el carbón y porque los olores generados en la lumbrera empiezan a presentarse en las instalaciones, además de que se ha determinado mediante los monitoreos que la “cama” de carbón activado una ves saturado funciona como “tapón” desplazando los gases a otras salidas.

ALTERNATIVA SELECCIONADA

Por lo antes mencionado y no existiendo hasta el momento el estudio de otras alternativas y considerando que no se tiene el presupuesto asignado para desarrollar algún tratamiento específico para la mitigación del ácido sulfhídrico, se plantea utilizar:

- Ø El proceso de absorción
- Ø El uso de agua residual tratada como principal sistema de lavado

Tomando como base que el proceso de absorción es sencillo y no requiere en este caso de condiciones físicas que generen gastos adicionales y porque se tiene la cantidad de agua residual tratada necesaria ya que es un recurso que maneja y controla el Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

La unidad Departamental de Atención a Emergencias por Agentes químicos, esta integrada por las Oficinas de Emergencias Hidráulicas y el Laboratorio de Ingeniería Experimental, lo que facilita el trabajo para la ejecución de las pruebas a nivel piloto ya que se utilizaron las instalaciones de esta última.

Una vez revisados los procesos existentes y seleccionado el que esta disponible para el control de las emisiones de H_2S , es importante evaluar la normatividad y la legislación laboral que determinan los valores a los cuales se tiene que disminuir la concentración de este ácido, para que no altere el medio laboral o ponga en riesgo la salud del personal que esta en contacto directo con este gas.

CAPÍTULO VII

LEGISLACIÓN LABORAL Y NORMATIVIDAD

El H₂S es un gas tóxico agudo y ha sido responsable de severos problemas de salud en muchos trabajadores de los sistemas de drenaje. El H₂S es más pesado que el aire, por lo tanto puede acumularse en el fondo de las alcantarillas. La toxicidad de este gas ha sido comparada con la del ácido cianhídrico, es incoloro y tiene olor característico a huevo podrido a bajas concentraciones. Pero a medida que los niveles se incrementan, pasa inadvertido por el olfato de los trabajadores, razón por la cual no se considera válida la relación de peligrosidad en función del olor percibido. Si la concentración es suficientemente alta, la inconsciencia llega súbitamente, seguida de la muerte si no existe un auxilio oportuno.

La concentración del ácido sulfhídrico en las áreas de trabajo esta regulada por la Secretaria del Trabajo y Previsión Social, a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-1999, relativa a las Condiciones de Seguridad e Higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el ambiente laboral, su número CAS (iniciales del nombre en ingles del servicio de información de sustancias químicas de los Estados Unidos de América) es 7783-06-4, el límite máximo permisible de exposición promedio ponderado en tiempo (LMPE-PPT), que se refiere a la concentración promedio ponderada en tiempo de un contaminante del medio ambiente laboral para una jornada de ocho horas diarias y una semana laboral de cuarenta horas, a la cual se pueden exponer la mayoría de los trabajadores sin sufrir daños a su salud, es de 10 ppm o 14 mg/m³, y el límite máximo permisible de exposición de corto tiempo (LMPE-CT), que es la concentración máxima del contaminante del medio ambiente laboral, a la cual los trabajadores pueden estar expuestos de manera continua durante un periodo máximo de quince minutos, con intervalos de al menos una hora de no exposición entre cada periodo de exposición y un máximo de cuatro exposiciones en una jornada de trabajo y que no sobrepase el LMPE-PPT, con un valor de 15 ppm o 21 mg/m³, este valor corresponde también al límite máximo permisible de exposición pico (P), que se define como la concentración del medio ambiente laboral, que no debe rebasarse en ningún momento durante la exposición del trabajador

Estas condiciones se generan debido a las propiedades generales del ácido sulfhídrico, las cuales se describen a continuación.

CAPÍTULO VIII

PROPIEDADES GENERALES DEL ÁCIDO
SULFHÍDRICO

A continuación se manifiestan las características generales del ácido sulfhídrico, en donde se pueden observar las propiedades químicas, efectos fisiológicos y sitios probables de máxima concentración de dicho gas.

Nombre: Ácido Sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno

Formula química: H₂S

Propiedades Generales:

- ✓ Compuestos volátil, tóxico e irritable
- ✓ Olor a huevo podrido a muy bajas concentraciones (0.4 ppb)
- ✓ La exposición durante 1.5-2 minutos a 0.01% daña la sensibilidad olfativa
- ✓ El olor no es evidencia de altas concentraciones
- ✓ Incoloro
- ✓ Inflamable

Gravedad Específica: (comparada con el aire = 1.0) es de 1.19

Efectos Fisiológicos:

- ✓ Empeora rápidamente el olfato a medida que la concentración aumenta
- ✓ Muerte en pocos minutos a 0.2%
- ✓ La exposición entre 0.17% y 0.1% causa envenenamiento agudo
- ✓ Paraliza el sistema respiratorio

Exposición Máxima de Seguridad: Quince minutos, con intervalos de al menos una hora de no exposición entre cada periodo de exposición y un máximo de cuatro exposiciones en una jornada de trabajo y que no sobrepase el LMPE-PPT, con un valor de 15 ppm o 21 mg/m³.

Límites de explosividad: El H₂S, además de ser tóxico, es un gas explosivo, sus límites de explosividad son los siguientes;

- Ø Inferior: 4.3% volumen aire
- Ø Superior: 45.0% volumen aire

Localización de altas concentraciones:

- Ø Cerca del fondo de espacios confinados, puede ser mayor si el aire está caliente y con alta humedad.
- Ø Áreas de turbulencia en sistemas de recolección.
- Ø En fondo de alcantarillas.

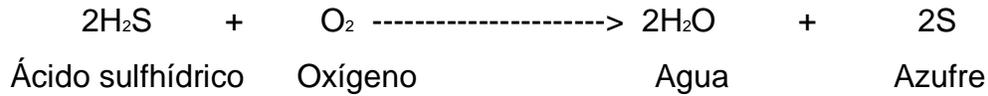
Toxicidad: Los efectos fisiológicos del H₂S son resumidos en la tabla 6;

Origen: Este ácido se produce en algunos manantiales a los que se les atribuye propiedades curativas (aguas sulfurosas o sulfhídricas), también, se produce por descomposición de materia orgánica. Así mismo, se presenta en las fumarolas volcánicas, en el gas de los pantanos y en los gases de petróleo.

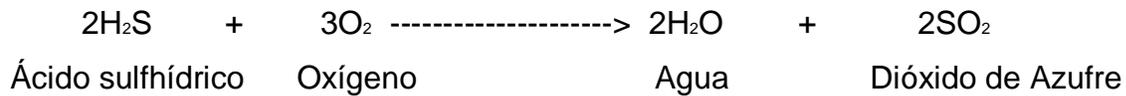
Propiedades físicas: Es un gas incoloro de olor desagradable. Es bastante soluble en agua (cuatro volúmenes de ácido sulfhídrico por un volumen de agua). Se puede licuar a 12 °C, bajo una presión de 15 atmósferas. Su punto de solidificación es de -85,6 °C y de ebullición de -60.7°C a presión atmosférica. Su peso molecular es de 34 g-mol.

Propiedades químicas: Este gas, en concentraciones relativamente altas, es venenoso, aunque menos que otros gases, como el CO y HCN. Si se inhalan pequeñas cantidades, produce dolor de cabeza y a grandes cantidades producen la muerte.

En solución acuosa constituye propiamente el ácido sulfhídrico, de reacción débil. El nombre correcto del gas es sulfuro de hidrógeno, es combustible en presencia del oxígeno, ardiendo con llama de luz, cuando la combustión es incompleta se produce Azufre y agua.



Cuando la combustión es completa, en exceso de oxígeno, se forma dióxido de azufre



Es posible descomponerlo térmicamente a 400°C y se empieza a disociar en H₂ y S, siendo a 1200°C la descomposición completa.

Dada su naturaleza ácida, reacciona con bases, dando sales por ejemplo:



Con los metales se combina a temperaturas bajas y elevadas: así, la plata que se utiliza en artículos del hogar, cubre de una capa delgada de sulfuro de plata, debido a la combinación del H₂S del aire con el metal.

TABLA 6. EFECTOS FISIOLÓGICOS DEL ÁCIDO SULFÚRICO

MANIFESTACIÓN	CONCENTRACIÓN (ppm)
UMBRAL DE OLOR	0.1-3.0
OLOR OFENSIVO (HUEVO PODRIDO)	3-10
DOLOR DE CABEZA, NAUSEAS, IRRITACIÓN OCULAR Y TRACTO	10-50
SERIO DAÑO OCULAR	50-100
CONJUNTIVITIS, IRRITACIÓN TRACTO RESPIRATORIA, PARÁLISIS OLFATORIA	100-300
EDEMA PULMONAR (AMENAZA PARA LA VIDA)	300-500
FUERTE ESTIMULACIÓN DEL SISTEMA NERVIOSO	500-1000
COLAPSO INMEDIATO, PARÁLISIS RESPIRATORIA (MUERTE)	1000-2000

Como se observa las concentraciones bajas del gas pueden causar serios daños a la salud. La muerte ha resultado a concentraciones de 300 ppm por volumen de aire. Tales concentraciones pueden ser obtenidas en una cámara cerrada con alta turbulencia, de aguas residuales que contengan 2 mg/l de sulfuros disueltos a un pH de 7.0.

Para poder ejemplificar la magnitud de este problema, se puede realizar un caculo del caudal de H₂S a la salida de la lumbrera 2 del interceptor centro-centro, en el periodo de observación y análisis, en época de calor y siendo las 13.00 hrs. del día y determinando con el equipo multianalizador de gases una concentración de 300 ppm de H₂S.

Datos:

Diámetro de la lumbrera = 6 m.

Velocidad de los gases de salida (v) = 2 m/s

El caudal de salida de los gases es (G) = velocidad por área

Concentración de H₂S = 300 pmm

Caudal de gas total;

$$G = (2 \text{ m/s}) (28.27 \text{ m}^2) = 56.54 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal de H}_2\text{S} &= (56.54 \text{ m}^3/\text{s}) (300 \text{ ml/m}^3) \\ &= 16962 \text{ ml/s} \\ &= 16.962 \text{ l/s} \\ &= \mathbf{1017.72 \text{ l/min}} \end{aligned}$$

A Temperatura y Presión normales

$$\begin{aligned} \text{Caudal de H}_2\text{S} &= (1017.72 \text{ l/min})(1 \text{ mol}/22.4 \text{ l})(34 \text{ g}/1 \text{ mol}) \\ &= \mathbf{1544.75 \text{ g/min}} \end{aligned}$$

Como se aprecia la cantidad de ácido sulfhídrico que se esta incorporando a la atmósfera es extremadamente grande, y se debe recordar que únicamente se esta considerando una sola lumbrera, este problema se refleja en varias de las lumbreras que integran la red de drenaje profundo, como se muestra en la página 29, siendo esta la preocupación y la razón por la cual se presenta continuación el planteamiento que permite mitigar las concentraciones de H₂S que se presentan en las lumbreras del drenaje profundo.

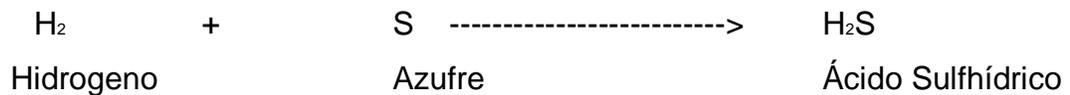
CAPÍTULO IX

PLANTEAMIENTO Y BASES DE
EXPERIMENTACIÓN

Considerando los parámetros de emisión escogidos para proponer una alternativa de control, donde se requiere manejar flujos altos (2 m³/s) y concentraciones altas de H₂S (500 ppm), se puede concluir que la alternativa más adecuada de las antes mencionadas es la comprendida por los lavadores de gas por absorción, por tal razón la experimentación esta orientada tomando en cuenta el fundamento de esta técnica.

OBTENCIÓN EN EL LABORATORIO:

1- El H₂S se puede obtener por síntesis directa, haciendo reaccionar hidrógeno con azufre caliente:



Por cuestiones de disponibilidad de reactivos y el uso de equipo disponible, se emplea para llevar acabo la experimentación el siguiente método de obtención;

2- En laboratorio se obtiene a partir de pirita o sulfuro ferroso (en especial cuando se necesita el ácido sulfhídrico para usarlo como reactivo químico), mediante una reacción con un ácido fuerte diluido.



Otras posibles reacciones

Características:

- | | | |
|----|---|---|
| 1- | $\text{H}_2\text{S} + \text{Fe} \text{-----}> \text{FeS} + \text{H}_2$ | Acelera la corrosión
Actúa como agente taponador
Es insoluble en agua |
| 2- | $\text{H}_2\text{S} + 2 \text{NaOH} \text{-----} > 2\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{S}$ | Acelera la corrosión |

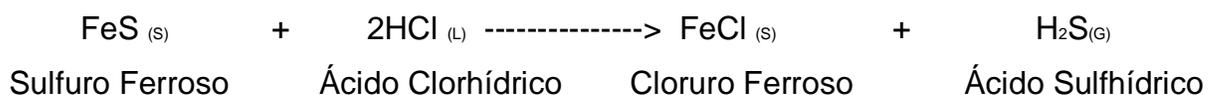
- 3- $\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{-----} > \text{H}_2\text{O} + \text{S}$ Agente taponador
Requiere calor para su formación
- 4- $\text{H}_2\text{S} + \text{Cl}_2 \text{-----} > 2\text{HCl} + \text{S}$ Corrosivo y taponador
- 5- $\text{H}_2\text{S} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \text{-----} > \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$ Se requiere calor para la reacción
- 6- $\text{SO}_4 + 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \text{-----} > 2\text{HCO}_3 + \text{H}_2\text{S}$ Se requiere de la acción de bacterias

BASES DE EXPERIMENTACIÓN

Una vez revisada la información técnica de soporte y seleccionando el método de control de las emisiones de ácido sulfhídrico generadas en las instalaciones del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, se establece el diseño del prototipo de experimentación que considera el proceso de control seleccionado, construyéndose posteriormente el prototipo en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Experimental del Sistema de aguas de la Ciudad de México.

En la presente etapa se efectuará la experimentación a nivel piloto bajo los siguientes lineamientos.

- 1) En todos los casos la generación de ácido sulfhídrico (H_2S) se realizó a partir de los reactivos analíticos de sulfuro ferroso (FeS) y ácido clorhídrico (HCl), de acuerdo a la siguiente reacción estequiométrica:



El gas resultante de la reacción se almacena en tanques de polietileno de 200 litros para su posterior alimentación a la torre de absorción.

2) El proceso de absorción en el laboratorio se llevó a cabo como sigue:

El caudal de alimentación de la corriente gaseosa se manejó a una escala de 1:2000 del caudal promedio registrado en la lumbrera 2 del interceptor centro-centro (0.57 m³/s), lo cual equivale a 0.285 l/s. Este caudal se reguló plenamente mediante el medidor de flujo de gases, el cual, está calibrado en litros por minuto.

3) Se determinó el caudal óptimo, efectuando las corridas necesarias para ajustar el caudal dentro del intervalo de trabajo. El caudal mínimo de trabajo fue determinado experimentalmente para el tipo de distribuidor utilizado.

4) A fin de determinar la eficiencia de remoción del proceso, se registró la concentración inicial de H₂S en ppm a la salida de la torre antes de suministrar el líquido de lavado. Después, se suministro la solución lavadora registrando tiempo y concentración de H₂S a la salida hasta notar que esta permanece constante en el censor del equipo de medición. Dicha concentración fue registrada como final.

5) El proceso de control de H₂S, seleccionado permite obtener eficiencias de remoción superiores al 90%, por lo que la expectativa esperada fue que la concentración del H₂S a la salida del proceso fuera cercana al límite de exposición laboral permitido de 10 ppm.

6) Para cada una de las tres alternativas de los líquidos de lavado o soluciones absorbedoras se realizaron las mismas condiciones de estabilidad y equilibrio.

Ø Agua residual tratada

Ø Hipoclorito de sodio al 2% en peso

Ø Hidróxido de sodio al 2% en peso

Una vez descritos los líquidos para el lavado de gas y sus condiciones de trabajo, se presenta el desarrollo experimental para cada uno de ellos.

CAPÍTULO X

DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA
ABSORCIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO CON
AGUA RESIDUAL TRATADA

En la primera fase de experimentación con el prototipo a nivel piloto se utilizó agua residual tratada como líquido de lavado, lo que permitió hacer los ajustes y adecuaciones necesarias para el buen funcionamiento del dispositivo experimental.

Es evidente que en este caso el agua sólo absorbe el H_2S de la corriente gaseosa en la torre de lavado y que en todo caso, es susceptible de liberarse nuevamente en el drenaje dependiendo de las condiciones de temperatura, presión y velocidad (turbulencia, reacción). No sucediendo esto en el caso de las soluciones oxidantes propuestas, donde la sustancia de la solución lavadora reacciona con el H_2S oxidándolo y eliminando por tanto el olor asociado.

A continuación se indican las corridas realizadas en la experimentación con agua residual tratada como líquido de lavado.

NÚMERO DE CORRIDA: 1

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.0416 l/s (mínimo)

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 1.4 m/sCAUDAL DE AIRE H₂S: 0.177 l/s

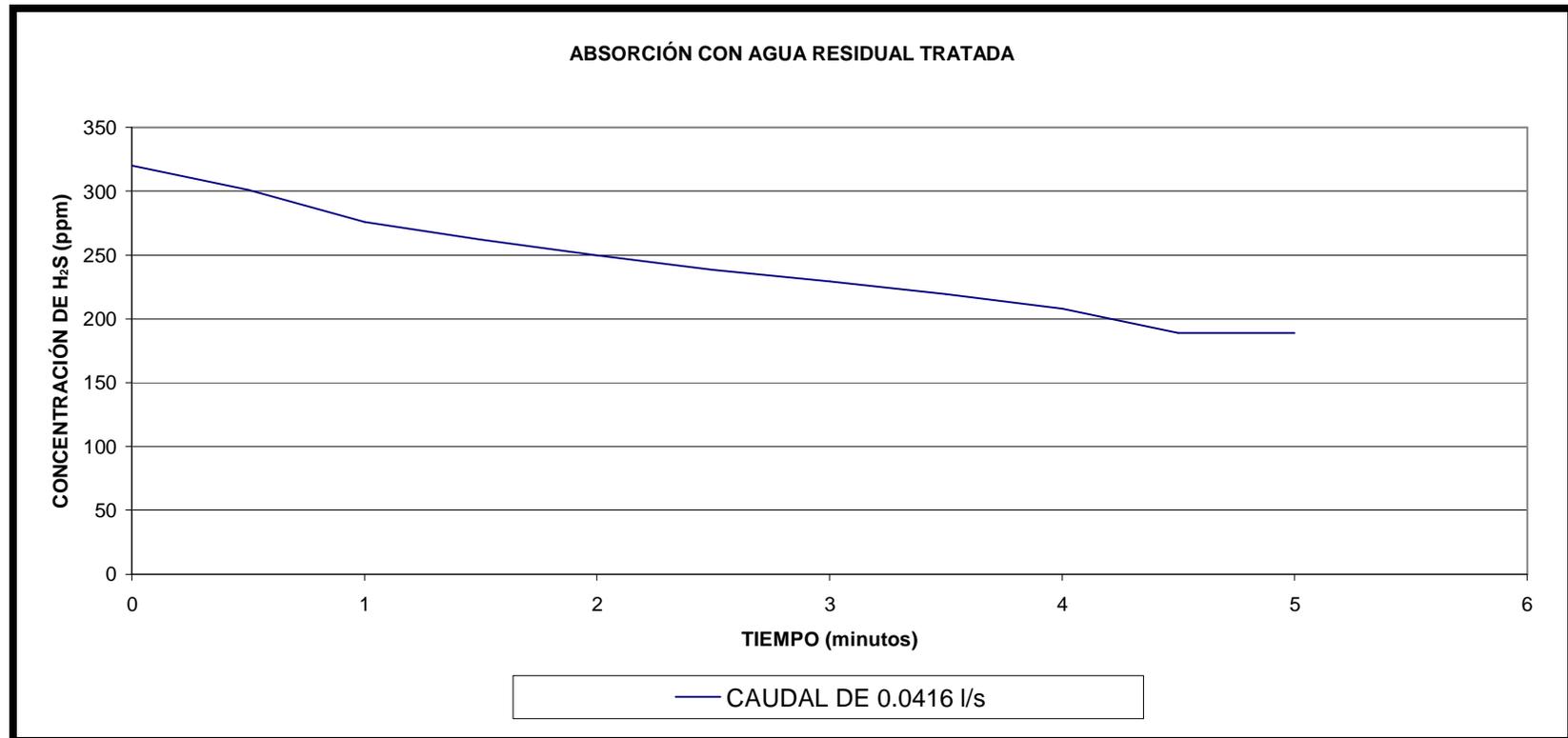
TIPO DE DISTRIBUIDOR: Regadera

TIEMPO (min)	CONCENTRACIÓN H₂S (ppm)
0.0	320 (Inicial)
0.5	301
1.0	276
1.5	262
2.0	250
2.5	238
3.0	229
3.5	219
4.0	208
4.5	189
5.0	189 (Final)

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S = 40.937%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO = 5 minutos****GASTO TOTAL DE AGUA = 12.48 litros**

NOTA: Después de suspender el suministro de agua, la concentración de H₂S a la salida de la torre tardó 3 minutos en alcanzar un nivel de 300 ppm, con lo cual se dio por finalizada la corrida.

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRAFICA DE COMPORTAMIENTO EN LA CORRIDA No 1

CONCLUSIÓN: La corrida se considera insatisfactoria porque la concentración final es muy alta respecto al límite de exposición laboral permitido.

NÚMERO DE CORRIDA: 2

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.391 l/s (medio)

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.2 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.278 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Regadera

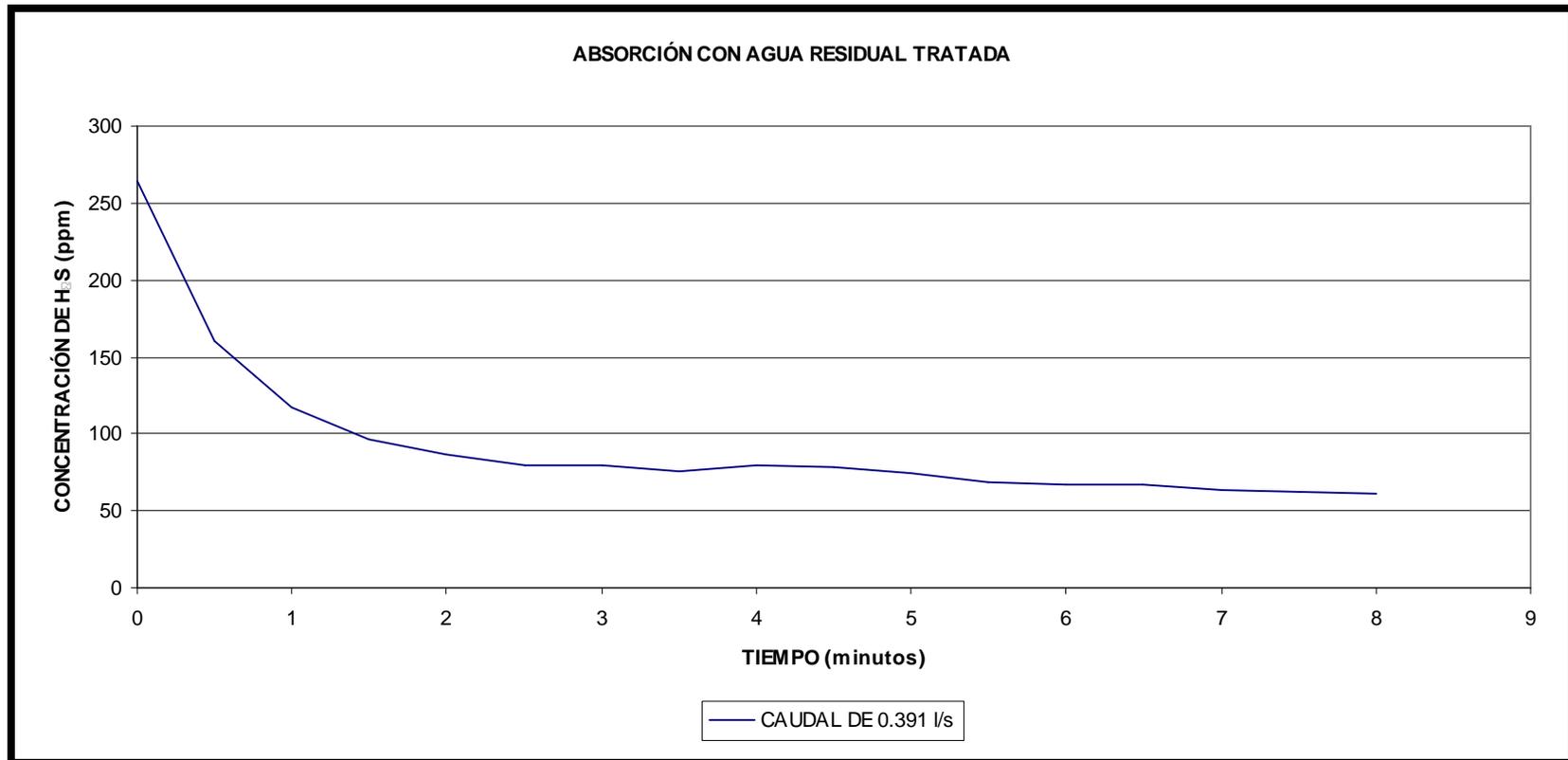
TIEMPO (min)	CONCENTRACIÓN H ₂ S (ppm)
0.0	265 (Inicial)
0.5	160
1.0	118
1.5	97
2.0	87
2.5	80
3.0	80
3.5	76
4.0	79
4.5	78
5.0	75
5.5	69
6.0	67
6.5	67
7.0	64
7.5	62
8.0	61 (Final)

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S = 76.981%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO = 8 minutos****GASTO TOTAL DE AGUA = 187.7 litros**

NOTA: La experimentación continuó durante dos minutos más sin obtener resultados satisfactorios por lo que únicamente se consideraron para objeto de análisis de esta prueba 8 minutos de operación.

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 2



CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria, porque se obtuvo un porcentaje de remoción alto. Aunque la concentración final de H₂S sigue siendo alta respecto del límite de exposición laboral.

NÚMERO DE CORRIDA: 3

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.5 l/s (máximo)

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.3 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.291 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Regadera

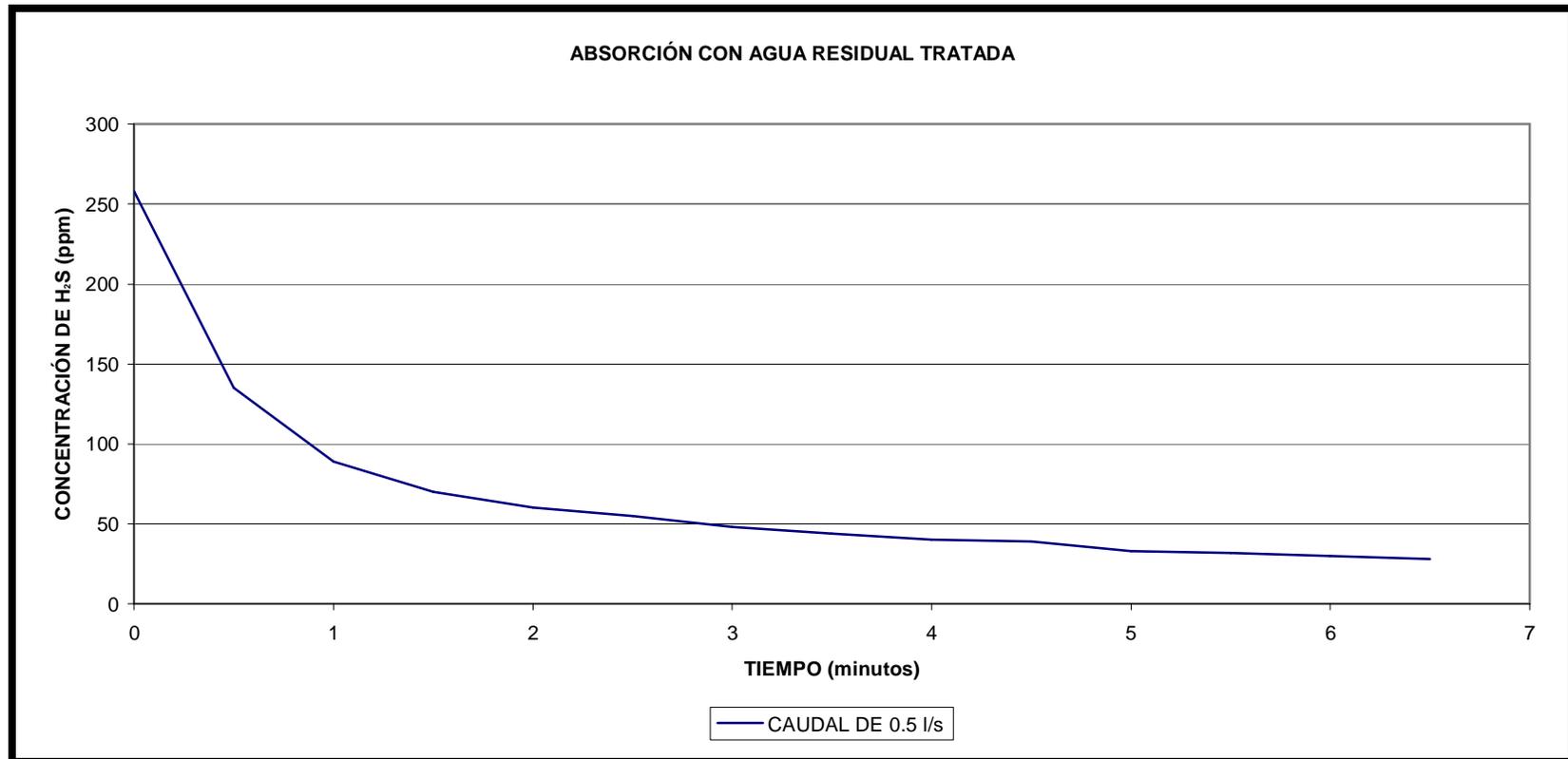
TIEMPO (min)	CONCENTRACIÓN H ₂ S (ppm)
0.0	258 (Inicial)
0.5	135
1.0	89
1.5	70
2.0	60
2.5	55
3.0	48
3.5	44
4.0	40
4.5	39
5.0	33
5.5	32
6.0	30
6.5	28 (Final)

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S = 89.147%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO = 6.5 minutos****GASTO TOTAL DE AGUA = 195 litros**

NOTA: En esta etapa del desarrollo experimental se incluyó una nueva variable, la cual permitió evaluar el tiempo necesario para que la concentración del H₂S a la salida del lavador fuera igual a la inicial registrada en el momento del arranque de la experimentación (tiempo de recuperación). Para lo cual se requirió que la mezcla gaseosa continuara siendo alimentada a la columna y que el suministro de la solución lavadora fuera suspendido.

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 3



CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria, porque se obtuvo un alto porcentaje de remoción y una concentración final de H₂S cercana al límite máximo permitido.

NÚMERO DE CORRIDA: 4

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.0446 l/s

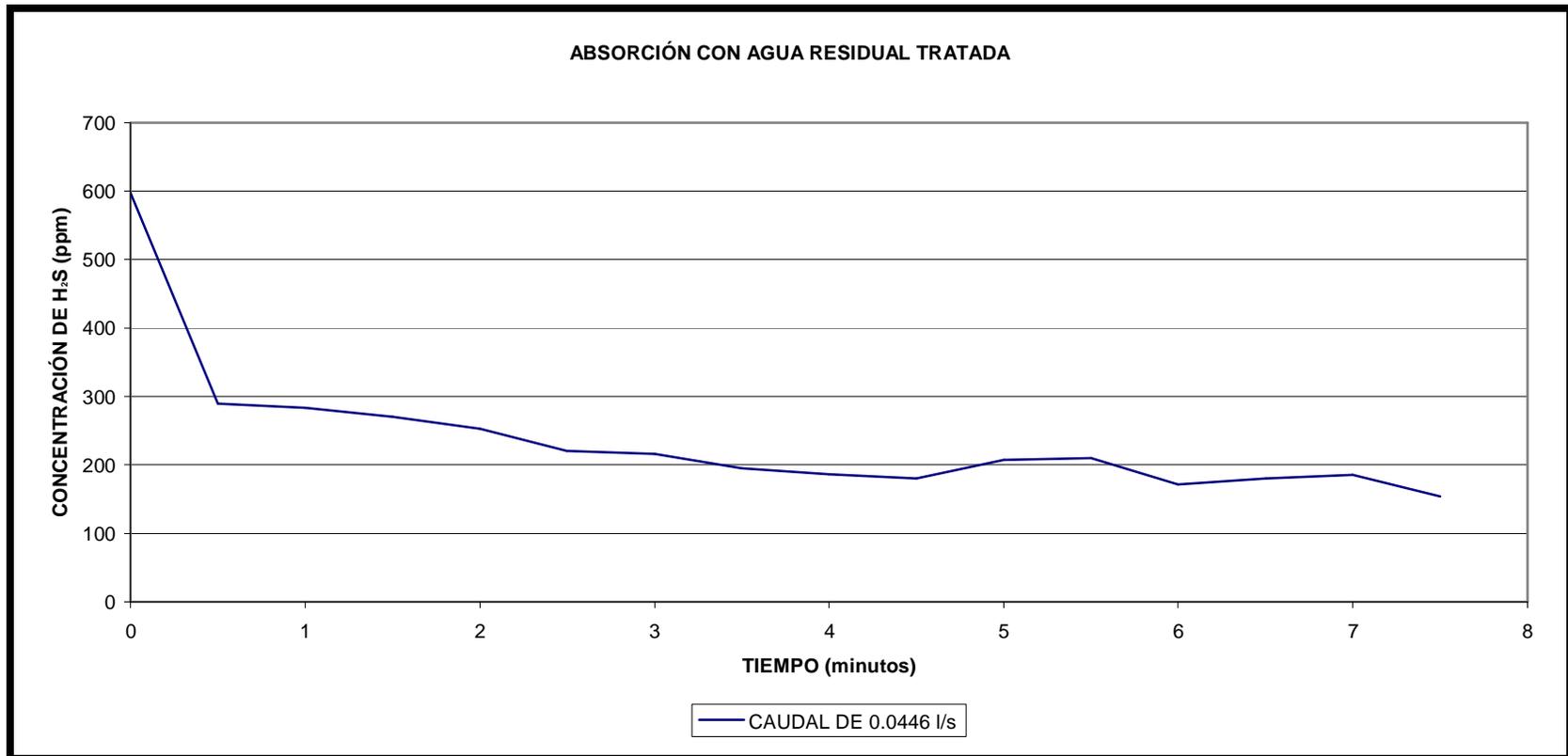
VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.2 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.278 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Regadera

TIEMPO (min)	CONCENTRACIÓN H₂S (ppm)
0.0	598 (Inicial)
0.5	289
1.0	283
1.5	270
2.0	253
2.5	220
3.0	216
3.5	195
4.0	186
4.5	180
5.0	207
5.5	210
6.0	171
6.5	180
7.0	185
7.5	154 (Final)
SUSPENSIÓN DE AGUA DE LAVADO	
8.0	180
8.5	200
9.0	225
9.5	260
10.0	285
10.5	330
11.0	370
11.5	415

RESULTADOS::**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S = 74.247%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO = 7.5 minutos****GASTO TOTAL DE AGUA = 20.09 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SALIDA = 5 minutos****La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;**

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 4



CONCLUSIÓN: Al disminuir el gasto de agua de lavado, se presentan problemas para la remoción final del H₂S. Por lo cual se infiere que una de las limitantes en este experimento es el flujo de la solución lavadora, siendo el caudal probado en esta corrida (0.0446 l/s), insuficiente para obtener resultados satisfactorios.

MERO DE CORRIDA: 5

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.061 l/s

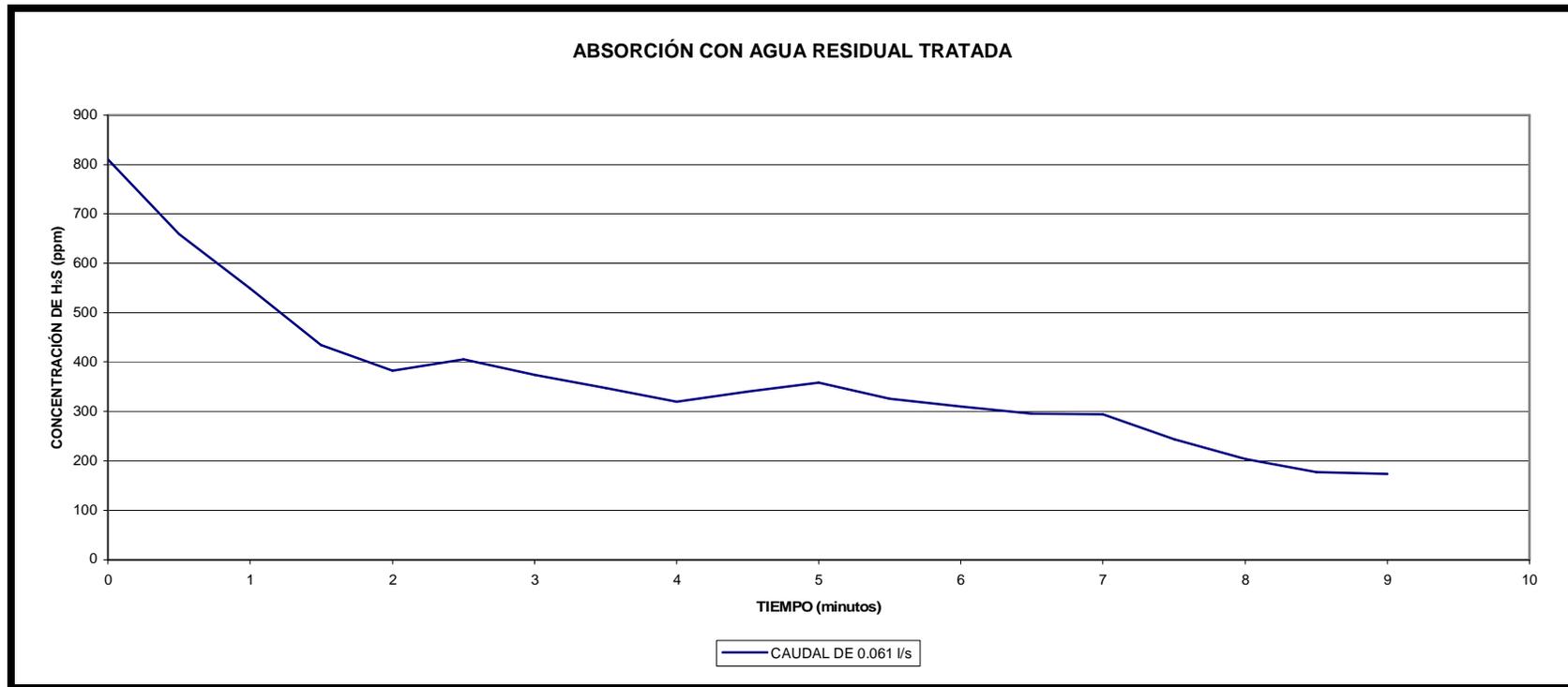
VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.5 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.317 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Regadera

TIEMPO (min)	CONCENTRACIÓN H₂S (ppm)
0.0	810 (Inicial)
0.5	659
1.0	550
1.5	435
2.0	382
2.5	405
3.0	374
3.5	348
4.0	320
4.5	340
5.0	358
5.5	326
6.0	310
6.5	296
7.0	294
7.5	244
8.0	204
8.5	178
9.0	174 (Final)
SUSPENSIÓN DE AGUA DE LAVADO	
9.5	185
10.0	210
10.5	230
11.0	257
11.5	380
12.0	500
12.5	650
13.0	780

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S = 78.518%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO = 9 minutos****GASTO TOTAL DE AGUA = 54.9 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SALIDA = 4 minutos****La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;**

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 5



CONCLUSIÓN: Aunque existe un buen porcentaje de remoción de H₂S, se presentan intervalos en los cuales la concentración aumenta durante el proceso de lavado. Este fenómeno hace suponer que la alimentación de ácido sulfhídrico en la torre no es constante, situación que se considera para la corrección en el control de alimentación.

Por otra parte se puede observar que la concentración a la salida de la columna tarda aproximadamente cuatro minutos en reestablecer las condiciones iniciales de operación después de suspender el suministro de agua de lavado.

NÚMERO DE CORRIDA: 6

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.061 l/s

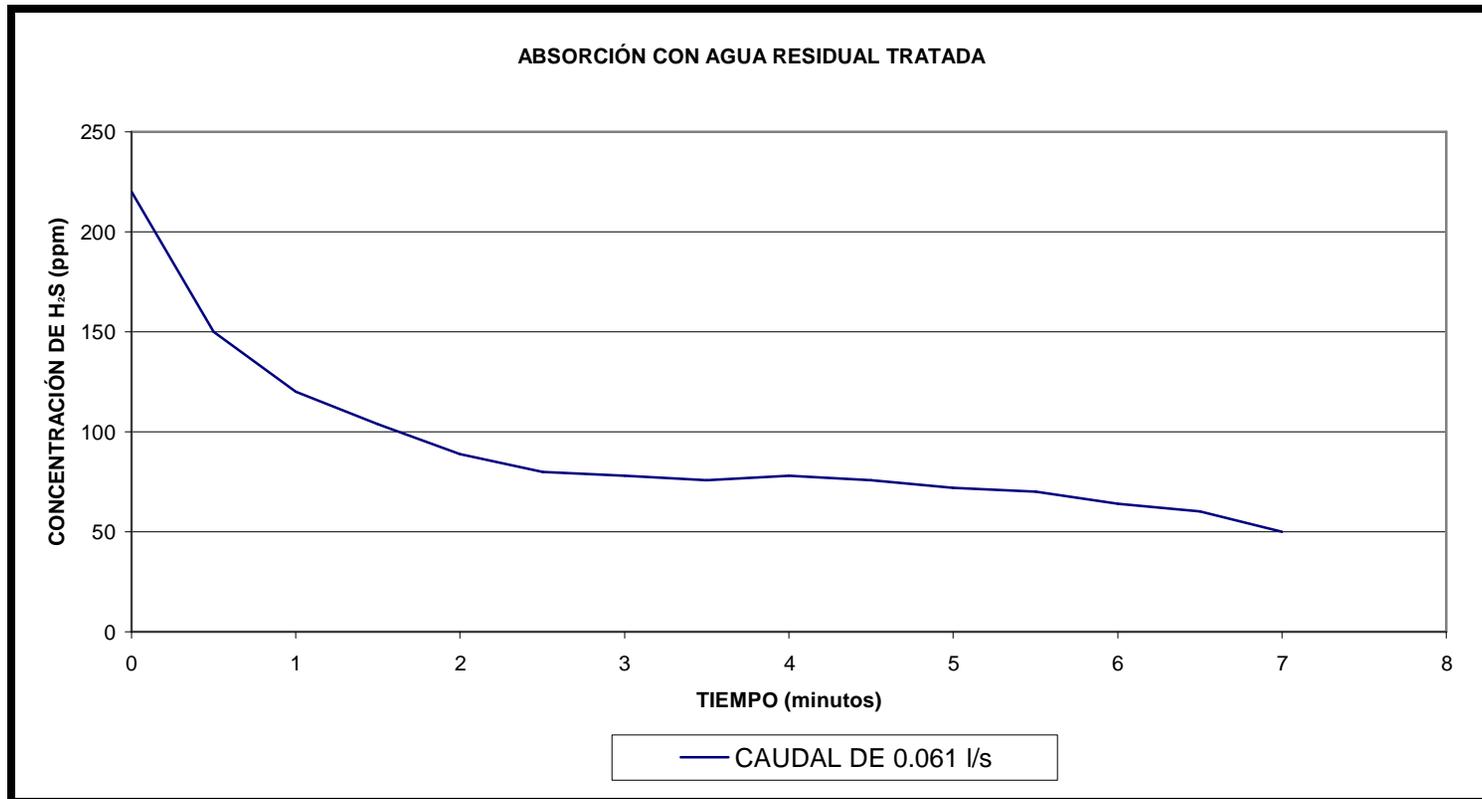
VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.2 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.278 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Regadera

TIEMPO (min)	CONCENTRACIÓN H₂S (ppm)
0.0	220 (Inicial)
0.5	150
1.0	120
1.5	104
2.0	89
2.5	80
3.0	78
3.5	76
4.0	78
4.5	76
5.0	72
5.5	70
6.0	64
6.5	60
7.0	50 (Final)
SUSPENSIÓN DE AGUA DE LAVADO	
7.5	57
8.0	70
8.5	90
9.0	65
9.5	45
10.0	40
10.5	35
11.0	38

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S = 77.272%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO = 7.0 minutos****GASTO TOTAL DE AGUA = 25.62 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SALIDA = No determinado.****La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;**

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 6



CONCLUSIÓN: Aunque se tiene un buen porcentaje de remoción de H₂S, subsiste un problema de alimentación del sulfhídrico, puesto que al apagar la bomba de suministro de agua, la concentración del gas aumentó muy poco y posteriormente disminuye considerablemente. Se ajusta nuevamente la válvula de control a fin de que en las corridas siguientes se mantenga una concentración constante en la entrada de la torre.

NÚMERO DE CORRIDA: 7

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.5 l/s

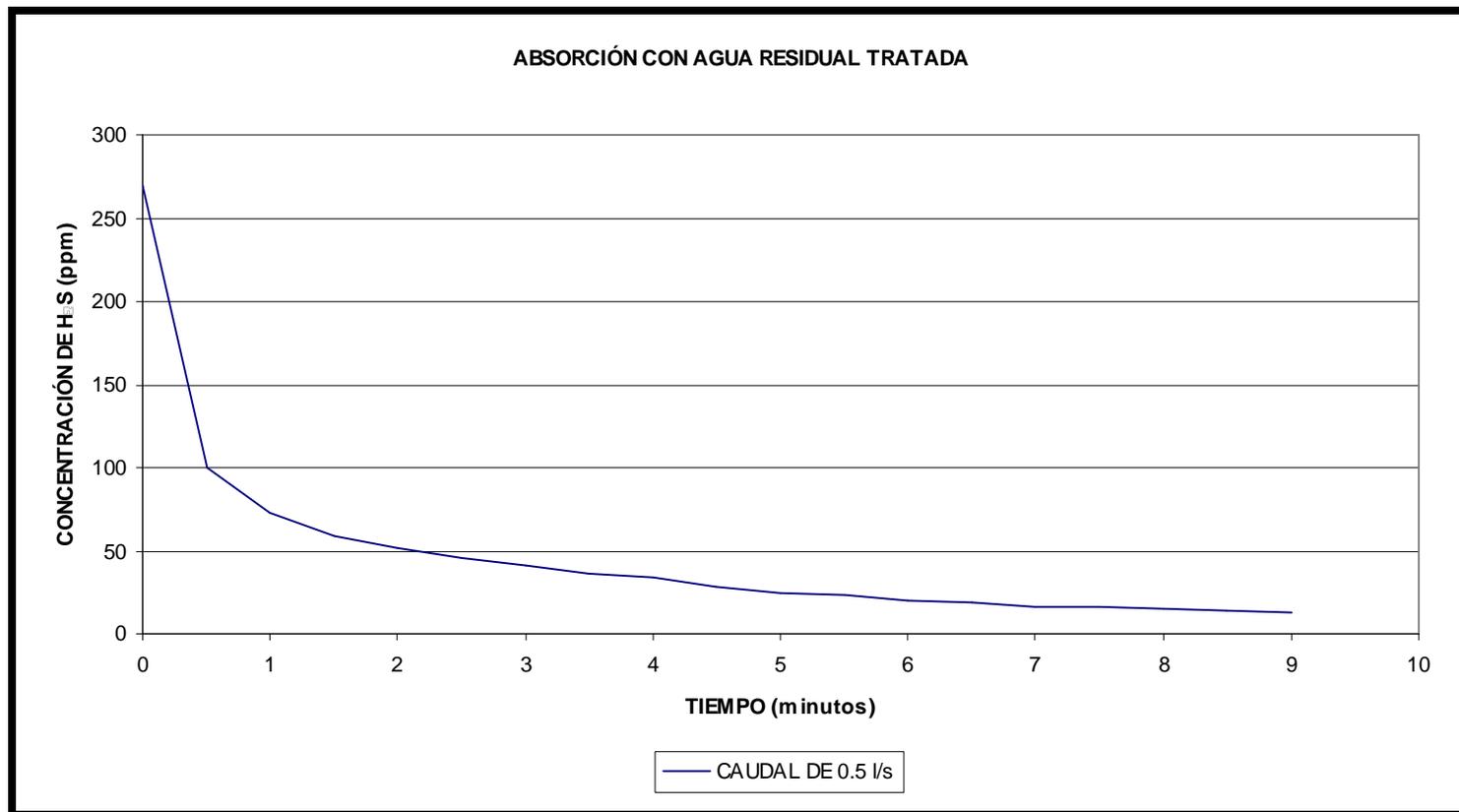
VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.3 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.291 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Regadera

TIEMPO (min)	CONCENTRACIÓN H₂S (ppm)
0.0	270 (Inicial)
0.5	100
1.0	73
1.5	59
2.0	52
2.5	46
3.0	41
3.5	37
4.0	34
4.5	28
5.0	25
5.5	23
6.0	20
6.5	19
7.0	17
7.5	16
8.0	15
8.5	14
9.0	13 (Final)
SUSPENSIÓN DE AGUA DE LAVADO	
9.5	25
10.0	52
10.5	80
11.0	115
11.5	140
12.0	183
12.5	201
13.0	223

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S = 95.185%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO =9.0 minutos****GASTO TOTAL DE AGUA = 270 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SALIDA = 4 minutos.****La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;**

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 7



CONCLUSIÓN: En esta corrida se obtuvo un buen porcentaje de remoción de H₂S, el problema de alimentación del sulfhídrico aún requiere de otro ajuste, puesto que al apagar la bomba de suministro de agua, la concentración del gas no se recuperó totalmente. Se ajusta nuevamente la válvula de control a fin de que en las corridas siguientes se mantenga una concentración constante en la entrada de la torre.

NÚMERO DE CORRIDA: 8,9 y 10VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.283 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (min)	CAUDAL DE AGUA		
	0.5 l/s (Máximo)	0.25 l/s (Medio)	0.092 l/s (Mínimo)
	Concentración de H ₂ S (ppm)	Concentración de H ₂ S (ppm)	Concentración de H ₂ S (ppm)
0.0	540 (Inicial)	530 (Inicial)	450 (Inicial)
0.5	360	360	410
1.0	240	240	346
1.5	190	196	272
2.0	168	164	227
2.5	152	140	221
3.0	140	130	215
3.5	130	117	211
4.0	116	107	209
4.5	114	100	208
5.0	107	95	205
5.5	105	88	205
6.0	98	85	205
6.5	98	80	203
7.0	98	77	202
7.5	100	75	201
8.0	100	75	200
8.5	100	75	200
9.0	100 (Final)	75 (Final)	200 (Final)
SUSPENSIÓN DE AGUA DE LAVADO			
9.5	110	100	208
10.0	132	170	230
10.5	290	230	295
11.0	490	300	373
11.5	530	380	400
12.0	630	450	480
12.5	630	535	520

Los resultados, las conclusiones y la gráfica son los siguientes;

RESULTADOS:

CORRIDA No	8	9	10
CAUDAL DE AGUA	0.5 l/s	0.25 l/s	0.092 l/s
% DE REMOCIÓN	83.018	85.849	55.55
TIEMPO TOTAL DE LAVADO	9 minutos	9 minutos	9 minutos
CAUDAL TOTAL DE AGUA	270 litros	135 litros	49.68 litros

Luego de ajustar el sistema de alimentación de H₂S y cambiar la regadera de lavado por una boquilla de aspersión de acero inoxidable, se genera un patrón de aspersión que semeja un cono lleno, con ángulo de apertura de 90°, que proporciona más eficiencia en el proceso de lavado. Se realizaron tres corridas consecutivas, manejando tres valores de caudal de lavado, con 0.5 l/s como máximo, 0.25 como medio y 0.092 l/s como mínimo, a fin de comparar su eficiencia.

CONCLUSIÓN: De las corridas 8,9 y 10

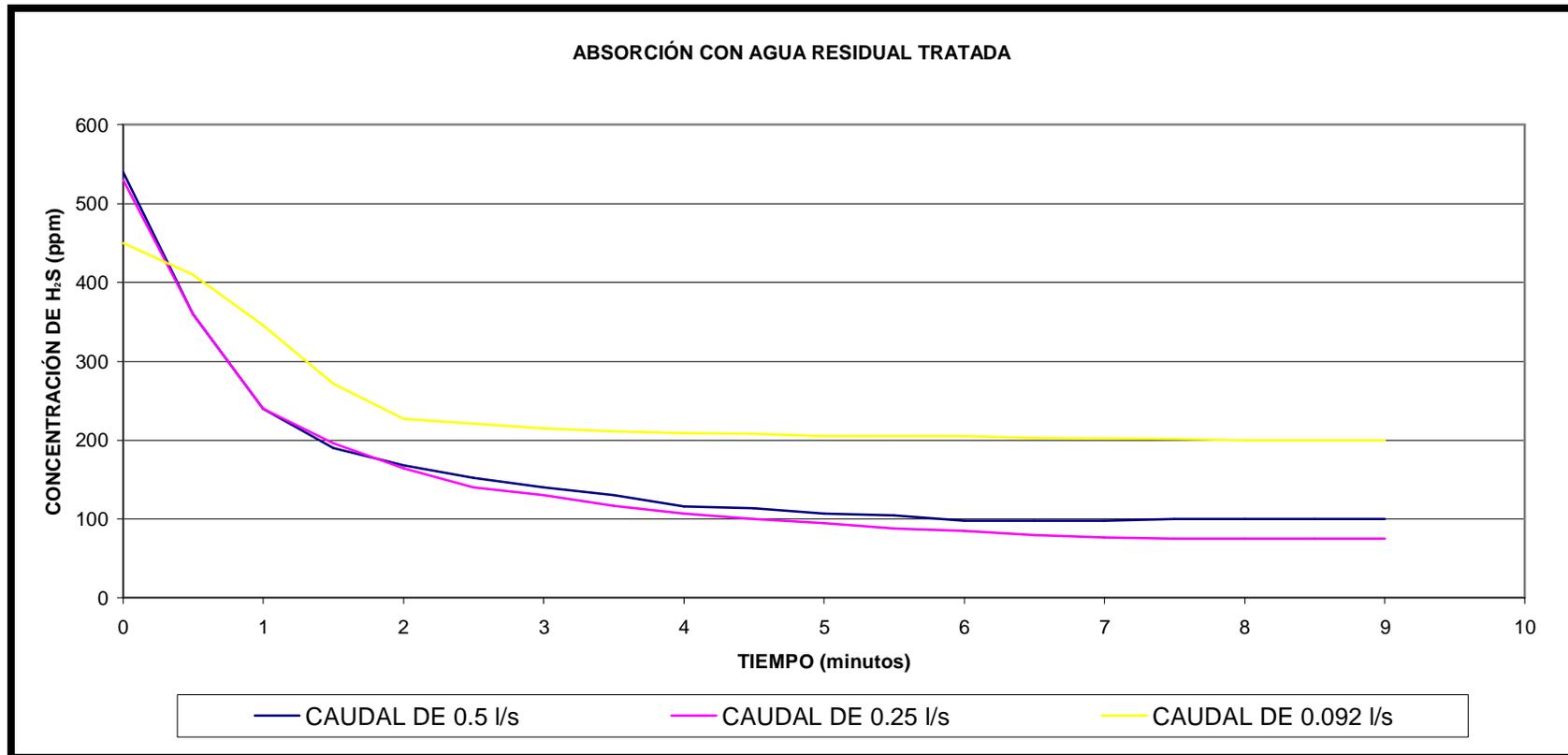
El porcentaje más alto de remoción de H₂S (85.849%) se obtuvo con el caudal de agua de 0.25 l/s, para un mismo tiempo de lavado pero con la mitad de volumen requerido por el caudal máximo, el porcentaje de remoción fue ligeramente menor (83.018%).

En el caso del caudal mínimo, su porcentaje de remoción fue bajo (55.55 %) y poco aceptable, dando una concentración final de H₂S por encima de la requerida.

De lo anterior se concluye que el caudal óptimo de lavado debe estar alrededor de 0.25 l/s de agua. Sin embargo, se afino la concentración de H₂S final, que en este caso aún resulta elevada en relación a la que se requiere.

La gráfica de comportamiento para estas corridas se presenta a continuación;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LAS CORRIDAS No 8, 9 y 10



NÚMERO DE CORRIDA: 11

CAUDAL PROMEDIO DE AGUA: 0.385 l/s

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.283 l/s

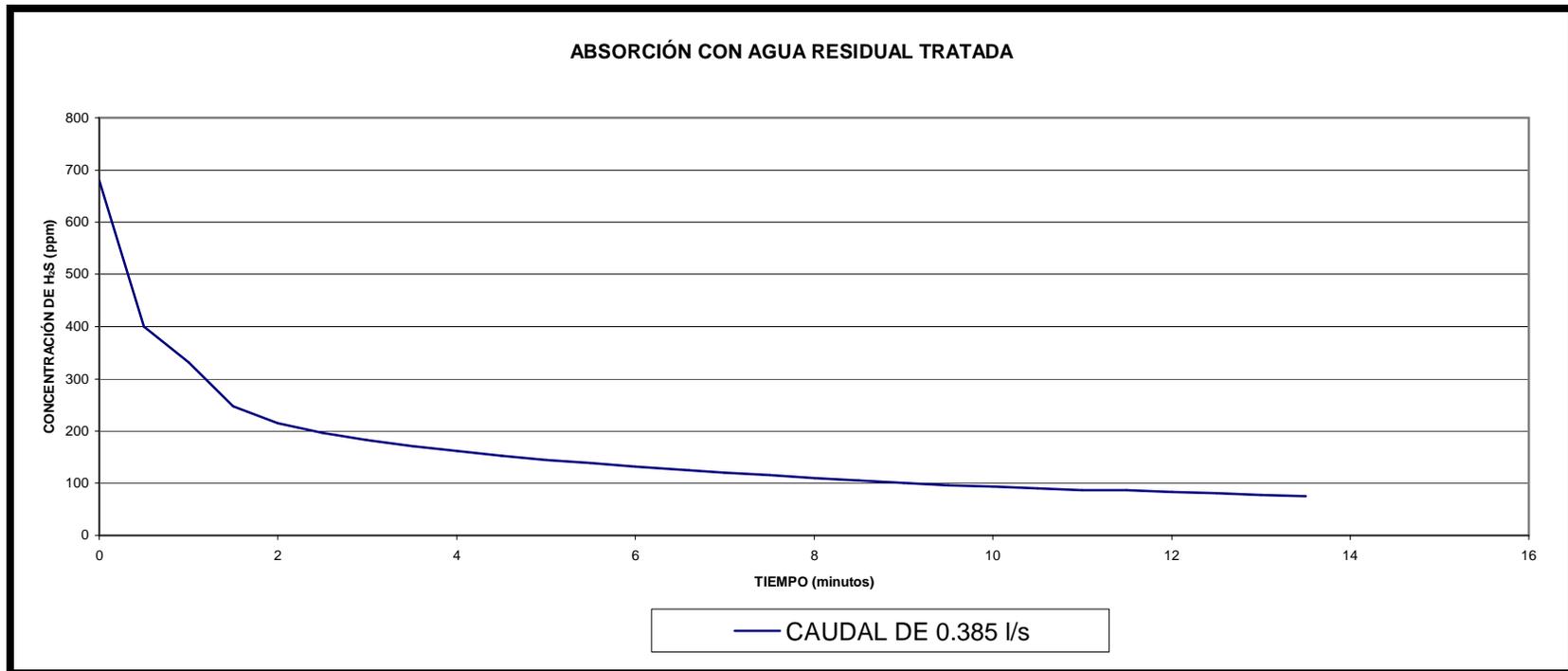
TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA ENTRADA DE LA TORRE (ppm)
0.0	680	680
0.5	400	680
1.0	332	680
1.5	248	683
2.5	197	683
3.0	183	683
3.5	171	683
4.0	161	683
4.5	152	683
5.0	144	683
5.5	138	683
6.0	131	684
6.5	125	684
7.0	120	683
7.5	115	683
8.0	110	683
8.5	105	683
9.0	100	683
9.5	96	683
10.0	93	683
10.5	90	683
11.0	86	683
11.5	86	680
12.0	83	683
12.5	81	683
13.0	77	680
13.5	75	680

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 88.970%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 13.5 minutos****GASTO TOTAL: 311.85 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 4 minutos**

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 11



CONCLUSIÓN: Como puede observarse en los valores registrados, la concentración de entrada de H₂S permaneció prácticamente constante con un valor promedio de 681 ppm de H₂S. Mientras que la concentración de salida fue disminuyendo con respecto al tiempo a medida que el caudal de agua de lavado absorbía el H₂S hasta llegar a una concentración de 75 ppm, con lo cual se dio por terminado el experimento.

Aunque se tuvo un porcentaje final de remoción alto, casi 89%, la concentración final de H₂S (75 ppm) aún está por encima de la sugerida por la norma. Y el caudal de agua usado (0.385 l/s), es mayor al medio establecido que es de (0.25 l/s) además, requirió mayor tiempo (13.5 min) para llegar a la concentración de 25 ppm, en tanto que en la corrida No 10, usando 0.25 l/s durante 9 min se obtiene la misma concentración final. Por lo tanto, el caudal óptimo debe estar cercano a los 0.25 l/s.

CAPÍTULO XI

DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA ABSORCIÓN DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO CON HIDRÓXIDO DE SODIO AL 2% PESO

Con la finalidad de lograr la descomposición del H_2S y, por tanto, la eliminación del olor asociado a este, en la presente etapa de experimentación se utilizará la acción oxidante de un reactivo químico en solución acuosa, el cual debe de reaccionar con el H_2S absorbido de la corriente gaseosa por la fase líquida. Dando como resultado, además de disminuir la concentración de H_2S en la corriente de gas, impedir que este vuelva a liberarse de la fase líquida. El primer reactivo considerado en esta modalidad es el hidróxido de sodio, el cual es una base fuerte y un poderoso oxidante.

De acuerdo con la bibliografía de referencia, la concentración de $NaOH$ usada en pruebas piloto es de 2% peso, con un tiempo de contacto de 2 segundos. Para este caso se utilizará dicha concentración, con el tiempo de contacto permitido por la altura de la torre (3 metros aproximadamente).

Para tener la seguridad de que el sistema lavador estuviese operando a régimen permanente fue necesario conectar en la base de la torre del lavador un medidor de ácido sulfhídrico y en la línea de entrada de la mezcla gaseosa a la torre del lavador se instaló un medidor de flujo con capacidad de 30 l/min. Esto permitió mantener estable las condiciones de alimentación de la mezcla gaseosa y por consiguiente, obtener resultados más confiables. En este caso se estableció un valor de 17 l/min, lo cual equivale aproximadamente al caudal que se venía utilizando en las corridas anteriores. Razón por lo cual, en adelante se reportará dicha caudal aire-sulfhídrico en las corridas subsecuentes, sin incluir el dato de la velocidad de la corriente gaseosa.

Por esta razón, en algunas de las corridas experimentales se incluyen tablas del comportamiento de la concentración de la mezcla gaseosa alimentada a la torre del lavador.

A continuación se muestran resultados obtenidos, usando solución de hidróxido de sodio al 2% peso como líquido de lavado.

NÚMERO DE CORRIDA: 12

CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 0.25 l/s

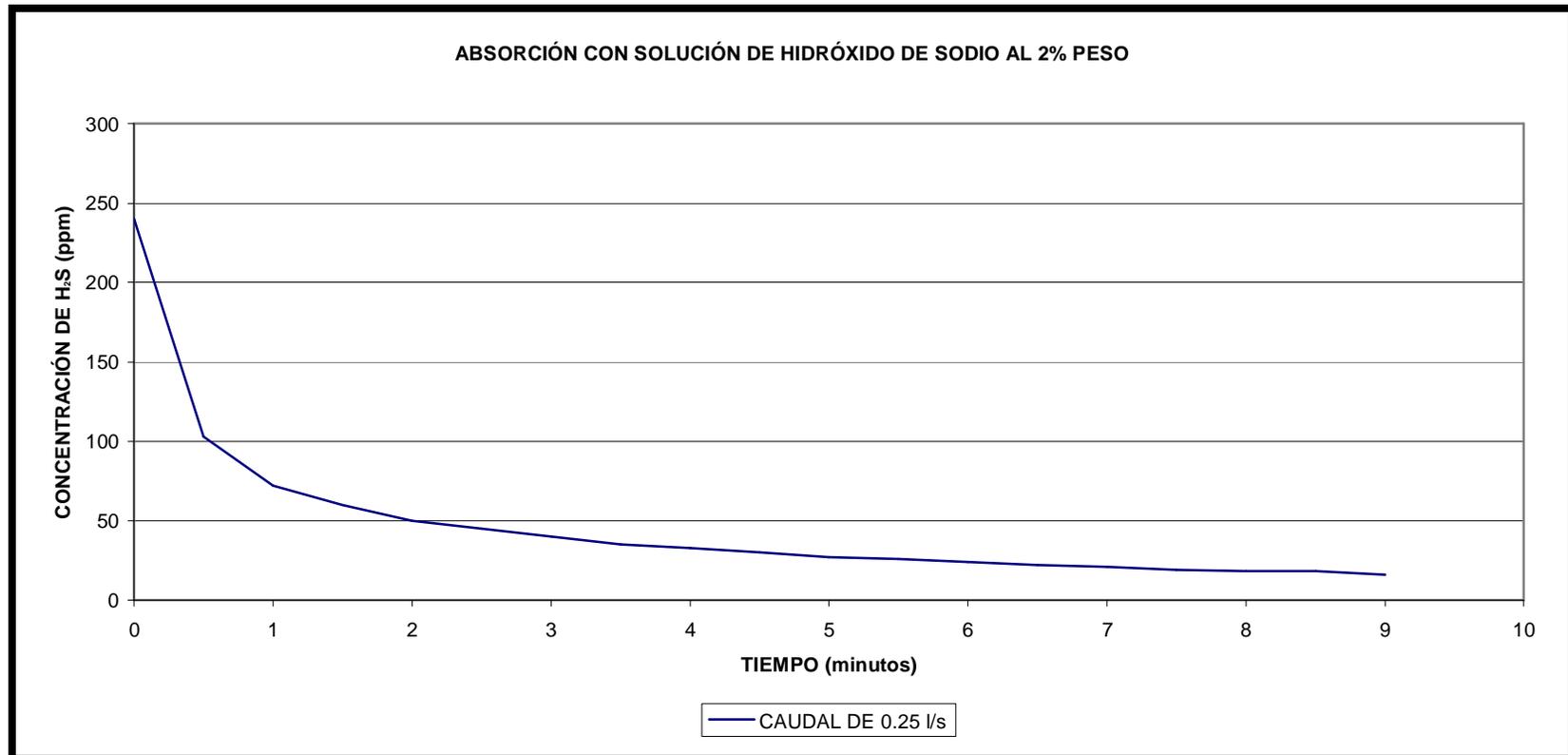
VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.283 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA ENTRADA DE LA TORRE (ppm)
0.0	240 (Inicial)	240
0.5	103	238
1.0	72	238
1.5	60	238
2.0	50	240
2.5	45	240
3.0	40	238
3.5	35	238
4.0	33	237
4.5	30	240
5.0	27	240
5.5	26	240
6.0	24	240
6.5	22	240
7.0	21	238
7.5	19	240
8.0	18	240
8.5	18	240
9.0	16 (Final)	238

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 93.333%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos****CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 135 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 4 minutos**

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 12

CONCLUSIÓN: Con una alimentación de ácido sulfhídrico uniforme y un caudal de lavado de 0.25 l/s, se obtuvo en esta corrida un alto porcentaje de remoción de H₂S (93.333%) con un tiempo de lavado de 9 minutos.

NÚMERO DE CORRIDA: 13

CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 0.25 l/s

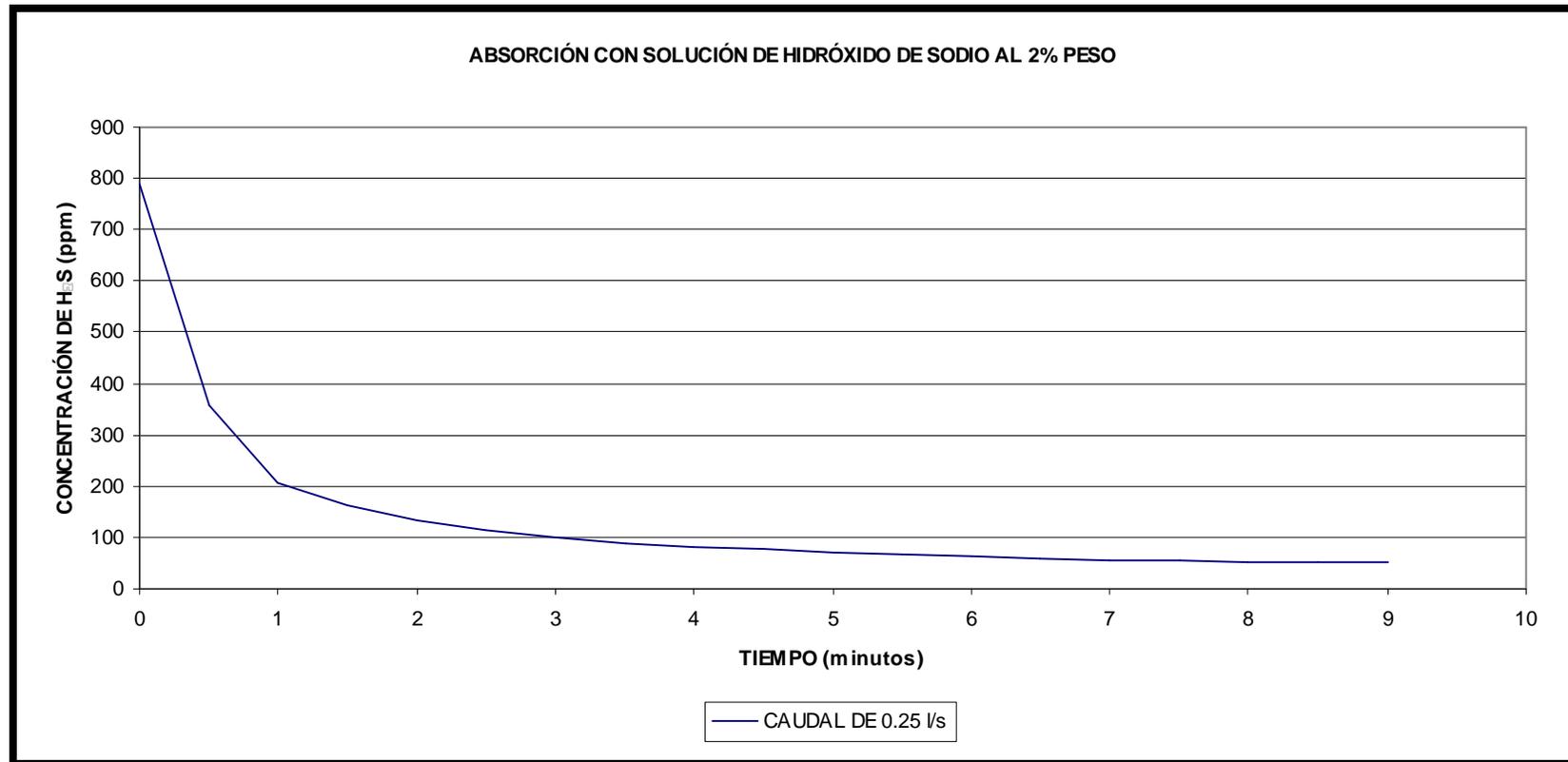
VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE -H₂S: 0.283 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA ENTRADA DE LA TORRE (ppm)
0.0	790 (Inicial)	790
0.5	356	785
1.0	206	780
1.5	164	775
2.0	133	770
2.5	114	775
3.0	100	770
3.5	90	760
4.0	82	760
4.5	77	755
5.0	70	750
5.5	66	750
6.0	63	750
6.5	60	750
7.0	57	750
7.5	54	740
8.0	50	740
8.5	50	740
9.0	50 (Final)	740

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 93.670%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos****CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 135 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 4 minutos****La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;**

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 13



CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria, comparable a la No 12, con un porcentaje de remoción similar, en el mismo tiempo de lavado. Sólo que en esta ocasión, la concentración de entrada a la torre es superior en más de un doscientos por ciento. Por lo que la concentración al final del proceso de absorción aún resulta alta respecto a la requerida (25 ppm). En las corridas siguientes se probaron caudales inferiores a fin de verificar la consistencia de remoción.

NÚMERO DE CORRIDA: 14

CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 0.1987 l/s

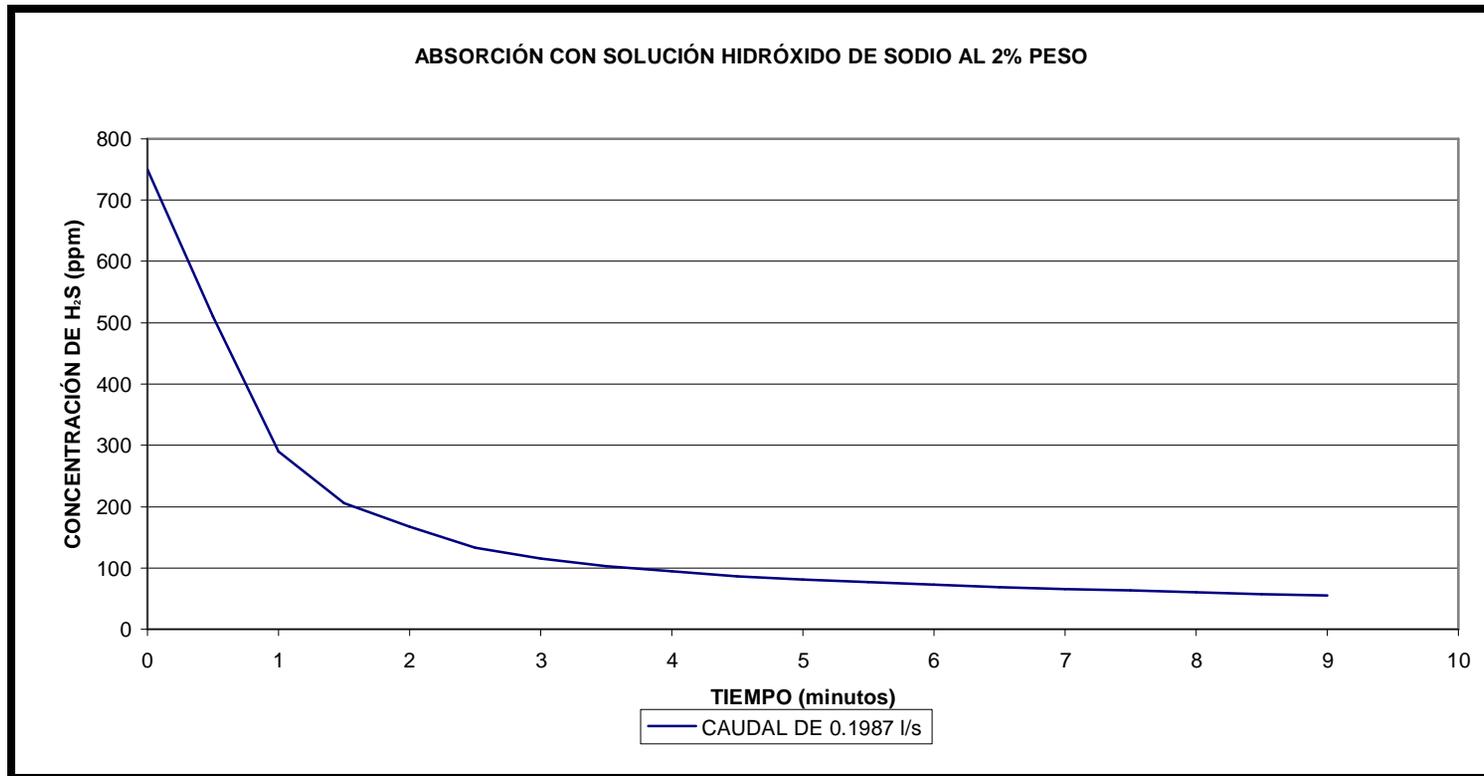
VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.283 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)
0.0	750 (Inicial)
0.5	510
1.0	290
1.5	206
2.0	168
2.5	133
3.0	116
3.5	103
4.0	95
4.5	87
5.0	82
5.5	77
6.0	73
6.5	69
7.0	66
7.5	64
8.0	61
8.5	58
9.0	56 (Final)

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 92.533%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos****CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 107.3 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 4 minutos**

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 14

CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria. Sin embargo, aunque fue alto el porcentaje de remoción de H₂S, resultó ligeramente inferior a las corridas 12 y 13, resaltando el hecho de que se obtuvo cierto ahorro en la solución administrada en el proceso.

NÚMERO DE CORRIDA: 15

CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 0.1785 l/s

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.283 l/s

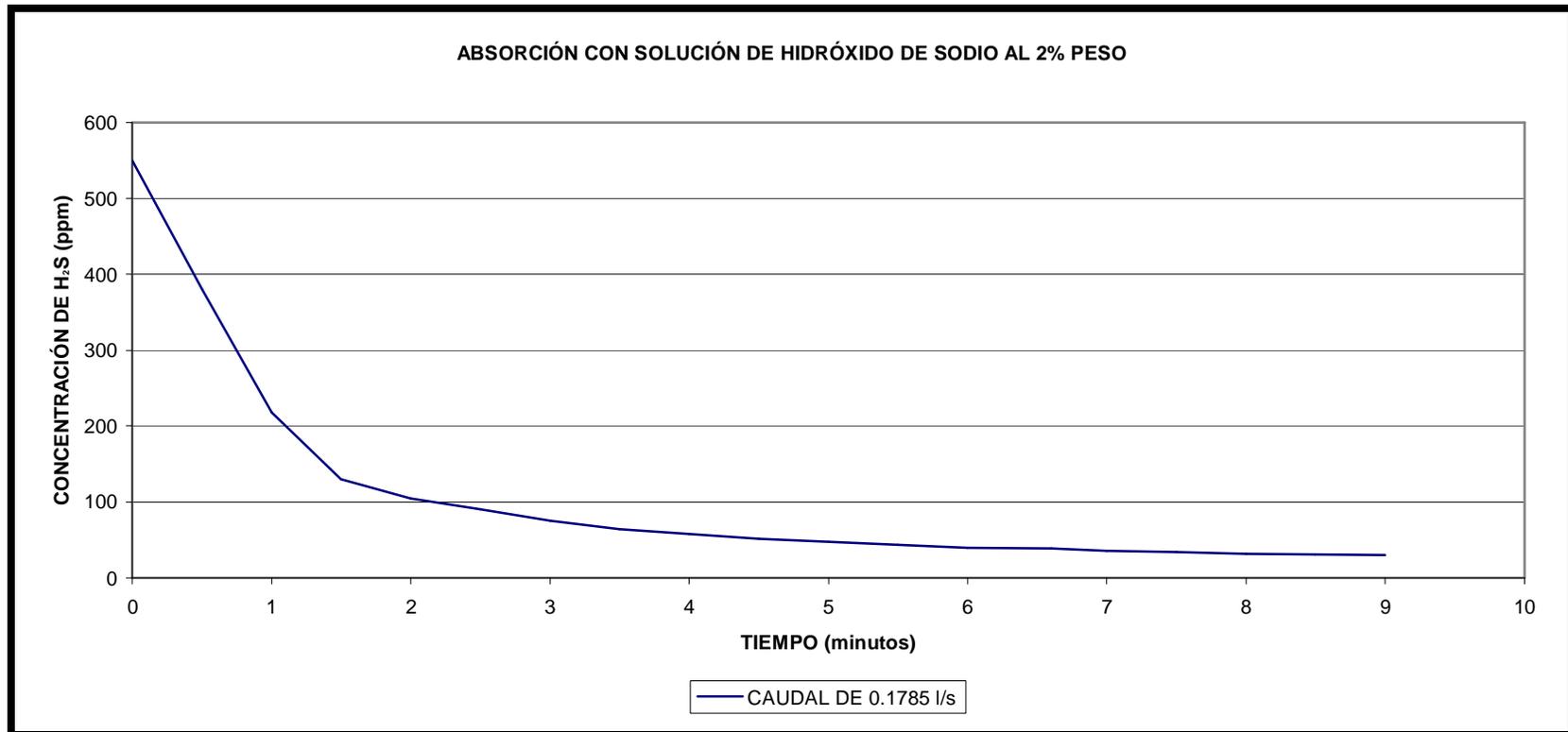
TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA ENTRADA DE LA TORRE (ppm)
0.0	550 (Inicial)	550
0.5	380	535
1.0	218	530
1.5	130	545
2.0	105	540
2.5	90	535
3.0	75	525
3.5	64	530
4.0	58	525
4.5	52	520
5.0	48	515
5.5	44	525
6.0	40	525
6.5	39	520
7.0	36	525
7.5	34	520
8.0	32	535
8.5	31	535
9.0	30(Final)	535

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 94.545%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos****CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 96.4 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 4 minutos**

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 15



CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria ya que se alcanzó el porcentaje de remoción de H₂S esperado, en un lapso de tiempo similar a lo experimentado con agua residual tratada (10.5 minutos, aunque el tiempo total de experimentación en este caso fue de 9 minutos). El caudal utilizado es 28.6 % menor al óptimo definido para el agua residual tratada (0.25 l/s y un caudal total de 135 l). Por lo cual se comprueba que la remoción con solución de NaOH al 2% es más eficiente. En las posteriores corridas se experimentará con un caudal menor para observar la factibilidad de mantener el porcentaje de remoción.

NÚMERO DE CORRIDA: 16

CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 0.111 l/s

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.283 l/s

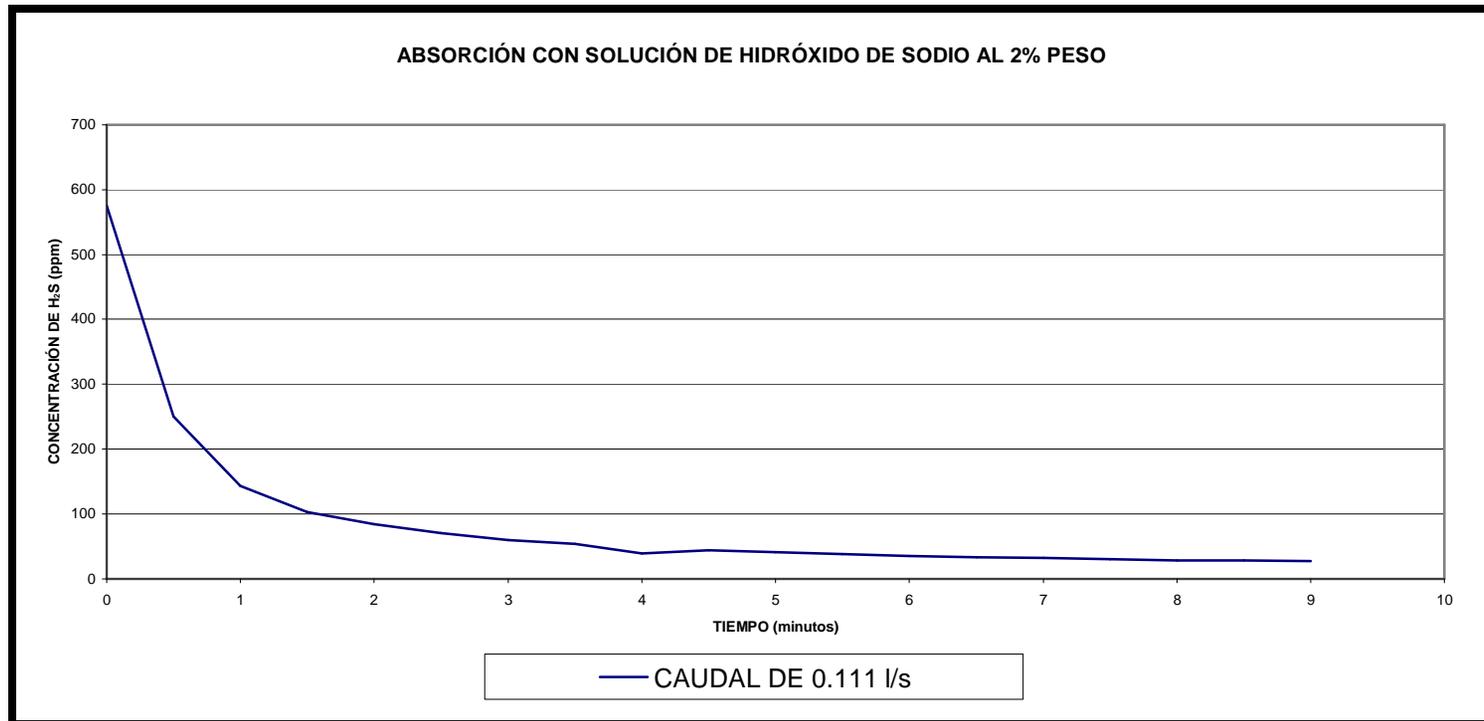
TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA ENTRADA DE LA TORRE (ppm)
0.0	575(Inicial)	575
0.5	250	575
1.0	143	570
1.5	103	575
2.0	84	580
2.5	70	575
3.0	60	580
3.5	54	575
4.0	39	575
4.5	44	575
5.0	41	570
5.5	38	570
6.0	35	575
6.5	33	575
7.0	32	575
7.5	30	575
8.0	28	575
8.5	28	575
9.0	27 (Final)	575

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 95.304%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos****CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%: 59.4 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 4 minutos**

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 16



CONCLUSIÓN: En esta corrida se obtuvo un alto porcentaje de remoción (95.304%), en un tiempo de lavado relativamente corto (9 minutos). Y con un caudal de solución de NaOH, 50% menor al óptimo usado con agua residual tratada (0.25 l/s). Por otra parte, la concentración de entrada a la torre de lavado se mantuvo constante.

Este caudal de hidróxido de sodio (0.111 l/s), menor al de la corrida No. 15, prácticamente mejora la eficiencia de remoción de H₂S, con igual tiempo y menor cantidad de solución de lavado. Por tanto dicho caudal puede considerarse como el óptimo para la solución de NaOH al 2%.

CAPÍTULO XII

DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA ABSORCIÓN DEL ÁCIDO SULFHÍDRICO CON HIPOCLORITO DE SODIO AL 2% PESO

Como otra opción para la oxidación del H_2S , en este apartado se utilizó una solución de hipoclorito de sodio para realizar el lavado del gas en la torre, preparando la misma a una concentración similar a la del caso anterior con hidróxido de sodio al 2%.

Al igual que en la experimentación con hidróxido de sodio, el cual de inicio para las pruebas fue de 0.25 l/s. Es importante mencionar que se utilizó agua potable para preparar la solución de hipoclorito de sodio al 2% peso, limitándose el tiempo de experimentación para cada corrida a 9 minutos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos usando solución de hipoclorito de sodio al 2% como líquido de lavado.

NÚMERO DE CORRIDA: 17

CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaClO 2% PESO: 0.25 l/s

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/s

CAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.216 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)
0.0	300 (Inicial)
0.5	150
1.0	96
1.5	78
2.0	68
2.5	61
3.0	57
3.5	52
4.0	49
4.5	47
5.0	45
5.5	43
6.0	41
6.5	39
7.0	37
7.5	36
8.0	34
8.5	32
9.0	32 (Final)

RESULTADOS:

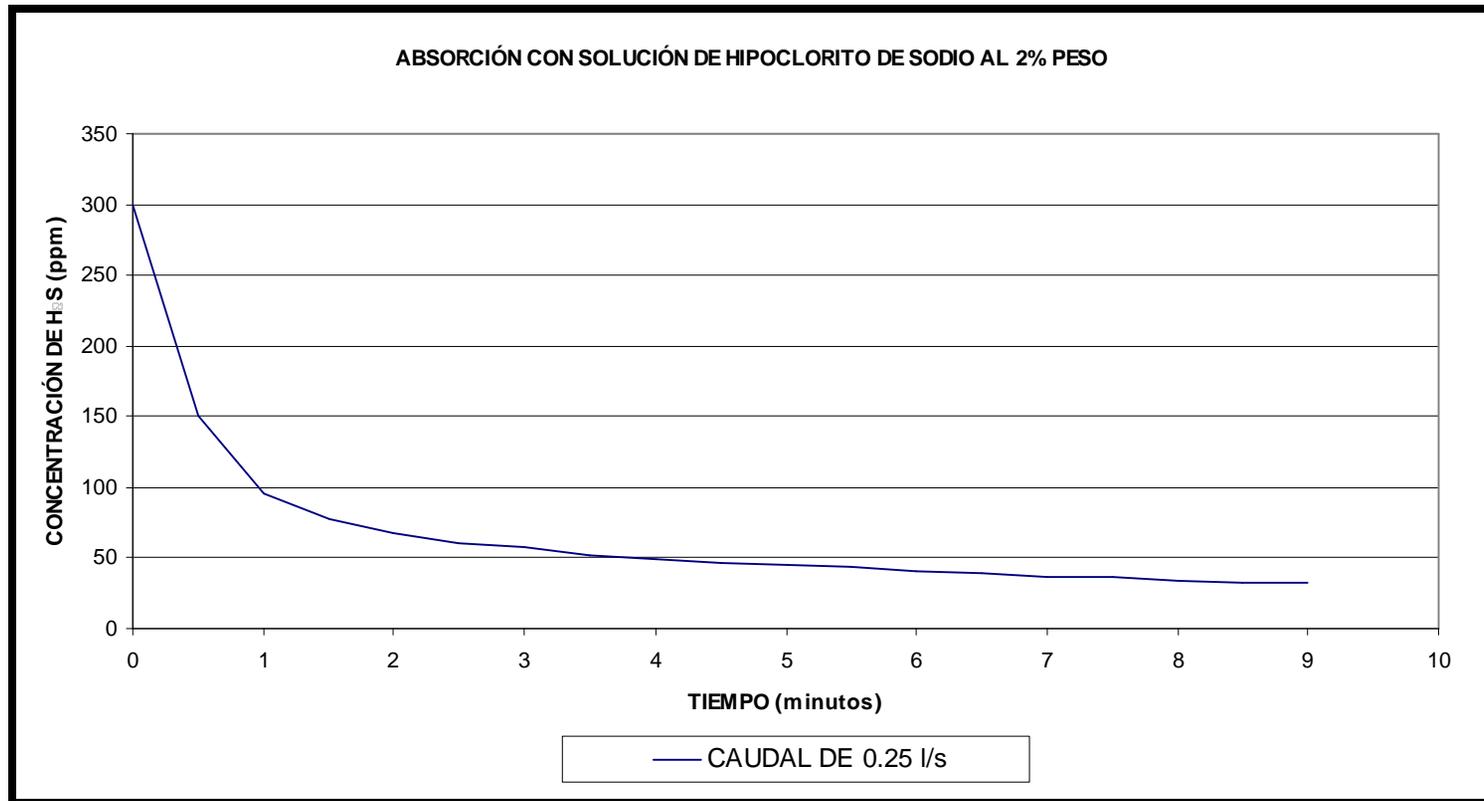
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 89.333%

TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos

CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaClO 2% PESO: 135 litros

TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 12 minutos

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 17

CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria. Dado que se obtuvo un porcentaje de remoción superior al obtenido en el caso del agua residual tratada, en el mismo tiempo de experimentación. Cabe señalar que por razones del funcionamiento de la válvula reguladora de presión, la cual regula el aire del compresor, solo se pudo fijar el caudal de aire-sulfhídrico en 13 l/min como mínimo, en ésta y en las siguientes corridas. Por otra parte, la concentración de entrada a la torre se mantuvo constante, del orden de 300 ppm, razón por la cual ya no fue necesario registrarla.

NÚMERO DE CORRIDA: 18

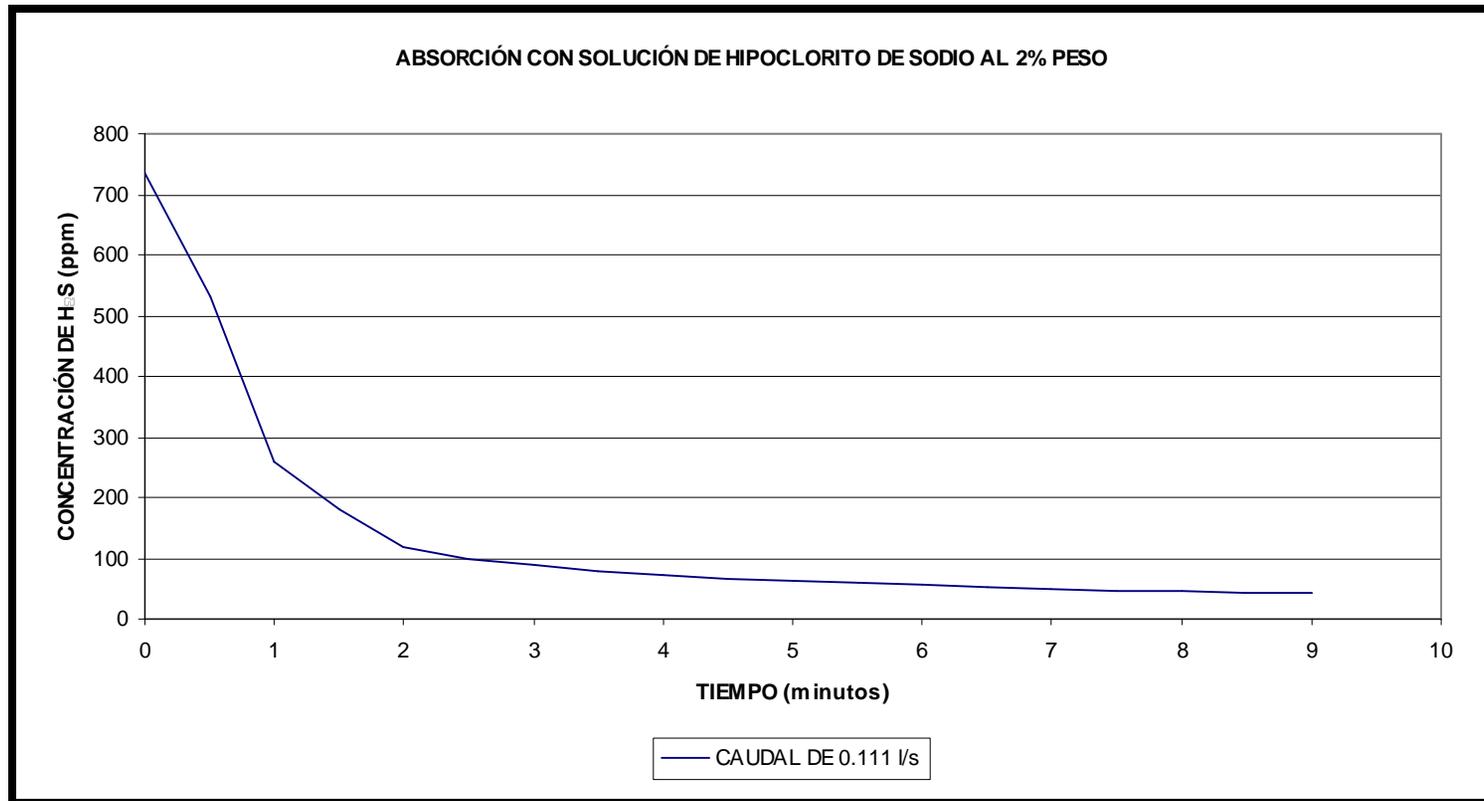
CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaClO 2% PESO: 0.111 l/s

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/sCAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.216 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)
0.0	734 (Inicial)
0.5	530
1.0	260
1.5	180
2.0	119
2.5	99
3.0	88
3.5	80
4.0	73
4.5	67
5.0	63
5.5	58
6.0	55
6.5	52
7.0	49
7.5	47
8.0	45
8.5	43
9.0	41 (Final)

RESULTADOS:**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 94.414%****TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos****CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaClO 2% PESO: 60 litros****TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 12 minutos****La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;**

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 18

CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria, con un alto porcentaje de remoción de H₂S, para el tiempo de experimentación fijado y con un mínimo caudal de solución de lavado. Al igual que en el caso anterior la concentración de entrada a la torre se mantuvo uniforme.

NÚMERO DE CORRIDA: 19

CAUDAL PROMEDIO DE SOLUCIÓN DE NaClO 2% PESO : 0.0961 l/s

VELOCIDAD DE AIRE-H₂S: 2.4 m/s

CAUDAL DE AIRE-H₂S: 0.216 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: Aspersor de acero inoxidable modelo 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CONCENTRACIÓN DE H₂S EN LA SALIDA DE LA TORRE (ppm)
0.0	300 (Inicial)
0.5	160
1.0	92
1.5	71
2.0	60
2.5	52
3.0	48
3.5	44
4.0	41
4.5	38
5.0	36
5.5	34
6.0	32
6.5	30
7.0	29
7.5	28
8.0	27
8.5	25
9.0	25 (Final)

RESULTADOS:

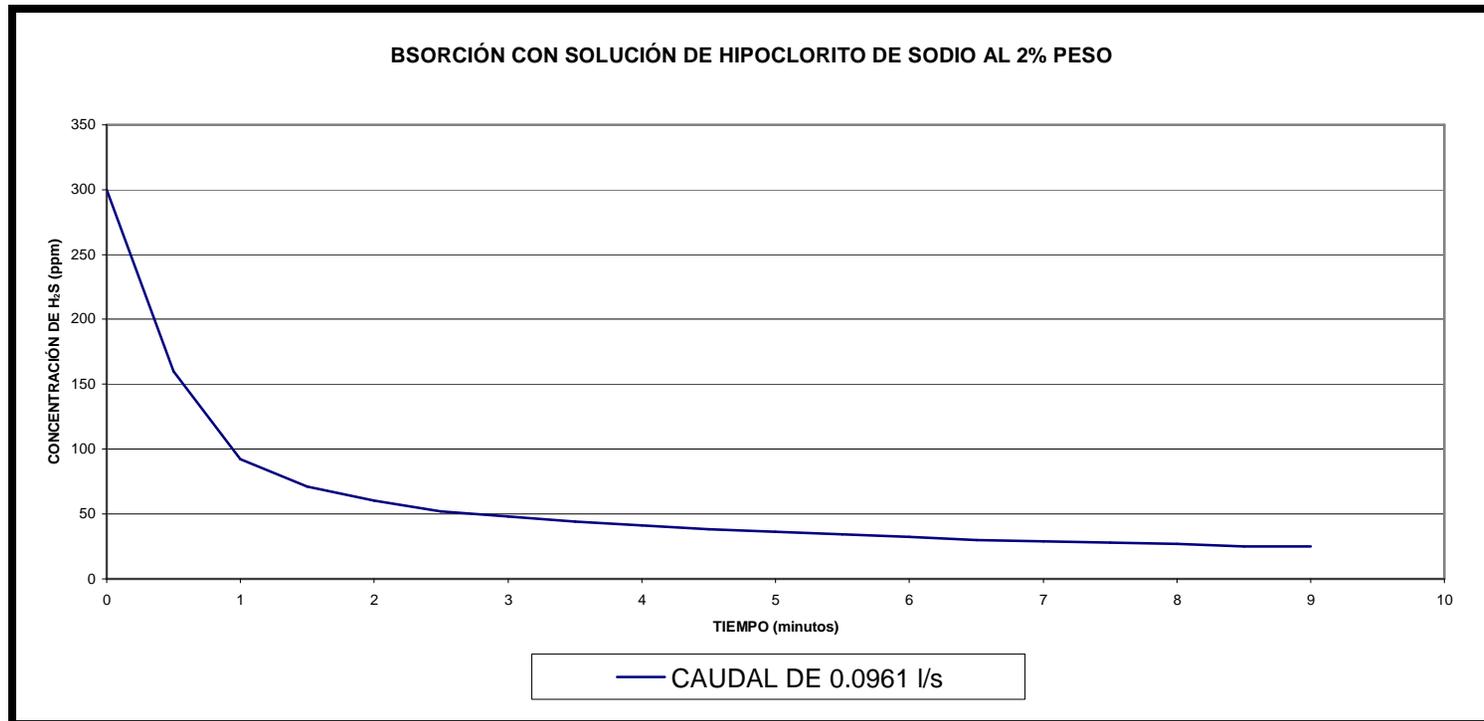
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE H₂S: 91.666%

TIEMPO TOTAL DE LAVADO: 9 minutos

CAUDAL TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaClO 2% PESO: 51.89 litros

TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN A LA SALIDA: 12 minutos

La gráfica de los resultados y las conclusiones son los siguientes;

GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO PARA LA CORRIDA No 19

CONCLUSIÓN: La corrida se considera satisfactoria, teniéndose un porcentaje alto de remoción de H₂S Sin embargo, resulta inferior al obtenido con el caudal de 0.111 l/s, por lo que el valor óptimo debe estar más cercano a éste último. En este caso el ahorro en gasto de solución con respecto a la corrida anterior, es relativamente bajo. Para este caso también se mantuvo uniforme la concentración de entrada a la torre. Es importante resaltar que el tiempo de recuperación de la concentración a la salida es mayor y lo origina la formación de una nube de cloro residual que sigue absorbiendo partículas de ácido sulfhídrico aún después de suspender el suministro de la solución lavadora de hipoclorito de sodio.

CAPÍTULO XIII

CONTROL DE VARIABLES EN EL DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA ABSORCIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO

A fin de tener una mejor comparación de los resultados obtenidos con cada una de las soluciones lavadoras empleadas para la remoción de ácido sulfhídrico, fue necesario efectuar otras corridas que sirvieran para este efecto.

Dichas corridas se realizaron con las mismas condiciones de operación (concentración inicial de H_2S = 400 ppm, caudal de la mezcla gaseosa H_2S –aire = 17 l/s min, tiempo total de lavado = 9 minutos y con aspersor a cono lleno).

Realizar esta nueva etapa de experimentación servirá para la obtención de resultados que permitan dar mayor y mejor soporte ya que las condiciones de operación se manejaron con mayor estabilidad, lo que permitirá obtener mejores conclusiones.

De estos resultados se incluirán los gráficos de concentración de H_2S vs tiempo, en los cuales se muestra la tendencia de comportamiento de la remoción del ácido sulfhídrico con cada una de las soluciones lavadoras.

A continuación se reportan los datos de las corridas que se efectuaron en esta etapa, así como sus correspondientes gráficos.

NÚMERO DE CORRIDA: 20, 21, 22 y 23

LÍQUIDO DE LAVADO: AGUA RESIDUAL TRATADA

CAUDAL DE AIRE-H₂S: 17 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: ASPERSOR DE ACERO INOXIDABLE MOD. 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CAUDALES DE AGUA RESIDUAL TRATADA EMPLEADOS (l/s)			
	0.25	0.092	0.5	0.385
0.0	400	400	400	400
0.5	269	236	223	365
1.0	180	196	149	308
1.5	146	146	118	242
2.0	122	126	104	202
2.5	105	116	94	197
3.0	97	108	87	191
3.5	87	101	81	188
4.0	80	95	72	186
4.5	75	90	71	185
5.0	71	85	66	182
5.5	66	81	65	182
6.0	63	77	61	182
6.5	60	74	61	181
7.0	57	71	61	180
7.5	56	68	62	179
8.0	56	65	62	178
8.5	56	62	62	178
9.0	56	59	62	178
PORCENTAJE DE REMOCIÓN (%)	86.00	85.25	84.5	55.5
TIEMPO TOTAL DE LAVADO (minutos)	9	9	9	9
GASTO TOTAL DE AGUA (litros)	135	49.68	270	208

NÚMERO DE CORRIDA: 24, 25, 26 y 27

LÍQUIDO DE LAVADO: SOLUCIÓN DE NaOH AL 2% PESO

CAUDAL DE AIRE-H₂S: 17 l/s

TIPO DE DISTRIBUIDOR: ASPERSOR DE ACERO INOXIDABLE MOD. 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CAUDALES DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2% PESO EMPLEADOS (l/s)			
	0.111	0.1785	0.250	0.1987
0.0	400	400	400	400
0.5	174	372	180	272
1.0	99	264	104	155
1.5	72	151	83	110
2.0	58	90	67	90
2.5	49	73	58	71
3.0	42	63	51	62
3.5	38	52	46	55
4.0	34	44	42	51
4.5	31	40	39	46
5.0	28	36	36	44
5.5	26	33	34	41
6.0	24	31	32	39
6.5	23	28	31	37
7.0	22	27	29	35
7.5	21	25	27	34
8.0	20	24	25	32
8.5	20	23	25	31
9.0	19	22	25	30
PORCENTAJE DE REMOCIÓN (%)	95.250	94.50	93.75	92.50
TIEMPO TOTAL DE LAVADO (minutos)	9	9	9	9
GASTO TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2% PESO (litros)	60	96.40	135	104.6

NÚMERO DE CORRIDA: 28, 29 y 30

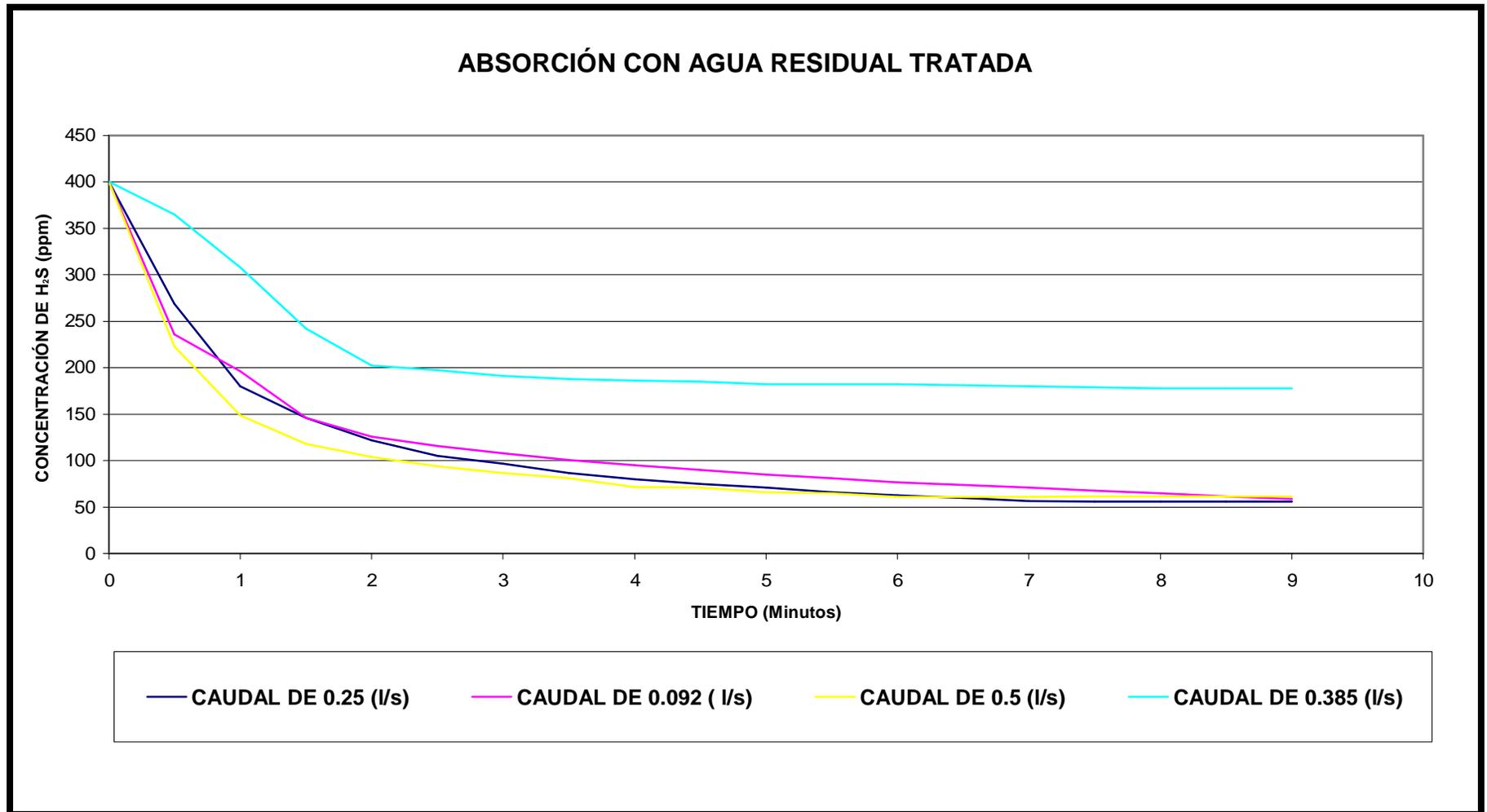
LÍQUIDO DE LAVADO: SOLUCIÓN DE NaClO AL 2% PESO

CAUDAL DE AIRE-H₂S: 17 l/s

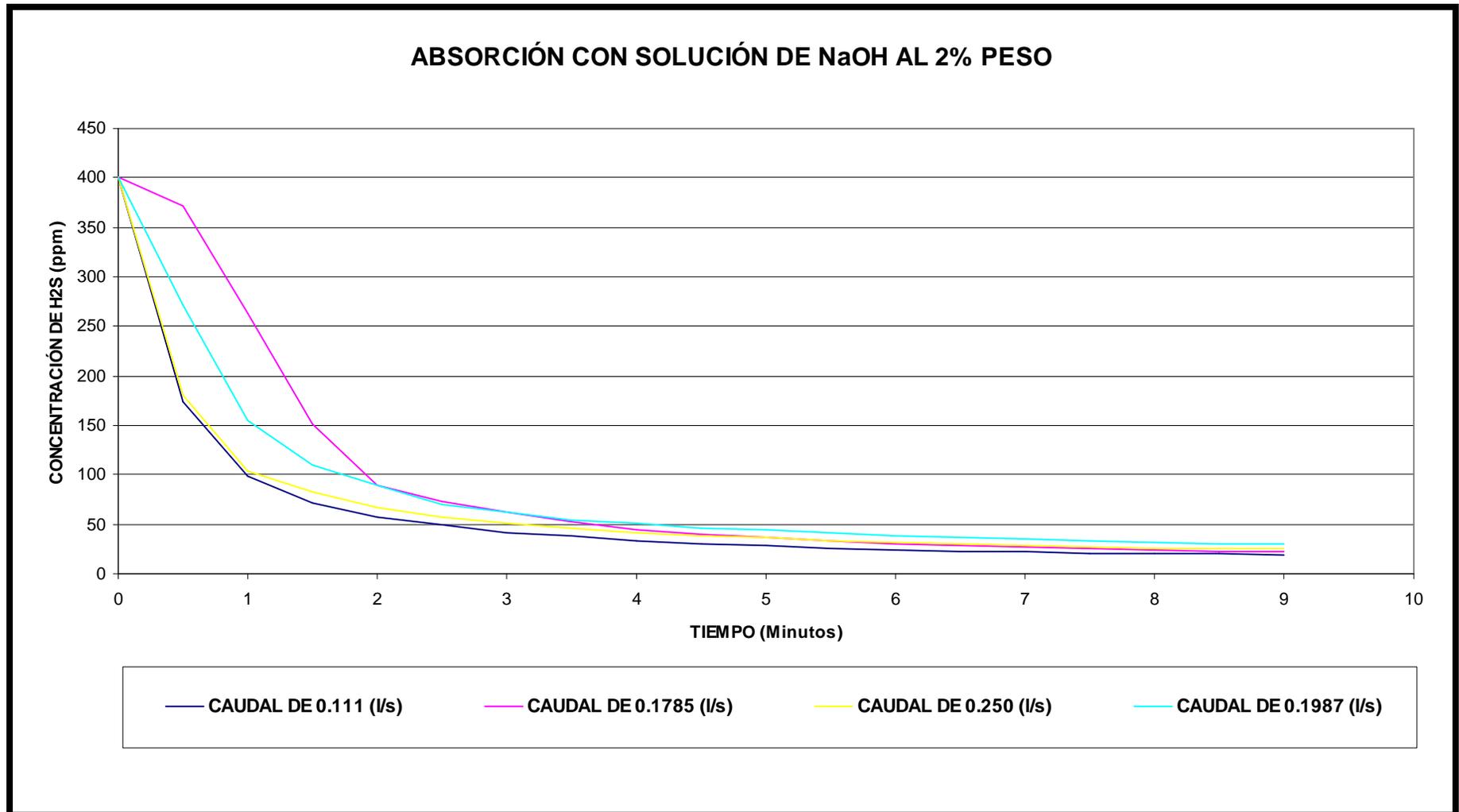
TIPO DE DISTRIBUIDOR: ASPERSOR DE ACERO INOXIDABLE MOD. 3/8 HH-SS22

TIEMPO (Minutos)	CAUDALES DE SOLUCIÓN DE NaClO AL 2% PESO EMPLEADOS (l/s)		
	0.111	0.0961	0.25
0.0	400	400	400
0.5	281	213	200
1.0	138	123	128
1.5	96	95	104
2.0	53	80	91
2.5	47	72	81
3.0	42	64	76
3.5	39	59	69
4.0	36	55	65
4.5	33	51	63
5.0	31	48	60
5.5	29	45	57
6.0	28	43	55
6.5	26	40	52
7.0	25	39	49
7.5	24	37	48
8.0	23	36	45
8.5	22	34	43
9.0	22	34	43
PORCENTAJE DE REMOCIÓN (%)	94.50	91.50	89.25
TIEMPO TOTAL DE LAVADO (minutos)	9	9	9
GASTO TOTAL DE SOLUCIÓN DE NaClO AL 2% PESO (litros)	60	52	135

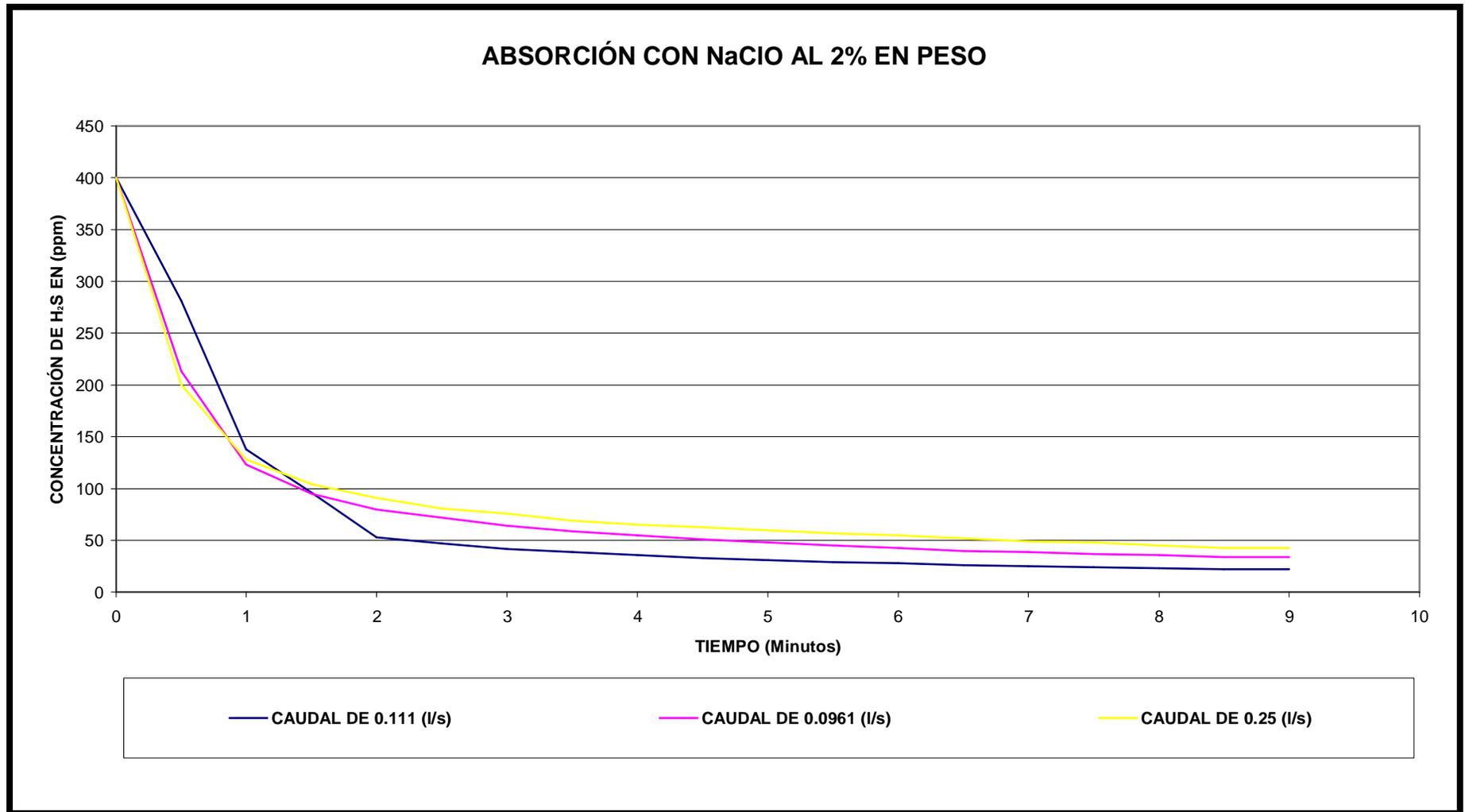
18. GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO PARA LAS CORRIDAS 20, 21, 22 y 23



GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO PARA LAS CORRIDAS 24, 25, 26 y 27



GRAFICAS DE COMPORTAMIENTO PARA LAS CORRIDAS 28, 29 y 30



CAPÍTULO XIV

RESULTADOS

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON AGUA RESIDUAL TRATADA

A continuación se resumen en la tabla 7 los resultados obtenidos de los experimentos para el proceso de absorción utilizando como líquido de lavado agua residual tratada, incluyendo solamente la información de aquellas corridas en donde se logro el mejor control de las variables que intervienen y que permitían el buen funcionamiento del dispositivo de experimentación.

TABLA 7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON DIFERENTES CAUDALES DE AGUA RESIDUAL TRATADA USADOS EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN DE H₂S

CORRIDA No	CAUDAL (l/s)	TIEMPO (minutos)	VOLUMEN TOTAL (l)	CONCENTRACIÓN H ₂ S (ppm)		REMOCIÓN %
				INICIAL	FINAL	
8	0.5	9	270	640	100	84.38
9	0.25	9	135	530	75	85.85
10	0.092	9	50	450	200	55.55
11	0.385	9	208	679	100	85.26

Analizando estos resultados se establece lo siguiente:

- Con caudales pequeños de agua (cercanos a 0.1 l/s), se obtienen porcentajes bajos de remoción de H₂S, del orden del 56%.
- Con caudales medios y altos (de 0.25 a 0.5 l/s), el porcentaje de remoción de H₂S se incrementa hasta un 85-89%.
- Es claro que el porcentaje de remoción mas alto se obtuvo en la corrida No 11 (88.95%). Sin embargo, dicha corrida requirió de mayor tiempo y volumen de agua para alcanzar el mismo nivel de concentración final (75 ppm) que en el caso de la corrida No.9, la cual se realizó a un caudal menor (0.25 l/s contra 0.385 l/s).

A fin de efectuar un análisis comparativo, en la tabla se anota la misma corrida No 11, pero recortada al minuto 9 (igual tiempo usado en el resto de las corridas), con lo cual el porcentaje de remoción baja a 85.26 %, con un gasto de agua que sigue siendo mayor al utilizado en la corrida 9.

- d) Por lo anterior, la corrida No 9 resulta ser la que arrojó el mejor porcentaje de remoción de H₂S empleando para ello menor cantidad de agua y en el mismo intervalo de tiempo de lavado. Por tanto, se considera el caudal de lavado de 0.25 l/s como el óptimo de experimentación con agua residual tratada como solución de lavado.
- e) Aunque se obtuvo un porcentaje de remoción alto para el H₂S, la concentración final del mismo (75 ppm) aún resulta alta respecto a la requerida (25 ppm).
- f) Para la experimentación con los siguientes líquidos de lavado se consideró el mejor caudal obtenido con agua residual tratada (0.25 l/s), como punto de partida.

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO AL 2% PESO

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la experimentación del proceso de absorción, usando como líquido de lavado una solución de hidróxido de sodio al 2 %, la cual se preparo con agua potable.

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS, USANDO DIFERENTES CAUDALES DE SOLUCIÓN DE NaOH AL 2%, EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN DE H₂S.

CORRIDA No	CAUDAL (l/s)	TIEMPO (min)	GASTO (litros)	H ₂ S (ppm)		REMOCIÓN (%)
				INICIAL	FINAL	
12	0.25	9	135	240	16	93.33
13	0.25	9	135	790	50	93.67
14	0.1987	9	109	750	56	92.53
15	0.1785	9	97	550	30	94.55
16	0.11	9	60	575	27	95.30

Analizando estos resultados se establece lo siguiente:

- a) Dado que se parte del mejor caudal obtenido de la experimentación con agua residual tratada, se observa que todos los porcentajes de remoción de H_2S con solución de NaOH al 2% peso, son mayores al 93 %, por lo que superan las expectativas obtenidas en comparación al proceso de absorción con agua residual tratada.
- b) La corrida No 12 presenta el porcentaje de remoción más alto, para un tiempo estipulado de 9 minutos. Sin embargo, se utilizó el caudal más alto de solución lavadora, con el correspondiente incremento del gasto aplicado (volumen) de dicha solución.
- c) La corrida No 13 es similar a la 12. Sólo que en este caso se partió de una concentración de alimentación inicial de H_2S superior a la utilizada en la corrida No 12. Y aunque se obtuvo un porcentaje alto de remoción, la concentración final de H_2S resulta relativamente alta. Además, el gasto total de la solución es igual a la corrida anterior, para el mismo tiempo de experimentación.
- d) En la corrida 15 se experimentó con una disminución de caudal. Dando como resultado un porcentaje de remoción similar a la corrida No 12, pero en un tiempo de experimentación de 12 minutos. Por otra parte la corrida No 15 aparece en la tabla anterior pero suspendida al minuto 9. En este caso la eficiencia es casi del 95% con un gasto de solución 28% menor que el usado en las corridas 12 y 13. Siendo la concentración de H_2S final, cercana a la requerida por la norma de referencia (30 vs 25 ppm).

- e) En el caso de la corrida No 16, se experimentó con el mínimo caudal que permite un buen funcionamiento del aspersor. Dando un porcentaje de remoción de H₂S superior al 95%, pero en un tiempo de 9 minutos. Con lo cual, el gasto total de la solución resulta 56% menor al usado en la corrida No 12. Ciertamente la concentración final del H₂S es casi el doble de la obtenida en la corriente No 12, pero el ahorro de volumen de solución gastada es importante. Por lo que el caudal óptimo de absorción de H₂S utilizando como líquido de lavado una solución de NaOH al 2% se encuentra cercano al caudal de 0.11 l/s.

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON SOLUCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO AL 2% PESO

A continuación se hará un breve resumen de los resultados obtenidos en la experimentación del proceso de absorción, usando como líquido de lavado una solución de hipoclorito de sodio al 2 %, preparado con agua potable.

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS, USANDO DIFERENTES CAUDALES DE SOLUCIÓN DE NaClO AL 2% PESO, EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN DE H₂S.

CORRIDA No	CAUDAL (l/s)	TIEMPO (min)	GASTO (litros)	H ₂ S (ppm)		REMOCIÓN (%)
				INICIAL	FINAL	
17	0.25	9	135	300	32	89.33
18	0.111	9	60	734	41	94.42
19	0.0961	9	52	300	25	91.67

Analizando estos resultados podemos establecer lo siguiente:

- a) Los porcentajes de remoción de H₂S usando solución de hipoclorito de sodio al 2% peso como líquido de lavado, son del orden del 89-94.5%
- b) La mayor eficiencia de remoción se obtuvo con un caudal de 0.1111 l/s (corrida 18).

- c) La corrida 19, confirma que a menor caudal de 0.1111 l/s la eficiencia de remoción tiende a bajar, y el ahorro de solución lavadora no es tan significativa (apenas un 13%).
- d) Dependiendo de las concentraciones iniciales de H₂S se tendrá un valor mínimo final, el cual puede ser relativamente alto para los fines que se persiguen: De hecho la corrida 18, con mayor porcentaje de remoción que las demás, tiene el valor más alto para la concentración final de H₂S. pero también la concentración inicial es superior al doble de las otras dos corridas.

Los mejores resultados obtenidos con cada una de las tres soluciones lavadoras; Agua residual tratada, Solución de Hidróxido de sodio y Solución de hipoclorito de sodio se presentan en la siguiente tabla.

**COMPARATIVO DE RESULTADOS OBTENIDOS CON TRES SOLUCIONES LAVADORAS
USADAS EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN DE H₂S**

SOLUCIÓN	CAUDAL (l/s)	TIEMPO (min)	GASTO (litros)	H ₂ S (ppm)		REMOCIÓN (%)
				INICIAL	FINAL	
Agua Residual Tratada	0.25	9	135	400	56	85.85
NaOH (2%)	0.11	9	60	400	19	95.30
NaCLO (2%)	0.11	9	60	400	22	94.42

Los resultados a escala real se presentan en la siguiente tabla resumen:

**RESUMEN COMPARATIVO DE LAS SOLUCIONES DE MAYOR EFICIENCIA DE LAVADO
EMPLEADAS PARA DISMINUIR LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO SULFHÍDRICO**

CONCEPTO Y/O PARÁMETROS	AGUA RESIDUAL TRATADA	SOLUCIÓN DE NaOH 2% PESO	SOLUCIÓN DE NaClO 2% PESO
CAUDAL DE LAVADO EXPERIMENTAL (l/s)	0.25	0.111	0.111
CAUDAL DE LAVADO A ESCALA REAL (1:2000) (l/s)	500	222.2	222.2
VOLUMEN TOTAL DE LAVADO EXPERIMENTAL (l)	135	60	60
VOLUMEN TOTAL DE LAVADO ESCALA REAL (m³)	270	120	120
TIEMPO TOTAL DE LAVADO (minutos)	9	9	9
CONCENTRACIÓN INICIAL DE H₂S(ppm)	400	400	400
CONCENTRACIÓN FINAL DE H₂S (ppm)	56	19	22
PORCENTAJE DE REMOCIÓN	86.00	95.3	94.5

El análisis de estos resultados se presenta en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO XV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos se desprende lo siguiente:

- a) La remoción de H_2S mediante el proceso de absorción es más eficiente cuando se realiza la absorción con reacción química, que cuando se utiliza una absorción netamente física.
- b) El empleo de reactivos químicos como solución de lavado garantiza la transformación del H_2S y por consiguiente disminuye el olor asociado a éste. Además, disminuye considerablemente el volumen de agua empleado para la remoción de gases contaminantes.
- c) Aunque el uso de la solución de hidróxido de sodio presenta una eficiencia relativamente mayor que la de hipoclorito, para el mismo caudal y tiempo de lavado, se recomienda emplear éste último ya que, es menos corrosivo que el hidróxido de sodio, de menor costo y más fácil de conseguir por el Sistema de Aguas.
- d) Además, el hipoclorito forma una niebla de cloro residual que impide la rápida formación y/o acumulación de ácido sulfhídrico, y tal efecto ocasiona que la concentración del gas, tarde más tiempo en superar las condiciones ambientales permitidas por la Norma Oficial Mexicana de referencia.
- e) Se determina que la generación de ácido sulfhídrico es continua no es permanente, ya que el volumen de gas generado es favorecido por la presencia de diferentes condiciones climáticas (temperatura, ausencia de lluvias) y de calidad del agua residual (elevadas concentraciones de materia orgánica biodegradable, sulfuros, así como pequeñas o nulas cantidades de oxígeno en el sistema; anaerobiosis), por tanto, los niveles de H_2S en una instalación de drenaje profundo no son constantes en estiaje y lluvias y su problemática difiere de un año a otro, razón por la cual, el presente trabajo demuestra la aplicabilidad de un sistema sencillo, práctico, económico y seguro para controlar la emisión de los gases a la atmósfera, restando definir el diseño final del sistema de lavado, el cual deberá ser fundamentado en un análisis histórico de las emisiones generadas en una

determinada instalación, que en este caso particular corresponden a la lumbrera 2 del interceptor centro–centro, en el periodo de observación y análisis de este estudio se detectaron niveles de H₂S de 200 a 600 ppm, presentando un promedio de los mismos más pequeños en el transcurso del tiempo.

- f) Adicionalmente, si en el sistema de control a construir se instalan equipos analizadores de H₂S que al detectar 50 a 100 ppm del citado gas, arranquen el sistema de lavado, se evitaría la acumulación de grandes cantidades o niveles de gas, minimizando considerablemente con esta medida el volumen de la solución de lavado a utilizar y por ende, las dimensiones del tanque y del equipo mecánico requerido.

CONCLUSIONES

Dado que las lumbreras son estructuras hidráulicas cuya finalidad es permitir la ventilación del sistema de drenaje profundo, el cual conduce las aguas residuales domésticas, industriales y pluviales, es de suponerse la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, así como la presencia de sulfatos. Por lo que la evaluación de las emisiones gaseosas del ácido sulfhídrico es importante, y dado que además de la producción de este gas, también puede generarse metano, es por tanto conveniente evaluar las condiciones de seguridad de la atmósfera en la lumbrera, puesto que ambos gases son explosivos, representando un riesgo de salud para la población, para el personal que les da el mantenimiento correspondiente y para las construcciones circunvecinas, por lo tanto se concluye que:

- Ø La remoción de H_2S mediante el proceso de absorción es más eficiente cuando se realiza la absorción con reacción química, que cuando se utiliza una absorción netamente física.
- Ø El empleo de reactivos químicos como solución de lavado garantiza la transformación del H_2S y por consiguiente disminuye el olor asociado a éste. Además, disminuye considerablemente el volumen de agua empleado para la remoción de gases contaminantes.
- Ø Es factible el uso de cualquiera de las tres soluciones lavadoras que corresponden a;
 - ✓ Agua residual tratada
 - ✓ Solución de NaOH 2% peso
 - ✓ Solución de NaClO 2% peso
- Ø Se determina el uso de agua residual tratada como primer medio de absorción ya que el Sistema de Aguas de la Ciudad de México tiene a su disposición el manejo, distribución y control del agua residual tratada.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) D.D.F. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. *El Sistema del Drenaje Profundo de la Ciudad de México*. Tomo único. Subdirección de Programación, 1996.
- 2) D.D.F. Asamblea de Representantes del Distrito Federal. *Reglamento del servicio de Agua y Drenaje para el Distrito Federal*. Diario Oficial de la Federación, 25 de Enero de 1990.
- 3) D.D.F. Secretaría de Obras y Servicios. *Memorias de las Obras del Sistema del Drenaje Profundo del Distrito Federal*. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Tomo I, II, III y IV. México D. F. 1975.
- 4) Frank N. Kemmer, John McCallion. *Manual del Agua, Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones*. Nalco Chemical Company, McGraw-Hill. 1994.
- 5) Gessner, G. Hawley. *Diccionario de Química y de Productos Químicos*. Ediciones Omega, S.A. Barcelona. 1993.
- 6) John Daintith. *A Dictionary of Chemistry*. Oxford University Press, printed in Great Britain by Clays Ltd, St Ives plc.
- 7) Julius Grant, Hackh 's. *Chemical Dictionary*. Mc Graw-Hill Book Company U.S.A.
- 8) Kennedy, W. *Odor Scrubbing*. In: Treatment Plant Odors-Control and Mitigation. Agency Managers Meeting, California Association of Sanitation Agencies, Sacramento, CA, January 27, 1984.
- 9) Pomeroy, R.D., J.D. Parkhurst, J. Livingston, and H.H. Bailey. *Sulfide Occurrence and Control in Sewage Collection Systems*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/X-85-052, Cincinnati, OH, 1985.

- 10) Robert H. Perry, Don W. Green, James O. Maloney. *Manual del Ingeniero Químico*. Ed. Interamericana de México, S. A. de C.V., 1992.
- 11) Robert P. G. Bowker, John M. Smith, Neil A. Webster. *Odor and Corrosión Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants*. Noyes Data Corporation, New Jersey, U.S.A. 1985.
- 12) Sawyer, C.N. and P.L. McCarty. *Chemistry for Sanitary Engineers*. Second Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1967.
- 13) Secretaría del Trabajo y Previsión Social, Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-1999, Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el ambiente laboral.
- 14) Sewell, R.J. *Sulfide Control in Sanitary Sewers Using Air and Oxygen*. NTIS No. PB-243894, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 1975.
- 15) Speece, R.E. and R. Orosco. *Design of U-Tube Aeration Systems*. Journal ASCE-SED 96 (SA3):715-725, 1970.
- 16) Thistlethwayte, D.K.B. *The Control of Sulphides in Sewerage Systems*, Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor, MI, 1972.
- 17) Turk Turk Wittes. *Ecología, Contaminación y Medio Ambiente*. Editorial Interamericana. 1972.
- 18) Yang, M.Y. and P.N. Cheremisinoff. *Wet Scrubbing for Odor Control*. In: Industrial Odor Technology Assessment, edited by P.N. Cheremisinoff and R.A. Young, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan, 1975.

ANEXO A

DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO
EXPERIMENTAL

El dispositivo que se empleo para el lavado del gas sulfhídrico, requiere para la experimentación de material de uso común que consiste en;

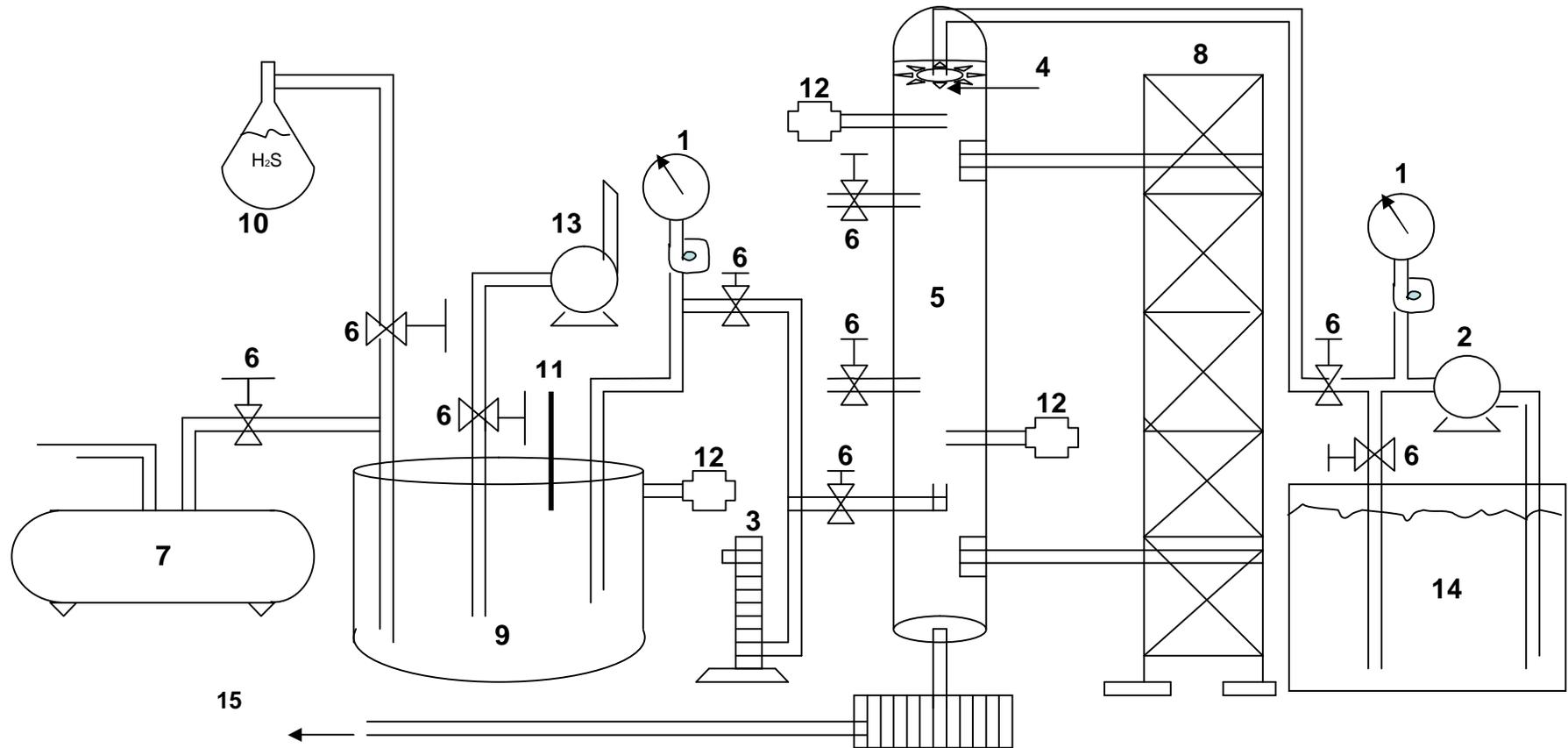
- Ø Tubería de P. V. C. transparente para la torre de lavado y tubería de P. V. C. hidráulico
- Ø Una bomba de vacío y una bomba centrífuga
- Ø Rotámetro de gases y dos manómetros
- Ø Un aspersor, un compresor y válvulas de paso
- Ø Tanque de almacenamiento
- Ø Matraz de reacción
- Ø Termómetro
- Ø Equipo analizador de gas Sulfhídrico
- Ø Estructura metálica para sujeción del la torre.

En lo que corresponde a las soluciones lavadoras, el agua residual tratada se transportó en un tinaco de 1200 l utilizando agua residual tratada de la planta de tratamiento de Coyoacán, el Hipoclorito de sodio es abastecido por carro tanque con la calidad que se utiliza en la cloración del agua potable con una concentración inicial de 12 mg/l, el hidróxido de sodio es de grado industrial y se tiene en existencia en almacén.

El esquema del dispositivo experimental se presenta en la siguiente página.

20.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA EL SISTEMA DE LAVADO DE GASES

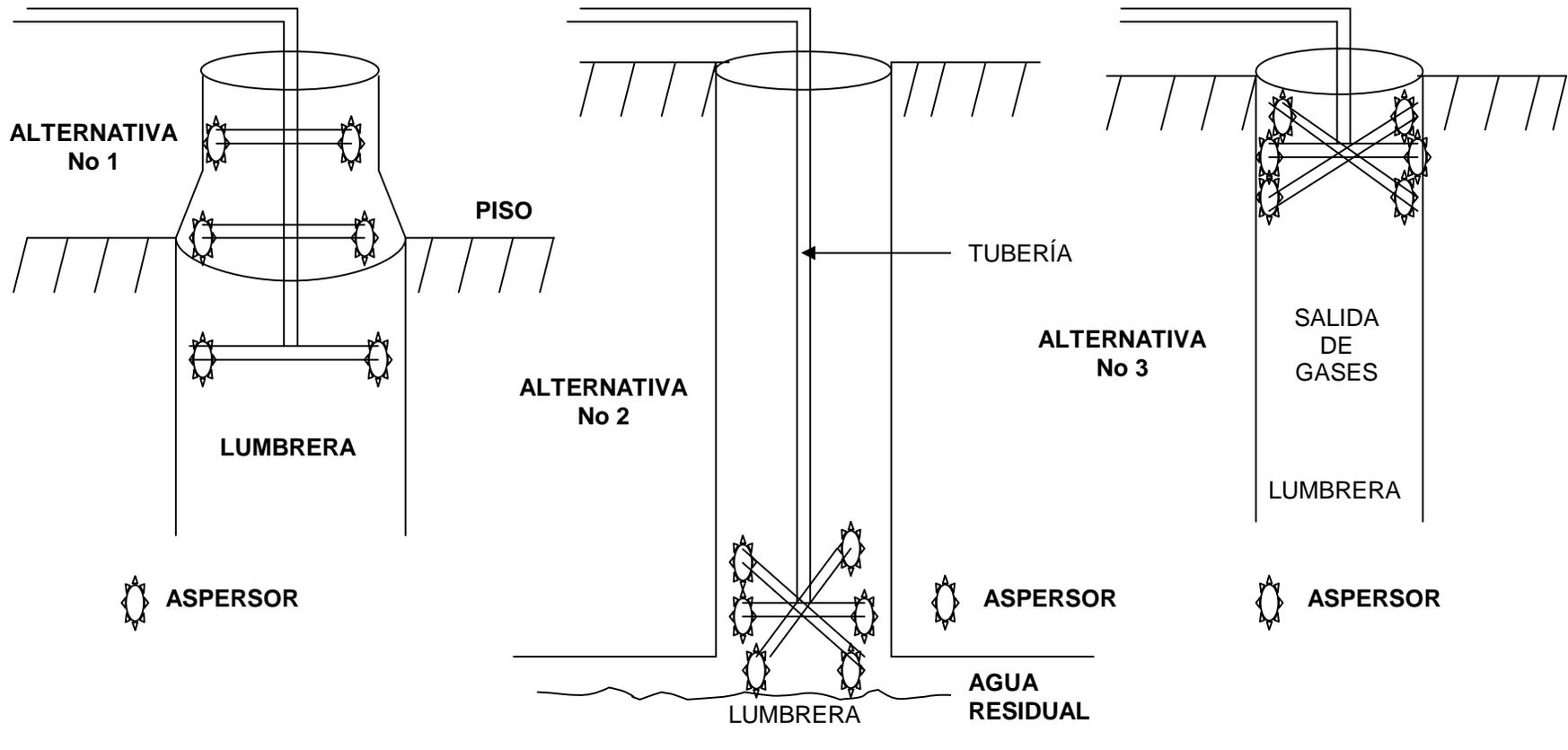


EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO:

1. MANÓMETRO	4. ASPERSOR	7. COMPRESOR	10. MATRAZ DE REACCIÓN	13. BOMBA DE VACÍO
2. BOMBA CENTRÍFUGA	5. COLUMNA DE LAVADO	8. TORRE DE SUJECCIÓN	11. TERMÓMETRO	14. SOLUCIÓN DE LAVADO
3. MEDIDOR DE FLUJO	6. VÁLVULA DE PASO	9. TANQUE DE ALMACENAMIENTO	12. EQUIPO PARA MEDIR H ₂ S	15. DRENAJE

En la siguiente página se expone, de manera gráfica, un planteamiento de los diferentes arreglos conceptuales para la instalación del sistema de lavado, enumerando las ventajas y desventajas más evidentes de cada opción, resultando en forma preliminar, la alternativa 1, que consiste en la adaptación de una campana (de concreto o acero al carbón tratada adecuadamente para soportar el nivel de corrosión producido por el contacto con el ácido sulfhídrico), pues aunque demanda la construcción de una estructura adicional, ésta no es muy costosa e induce la canalización de los gases hacia un mismo punto, minimizando la probabilidad de fugas de las emisiones y proporcionando una óptima operación de lavado.

1. **PROPUESTAS DE TIPOS DE ARREGLOS PARA LA INSTALACIÓN DE LOS ASPERSORES**



El análisis de estas propuestas se hace en la siguiente página

ANÁLISIS DE LAS PROPUESTAS PARA LA INSTALACIÓN DE LOS ASPERSORES

ALTERNATIVAS	VENTAJA	DESVENTAJA
1	<ul style="list-style-type: none"> a) Disminución del número de aspersores. b) Optimización de la zona de control. c) Mayor eficiencia de remoción de H₂S. 	<ul style="list-style-type: none"> 1) Construcción y adaptación de estructuras de concreto y/o acero al carbón adicionales. 2) Posible acumulación de H₂S en la parte intermedia de la lumbrera.
2	<ul style="list-style-type: none"> a) Evita la construcción de estructuras adicionales. 	<ul style="list-style-type: none"> 1) Aumento del número de aspersores requeridos. 2) Posibilidad de fugas de pequeñas concentraciones de H₂S a la atmósfera.
3	<ul style="list-style-type: none"> a) Se impide el ascenso de los gases hacia la superficie. b) Se minimiza la concentración crítica de H₂S. 	<ul style="list-style-type: none"> 1) Requerimiento de mayor infraestructura hidráulica. 2) Dificultad y aumento de costo para mantenimiento del sistema. 3) Inhabilitación del sistema por incremento del nivel de agua en época de lluvia

Nota: En todas las opciones se deberá calibrar el sistema para iniciar el lavado en presencia de 15-50 ppm de H₂S.

ANEXO B

PLANTEAMIENTO PARA EL SISTEMA QUE
EMPLEA HIPOCLORITO DE SODIO AL 2% PESO
COMO SOLUCIÓN DE LAVADO

En este anexo, se presenta una propuesta del sistema de lavado de gases utilizando hipoclorito de sodio al 2% como solución de lavado, los aspectos contemplados son los siguientes:

- Ø La dimensión del tanque de almacenamiento de la solución lavadora es acorde a la superficie disponible en el predio de la lumbrera No. 2 del interceptor centro-centro.

- Ø Teóricamente la operación del sistema es intermitente, con el arranque del sistema con la presencia de 400 ppm de H₂S, razón por la que una vez que se realice el primer lavado, el sistema podrá estar en reposo hasta que se genere y acumule dicha concentración del gas, lo cual puede durar varias horas ya que el lavado con solución de hipoclorito de sodio provee de una niebla con cloro residual, inhibiendo los componentes del gas que van ascendiendo, desfasando la acumulación de la concentración crítica, o bien si al sistema se le instalan equipos analizadores de H₂S que al detectar 15-50 ppm del citado gas, arranquen el sistema de lavado, se evitaría la acumulación de grandes cantidades o niveles de gas, minimizando considerablemente con esta medida el volumen de la solución de lavado a utilizar y por ende, la dimensión del tanque y el equipo mecánico requerido. Las pérdidas de carga de los aspersores fueron supuestas, dado que el proveedor de este accesorio no proporciono los datos técnicos necesarios.

En el cálculo de la bomba de lavado, la potencia resultante fue de 18 HP, pero sin embargo se pueden utilizar 2 bombas de 10 HP operando en paralelo ó una de 20 HP. De cualquier forma, se sugiere instalar un equipo de repuesto.

Primeramente para la determinación del diámetro de la tubería de la línea que alimentará al sistema de aspersion para el lavado de gases, se tiene la información siguiente:

De los datos obtenidos en la experimentación, se conoce que el caudal de Hipoclorito de sodio necesario en el sistema es de: **222 l/s**

Entonces la dimensión del tanque de almacenamiento de la solución de lavado es:

Volumen (V) = $Q_a * t * \text{Factor de escala real}$

En donde;

$$t = 7 \text{ min}$$

$$Q_a = 0.1111 \text{ l/s}$$

$$\text{Fac. de escala real} = 2000$$

$$\text{Fac. de conversión} = 60 \text{ s/min}$$

Sustituyendo valores;

$$\mathbf{V = 93324 \text{ l} \quad \text{ó} \quad 93.324 \text{ m}^3}$$

Para la determinación de las dimensiones del tanque de almacenamiento fue necesario tomar en cuenta el área del terreno que se tiene disponible en la lumbreira, por lo que el arreglo es el siguiente;

Cálculo del área del tanque:

$$A = V / h$$

$$h \text{ propuesta} = 3 \text{ m}$$

Sustituyendo valores;

$$\mathbf{A = 31.108 \text{ m}^2}$$

Determinación de la longitud y el ancho del tanque:

Sugiriendo que el tanque de almacenamiento tenga una forma cuadrada;

$$A = L * a \quad \text{Donde:} \quad L = a \quad \text{Por lo tanto;}$$

$$a = (A)^{1/2}$$

Sustituyendo valores;

$$\mathbf{a = 5.58 \text{ m de ancho}}$$

$$\mathbf{L = 5.58 \text{ m de largo}}$$

Cálculo de la potencia de la bomba y del diámetro de la tubería:

De acuerdo al Manual de Hidráulica de Acevedo, la velocidad media en tuberías de corta extensión generalmente es de 3 m/s. por lo que el área de la tubería se calcula de la forma siguiente;

$$A = Q/v$$

En donde;

A = Área de la tubería (m²)

Q = Caudal = 222.2 l/s =

v = Velocidad media = 3 m/s

Sustituyendo valores;

$$A = (0.2222 \text{ m}^3/\text{s}) / (3 \text{ m/s}) = 7.40666\text{E-}02 \text{ m}^2 = 740.666 \text{ cm}^2$$

$$A = \pi * R^2$$

$$R = (A/\pi)^{1/2} = 15.3545 \text{ cm}$$

Por lo que el diámetro de la tubería es igual a:

$$D = 2 * R = 30.709 \text{ cm} = 12 \text{ in}$$

Determinación de la pérdida de carga:

Utilizando la formula de Darcy:

$$H_f = f * (L * v^2) / D * 2g$$

del manual de hidráulica de Acevedo, en la tabla 12.3, el valor del coeficiente de fricción en función del diámetro de tubería y la velocidad media del flujo es de;

f = Coeficiente de fricción = 0.017

v = Velocidad media = 3 m/s

D = Diámetro de descarga = 0.30709 m

g = Constante gravitacional = 9.81 m/s²

L = Longitud equivalente = 163.244 m

Cálculo de la longitud equivalente "l"

CONCEPTO	EQUIVALENTE	DIÁMETRO (m)	No	SUBTOTAL (m)
ENTRADA EN TUBERÍA	17	0.33268	1	5.655
SALIDA DE TUBERÍA	35	0.30709	1	10.748
VÁLVULA DE COMPUERTA	8	0.1778	1	1.4224
ASPERSOR CÓNICO 1"	400	0.0254	10	101.6
CODOS 90°	45	0.30709	2	13.819
TUBERÍA				30
TOTAL				163.244

Entonces sustituyendo valores;

$$H_f = 0.017 (163.244 \cdot (3^2)) / 0.30709 \cdot 2 \cdot 9.81 = 4.145 \text{ m}$$

Por otro lado, la altura de descarga de la alimentación es de 3.0 m entonces la carga dinámica total es;

$$H_t = H_f + h = 4.145 \text{ m} + 3 \text{ m} = 7.145 \text{ m}$$

Ahora bien para calcular la potencia, utilizaremos la formula;

$$P = (\rho \cdot Q \cdot H_t) / 75 \text{ n}$$

En donde:

P = Potencia (HP)

γ = Peso Específico = 1000 Kg/m³

Q = Caudal de lavado = 0.2222 m³/s

Ht = Carga dinámica total = 7.145 m

n = Eficiencia de la bomba = 0.7

Sustituyendo valores:

CONCEPTO	VALOR
POTENCIA DE LA BOMBA	18 HP
DIÁMETRO DE LA TUBERÍA	12 in

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México dentro de su estructura administrativa tiene la Unidad Departamental de Construcción y Diseño y la Unidad Departamental de Adquisiciones, por tal motivo no se contempla el diseño de los equipos ni la cotización de los mismos ya que no son parte de los objetivos planteados.

ANEXO C

ÁLBUM FOTOGRÁFICO

FOTO 1. COMPUERTA DE CONTROL

Parte superficial de una lumbrera, en donde se aprecian la estructura metálica conocida como “compuerta de control”, su función consiste en detener el paso del agua residual, cuando se requiere realizar actividades de mantenimiento.

FOTO 2. CARBÓN ACTIVADO EN LAS REJILLAS DE LA COMPUERTA DE CONTROL

En la compuerta de control es necesario cubrir las rejillas existentes con una capa de carbón activado, para evitar que los gases generados en el interior de la lumbrera dañen por corrosión las estructuras metálicas y al mismo tiempo evitan que el mal olor se disperse en la superficie de la zona donde se encuentra ubicada, el espesor varía entre 15 y 30 cm.

FOTO 3. CHIMENEA DE CONCRETO EN UNA LUMBRERA

La estructura de concreto identificada como chimenea, tiene la función de conducir los gases generados en el interior de la lumbre hacia el exterior con la finalidad de diluir la concentración con el aire del ambiente, su altura es variable (de 8 m en adelante), depende generalmente de la altura de las casas habitación que se ubican en la zona.

FOTO 4. INTERIOR DE LA CHIMENEA

En el interior de la chimenea por el recorrido de los gases, se aprecia el desgaste en las paredes por corrosión, no existiendo ningún medio de protección.

FOTO 5. CAMA DE CARBÓN ACTIVADO EN EL INTERIOR DE LA CHIMENEA

Por la ineficiencia de la chimenea para mitigar los malos olores, fue necesario cubrir la parte baja de la misma con carbón activado, las manchas blanquecinas son señal de la saturación que como ya se ha mencionado se alcanza rápidamente por las grandes cantidades de gases generados.

FOTO 6. CAMA DE CARBÓN ACTIVADO

La propuesta de usar carbón activado como medida de control para los malos olores generados principalmente por el ácido sulfhídrico a sido insuficiente, ya que éste no es selectivo por lo que su saturación se alcanza rápidamente y por el momento no se ha realizado un estudio a detalle para conocer la forma de optimizar su uso.

FOTO 7. EFECTOS DE CORROSIÓN EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

Los trabajos de mantenimiento en el interior de las lumbreras se han incrementado en los últimos años debido a los efectos de corrosión, por lo que es necesario realizar un estudio a fondo de este problema, ya que el presente estudio no lo contempla en sus objetivos.

FOTO 8. EFECTOS DE CORROSIÓN EN LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

Las compuertas metálicas que permiten el control de los flujos de agua residual, son las principales estructuras que son afectadas por los efectos de corrosión, las grandes cantidades de desechos orgánicos son los factores principales en la generación de gases corrosivos.

FOTO 9 y 10. LAS REJILLAS PERMITEN DAR MANTENIMIENTO EN EL INTERIOR DE UNA LUMBRERA



En algunas lumbreras es retirado el carbón activado para realizar actividades de mantenimiento, esto permite la salida del ácido sulfhídrico al ambiente de trabajo, ocasionando molestias de salud al personal operativo por las altas concentraciones.

FOTO 11 y 12. LAS REJILLAS PERMITEN INGRESAR AL INTERIOR DE UNA LUMBRERA



En el interior de la lumbrera se realizan actividades de mantenimiento, medición de flujos y alturas del caudal así como el retiro de sólidos que obstruyen la circulación de las aguas residuales y azolvan las compuertas.

GLOSARIO

Agua pluvial: la generada por la precipitación de los condensados de vapor atmosférico.

Agua residual: el líquido de composición variada, resultante de cualquier uso primario del agua por el que haya sufrido degradación original.

Agua residual tratada: el líquido de composición variada, resultante de un conjunto de operaciones y procesos de tratamiento, ya sea primario, secundario o terciario.

Alcantarillado: la red o sistema de conductos y dispositivos para coleccionar y conducir las aguas residuales y pluviales al drenaje.

Canal o cauce abierto: conducto superficial natural o artificial que recoge, conduce, transporta y desaloja agua.

Captación: Estructura de concreto que permite ingresar las aguas residuales de los colectores, canales, ríos, u otro medio que transporte agua residual al drenaje profundo.

Caudal o flujo: el volumen de agua conducida en la unidad de tiempo.

Colector: Conducto principal en donde convergen aguas pluviales y residuales de la red secundaria de drenaje.

Desazolve: extracción de residuos sólidos acumulados en tuberías, pozos, lagos, lagunas, presas drenaje profundo y en general en cualquier estructura hidráulica natural y artificial.

Descarga: las aguas residuales y pluviales que se vierten en el sistema de alcantarillado y drenaje.

Drenaje: sistema de caños o tubos de diversos diámetros para el retiro de desechos y aguas que capta la red de alcantarillado.

Lumbrera: estructura para el acceso a túneles.

Norma Oficial Mexicana: la expedida por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

Planta de tratamiento: instalación compuesta de un conjunto de unidades de proceso que depuran las aguas residuales a fin de reutilizarse de conformidad con las normas de salud y ecológicas establecidas.

Pozo de visita: estructura hidráulica que permite el acceso al drenaje primario, secundario o colector.

Red primaria de drenaje: sistema de tuberías cuyo diámetro es igual o mayor a 60 cm.

Red secundaria de drenaje: sistema de tuberías cuyo diámetro es menor de 60 cm., y en el cual se conectan las tomas de los usuarios.