

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS EMISIONES DE FENOL, EN UN
REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO A PISTÓN HACIENDO USO DEL MODELO
WATER9**

IVONNE ANGULO DE CASTRO

DANIEL ALIRIO MOJICA CORDOBA

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTÁ D.C.

2009

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS EMISIONES DE FENOL, EN UN
REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO A PISTÓN HACIENDO USO DEL MODELO
WATER9**

IVONNE ANGULO DE CASTRO

DANIEL ALIRIO MOJICA CORDOBA

**Trabajo de Grado presentado para optar al Título de
Ingeniero Ambiental y Sanitario**

Director

HUGO SARMIENTO VELA

Químico MSc. Universidad Nacional de Colombia

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTÁ D.C.

2009

Nota de aceptación

Director: Hugo Sarmiento Vela
Químico MSc.

Jurado: Ing. Pedro Miguel Escobar

Jurado: Ing. Diana Ortiz

Bogotá D.C. 4 de Septiembre 2009

A Dios, gracias por iluminar mi camino, por poner personas tan valiosas en mi vida como Rocío, Jessica y Cristina quienes me ayudaron a levantarme cuando perdí mi fortaleza, especialmente a mi hermana, por enseñarme a no renunciar a mis sueños. A mi abuela, por darme la oportunidad de compartir este triunfo con ella y a mi Abuelo, que desde el cielo se que me acompaña en mi camino.

IVONNE

En primera instancia a Dios todo poderoso, mi señor, que día a día esta conmigo y me acompaño en el proceso para alcanzar esta gran meta. A mi madre Hilda Maria Cordoba, que con gran esfuerzo, tenacidad, trabajo, amor y sus consejos me dio la oportunidad de ser una mejor persona.

A mi novia Ángela herrera, que con su compañía, apoyo, amor y su forma de ver la vida, apporto grandes cosas para culminar este proceso. Finalmente a todas aquellas personas como: profesores, compañeros de estudio, amigos que conocí, conviví, compartí y pasaron a lo largo de mi vida universitaria, a todos y todas mil gracias.

DANIEL

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de investigación de la Universidad de la Salle “Análisis comparativo entre medios de soporte fijo (guadua y espuma con plantas macrófitas) y medios de soporte fijo únicamente, en reactores de flujo a pistón para remoción de fenoles y materia orgánica en aguas residuales” por abrirnos un espacio de trabajo para nuestro estudio.

A Hugo Sarmiento Vela, por dirigirnos, orientarnos y acompañarnos en este trabajo y por sus valiosos aportes. A la ingeniera Rosalina Gonzalez y al ingeniero Oscar Contento por proporcionarnos un espacio en el laboratorio y brindarnos las herramientas de trabajo para nuestro proyecto, a todos los monitores del laboratorio por su colaboración, y en especial a nuestros familiares y amigos incondicionales agradecemos su compañía y respaldo durante el desarrollo de esta labor.

Agradecemos a Dios por ponernos en este camino.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	6
SUMMARY	8
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	11
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2. ANTECEDENTES	12
3. MARCO TEÓRICO	19
3.1 PROCESOS ANAEROBIOS	19
3.1.1 Mecanismos de la digestión anaeróbica	20
3.1.2 Procesos de tratamiento anaerobio	21
3.1.2.1 Reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP)	21
3.1.2.2 Planta de tratamiento de la Universidad De La Salle	22
3.2 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES	24
3.2.1. Fenoles	24
3.2.1.1 Información toxicológica	28
3.2.2 Transporte, distribución y transformación en el ambiente	30
3.2.3 Bioquímica del fenol.....	32
3.3 RUTAS DE ELIMINACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES	33
3.3.1 Volatilidad de los solutos orgánicos disueltos	35
3.3.1.1 Presión de vapor	36
3.3.1.2 Constante de Henry	36
3.4 BALANCE DE MASAS	37
3.5 MODELACIÓN MATEMÁTICA EN INGENIERÍA.....	39

3.5.1 Modelos de emisión y emisiones atmosféricas para residuos y aguas residuales	40
3.5.1.1 WATER9.....	41
3.6 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	42
3.6.1 Localización	42
3.6.2 Contaminación atmosférica en la localidad	43
4. MARCO LEGAL.....	45
5. METODOLOGÍA.....	48
5.1 METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA MATRIZ AIRE	48
5.1.1 Selección de la metodología para la toma de muestras de aire	48
5.1.2 Acondicionamiento del reactor para el muestreo	49
5.1.3 Pruebas preliminares para del monitoreo de aire	50
5.1.4 Selección de la metodología de análisis de muestras de aire	50
5.1.4.1 Pre-tratamiento de las muestras de aire.....	50
5.1.4.2 Análisis de las muestras de aire	51
5.1.4.3 Cálculo de las concentraciones de fenol en las muestras de aire.....	52
5.1.4.4 Estimación de las emisiones de fenol.....	53
5.1.5 Diseño de un biofiltro para el manejo de los gases.....	53
5.2 METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA MATRIZ AGUA	54
5.2.1 Selección de la metodología para la toma de muestras de agua	54
5.3 METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL REACTOR	54
5.3.1 Preparación de las muestras de lodo	55
5.3.1.1 Determinación de la concentración de fenol en el lodo	55
5.3.2 Preparación de las espumas de poliuretano	55
5.3.3 Determinación de la concentración de fenol en el medio soporte	56
5.3.4 Diagnóstico del funcionamiento del reactor	58
5.3.4.1 Determinación de las eficiencias de remoción en el reactor.....	58
5.3.4.2 Determinación de la constante de remoción de DBO.....	58
5.4 CONTROLES DE CALIDAD	59
5.4.1 Controles en campo	59
5.4.2 Almacenamiento y transporte de las muestras	60

5.4.3 Análisis de laboratorio	61
5.5 BALANCE GLOBAL DE MASAS PARA EL FENOL	61
5.5.1 Configuración del sistema	61
5.6 MODELO DE EMISIONES WATER9	65
5.6.1 Pruebas pre-experimentales con el programa WATER9	65
6. RESULTADOS	67
6.1 RESULTADOS DE LA MATRIZ AIRE	67
6.1.1 Concentraciones de fenol en las muestras de aire	67
6.2 RESULTADOS DE LA MATRIZ AGUA.....	68
6.2.1 Caracterización del reactor	68
6.3 CONCENTRACIÓN DE FENOL EN EL REACTOR.....	69
6.3.1 Concentración de fenol en el medio de soporte	69
6.3.2 Concentración de fenol en el lodo	69
6.4 DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR	70
6.4.1 Eficiencias de remoción	70
6.4.2 Constante de remoción de DBO	71
6.4.3 Producción de lodos en el reactor.....	72
6.5 BALANCE DE MASAS.....	72
6.6 EJECUCIÓN DEL MODELO WATER9	73
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
7.1 COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE FENOL	75
7.1.1 Estimación de datos faltantes	75
7.1.2 Determinación del tipo de distribución en las emisiones de fenol	76
7.1.3 Posibles efectos de las emisiones a la salud humana	77
7.2 CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES	77
7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO VS EMISIONES DE FENOL ESTIMADAS EN CAMPO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO WATER9	80
7.3.1 Comparación de medias.....	81
7.3.2 Ventajas y desventajas encontradas en el modelo	83

7.4 BALANCE DE MASAS	84
7.5 DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR	85
7.5.1 Eficiencias de remoción	85
7.5.2 Comparación de eficiencias	86
CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	98

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Relación estequiométrica en reacciones redox para la degradación del fenol.....	20
Tabla 2. Mecanismos de la digestión anaeróbica.....	20
Tabla 3. Parámetros típicos de diseño de un RAP	22
Tabla 4. Actividades de los laboratorios de la Clínica Veterinaria	23
Tabla 5. Algunas propiedades químicas y físicas del fenol	25
Tabla 6. Ejemplos de biodegradabilidad en función de la relación DBO ₅ /DQO....	28
Tabla 7. Efectos a la salud humana por exposición al fenol	29
Tabla 8. Límites de exposición Ocupacionales al fenol	29
Tabla 9. Interacciones del fenol en los medios.....	31
Tabla 10. Reacciones de transformación mediadas por bacterias.....	32
Tabla 11. Algunas rutas de eliminación de compuestos orgánicos	34
Tabla 12. Importancia de algunas rutas en sistemas de tratamiento de agua residual	35
Tabla 13. Clasificación de volatilidad de las sustancias	36
Tabla 14. Relación de la normatividad colombiana aplicable	46
Tabla 15. Límites permisibles establecidos en la normatividad	47
Tabla 16. Niveles de referencia límites de exposición ocupacional al fenol	47
Tabla 17. Métodos para la detección del fenol en el aire	48
Tabla 18. Métodos de muestreo y análisis	54
Tabla 19. Supuestos base para la elaboración del balance global de masas	64
Tabla 20. Resultados de la caracterización preliminar	69
Tabla 21. Sumatoria de cargas de emisión de fenol	72
Tabla 22. Resultados de emisiones estimadas por el modelo WATER9.....	74
Tabla 23. Estimación de datos faltantes en las Cargas horarias de fenol	75
Tabla 24. Prueba de <i>Kolmogorov-Smirnov</i> sobre las cargas horarias de fenol volatilizado	77

Tabla 25. Prueba de <i>Kolmogorov-Smirnov</i> sobre las variables del sistema	78
Tabla 26. Coeficiente de correlación de <i>Pearson</i>	79
Tabla 27. Coeficiente de correlación de <i>Spearman</i>	79
Tabla 28. Comparación de datos de emisión medidos en campo y arrojados por el modelo	80
Tabla 29. Prueba de <i>Kolmogorov-Smirnov</i> sobre las cargas diarias de fenol volatilizado	82
Tabla 30. Prueba de <i>Levene</i> sobre las cargas diarias de fenol volatilizado.....	82
Tabla 31. Descriptivos de los categorías de carga analizadas. Prueba <i>U de Mann-Whitney</i>	83
Tabla 32. Prueba <i>U de Mann-Whitney</i> para las cargas de volatilización de fenol	83
Tabla 33. Prueba de <i>Kolmogorov-Smirnov</i> sobre la comparación de eficiencias de fenol	86
Tabla 34. Prueba de <i>Levene</i> sobre las eficiencias de fenol	86
Tabla 35. Descriptivos del tipo de eficiencias analizadas. Prueba <i>T de Student</i> ...	87
Tabla 36. Prueba <i>T de Student</i> para las eficiencias de Fenol	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Planta de tratamiento de la Clínica Veterinaria – Sede La Floresta	24
Figura 2. Esquema de la ruta de degradación anaerobia de compuestos aromáticos	33
Figura 3. Balance teórico de DQO en un sistema anaerobio	39
Figura 4. Localización de la Universidad de la Salle – Sede La Floresta	43
Figura 5. Localización de la estación de monitoreo	44
Figura 6. Acondicionamiento del reactor para el muestreo.....	49
Figura 7. Montaje de destilación	50
Figura 8. Método fotométrico de Nanocolor®.....	51
Figura 9. Visualización de las variables empleadas en las ecuaciones	52
Figura 10. Destilación de lodos anaerobios	55
Figura 11. Pre-tratamiento de las espumas de poliuretano	56
Figura 12. Visualización de las variables empleadas en el método de extracción de espumas	57
Figura 13. Configuración del sistema para el balance teórico	62
Figura 14. Esquema del balance de masas teórico	62
Figura 15. Unidades evaluadas para la ejecución del modelo WATER9	66

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Disociación del fenol en el agua	26
Ecuación 2. Reacción del fenol con Hidróxido de sodio	27
Ecuación 3. Tasa o velocidad del proceso	33
Ecuación 4. Vida Media	34
Ecuación 5. Vida Media expresada en una ecuación de segundo orden	34
Ecuación 6. Constante de la ley de Henry	37
Ecuación 7. Variación de la materia entre la salida y entrada de un sistema	38
Ecuación 8. Balance de masas en un sistema no conservativo	38
Ecuación 9. Variable de reacción dentro del sistema	38
Ecuación 10. Producción de Lodos.....	39
Ecuación 11. Concentración real de las muestras	52
Ecuación 12. Masa de fenol [mg].....	52
Ecuación 13. Volumen de Aire [L].....	53
Ecuación 14. Concentración de fenol en el aire [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].....	53
Ecuación 15. Emisión de fenol	53
Ecuación 16. Concentración de Fenol en la espuma	56
Ecuación 17. Masa de fenol en la cámara	56
Ecuación 18. Masa de fenol total en el medio de soporte	57
Ecuación 19. Eficiencia de remoción	58
Ecuación 20. Eficiencia de remoción de fenol	58
Ecuación 21. Masa de Fenol a la salida del reactor	58
Ecuación 22. Modelo de remoción de DBO	58
Ecuación 23. Curva de calibración	61
Ecuación 24. Masa de fenoles en el afluente	63

Ecuación 25. Masa de fenoles en el efluente	63
Ecuación 26. Masa Fenol volatilizado	63
Ecuación 27. Masa Fenol en medio soporte	63
Ecuación 28. Masa Fenoles en los lodos	63
Ecuación 29. Masa Fenoles en el reactor	64
Ecuación 30. Ecuación general balance.....	64

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Resultados del monitoreo de aire. Lunes 02 de Marzo de 2009.....	67
Gráfica 2. Resultados del monitoreo de aire. Martes 10 de Marzo de 2009.....	68
Gráfica 3. Resultados del monitoreo de aire. Lunes 16 de Marzo de 2009.....	68
Gráfica 4. Eficiencia de Remoción de DBO y DQO	70
Gráfica 5. Eficiencia de remoción de fenol	71
Gráfica 6. Constante de Remoción K	71
Gráfica 7. Diagrama de dispersión de variables. Correlación de datos.....	79
Gráfica 8. Comparación de valores de fenol experimentales y modelados	81

GLOSARIO

ABSORCIÓN: es la incorporación de una sustancia en un estado a otro de un estado diferente.

ADSORCIÓN: es la adhesión o unión de los iones y moléculas en la superficie de otra molécula

BLANCO (BK): es un sistema físico que no contiene muestra real y por consiguiente no debería contener el analito de interés, pero que debe contener todos los reactivos que se utilizan en el método de análisis, y ser sometido a las mismas condiciones y al mismo procedimiento que las muestras reales y los estándares. En lugar de muestra, el volumen faltante se completará con agua grado reactivo.

COMPUESTO ALQUILFENOLICO: son compuestos químicos que derivan de los hidrocarburos aromáticos como el fenol y se encuentran sustituidos por uno o varios grupos alquilo. Químicamente son compuestos muy similares al fenol, caracterizado por la influencia del grupo hidroxilo y su estructura aromática, son compuestos medianamente ácidos, forman sales con metales, como el sodio y el potasio, solubles en agua, y su grupo hidroxilo les imparte una gran reactividad, principalmente para reacciones de sustitución con halógenos, nitrato o con ácido sulfúrico. Estos compuestos son rápidamente oxidables formándose como producto quinonas e hidroquinonas y ácidos hidroxibenzoicos, dependiendo del agente oxidante que se utilice. Algunos de los compuestos alquilfenólicos importantes son los cresoles, xilenoles (dimetilfenoles) y etilfenoles.

CURVA DE CALIBRACIÓN: Función matemática producida por la regresión de las respuestas del detector registradas durante la calibración de un instrumento. La función describe las respuestas del detector sobre cantidades conocidas de una sustancia a lo largo de un rango de concentraciones y es utilizada para predecir la concentración de una muestra desconocida.

DBO: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es usualmente definida como la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias para estabilizar la materia orgánica que puede descomponerse bajo condiciones aeróbicas. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un parámetro ampliamente utilizado para evaluar el grado de contaminación de residuos domésticos e industriales en

términos de la cantidad de oxígeno que requeriría si fuese descargada si fuese descargada en fuentes acuíferas en las cuales existen condiciones aeróbicas

DQO: la demanda química de oxígeno (DQO) es ampliamente utilizada para la medición de la fuerza o intensidad de la materia orgánica de residuos industriales o domésticos. Esta prueba permite caracterizar los residuos en términos de la cantidad total de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica hasta dióxido de carbono y agua basándose en el hecho de que todos los compuestos orgánicos, con pequeñas excepciones, pueden ser oxidados bajo la acción de agentes oxidantes fuertes en condiciones ácidas.

EFEECTO TÓXICO: se define como efecto tóxico o respuesta tóxica, cualquier desviación del funcionamiento normal del organismo que ha sido producida por la exposición a sustancias tóxicas.

EMBALSE DE SUPERFICIE: en calidad de agua, hace referencia al tratamiento, almacenamiento o disposición de residuos líquidos peligrosos en áreas descubiertas donde se encuentran tanques, lagunas, estanques, o depresiones en el suelo, sean topográficas o hechas por el hombre. En otras palabras, es un área demarcada en la superficie del suelo para el almacenamiento y tratamiento de dichos residuos, son empleadas comúnmente para volatilizar y/o sedimentar elementos presentes en el agua.

EXACTITUD: es el grado de aproximación entre el valor obtenido experimentalmente y el valor real o aceptado; normalmente se expresa en términos de error. Se tienen como referencia los patrones preparados en el laboratorio. La concentración de estos patrones, debe estar localizada dentro del rango de aplicación del método.

- Error absoluto: es la diferencia entre el valor obtenido y el valor esperado, pero a diferencia de la precisión el signo es un indicador muy importante porque muestra si hay tendencias en el resultado.

$$Error_{abs} = (X_i - X_a)$$

- Error relativo: está definido por el porcentaje del error absoluto con relación al promedio

$$Error_{relativo} = \frac{(X_i - X_a)}{\bar{X}} * 100$$

EXPOSICIÓN: es el contacto de una población o individuo con un agente químico o físico, es aquella que ocurre en el límite externo visible del cuerpo

que a su vez se define como todas las entradas al cuerpo tales como la boca, fosas nasales lesiones en la piel.

LÍMITE DE DETECCIÓN (LD): es la más pequeña cantidad detectable por encima del ruido de un procedimiento y dentro de un límite declarado de aceptación; éste último se establece de modo que las probabilidades de que se presenten errores de tipo I (falso positivo) y II (falso negativo) sean razonablemente pequeñas. Se emplearon dos tipos de LD:

- Límite de detección del método (LDM): concentración mínima que, cuando se procesa a través del método completo, produce una señal con una probabilidad del 99% de ser diferente del blanco puede ser medida con una exactitud y una precisión aceptables
- Límite de detección instrumental (LDI): concentración de un analito que produce una señal superior a cinco veces la relación señal/ruido del instrumento

LINEALIDAD: parámetro para estandarización de métodos analíticos, el cual se refiere a la proporcionalidad entre la concentración y la señal producida por el instrumento y se debe verificar si en el laboratorio se cumple el rango y tipo de linealidad que reporta la literatura del método.

MINERALIZACIÓN: es la degradación total de un compuesto a sus formas más simples de acuerdo al medio en el que ocurren las reacciones. Durante los tratamientos biológicos los compuestos orgánicos contaminantes son removidos por medio de una conversión a nivel celular dando como resultado, generalmente productos de mineralización. En el caso del fenol en medio anaerobio, la mineralización total lleva a producir CO_2 y CH_3

PARTICIÓN / SORCIÓN: se refiere a la acción de absorción o adsorción. Como tal, es el efecto de los gases o líquidos que se incorporen a un material de un estado diferente y se adhieran a la superficie de otra molécula.

PRECISIÓN: indica el grado de concordancia entre los resultados obtenidos para réplicas de una misma muestra, aplicando el mismo procedimiento experimental bajo condiciones prefijadas. Usualmente se expresa en términos de la *Desviación Estándar*, *Desviación estándar relativa* o *Coficiente De Variación (CV)*.

- Desviación estándar (σ): permite establecer los intervalos alrededor del promedio en los cuales se encuentran los valores de una población en términos de probabilidad. El 68% del área bajo la curva corresponde a una desviación estándar ($\pm 1\sigma$); el 95% a ($\pm 2\sigma$) y el 99,7% a ($\pm 3\sigma$)

para una serie de pocos datos $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$

- **Coeficiente de variación(CV):** es un indicador de precisión de los resultados obtenidos en una determinación. Se define en función de la desviación estándar y el promedio así:

$$CV = \frac{s * 100}{\bar{x}}$$

PROMEDIO GEOMÉTRICO: es la raíz enésima del producto de todos los resultados a promediar. Para determinarlo se aplica la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt[n]{X_1 * X_2 * \dots * X_n}$$

Entre las ventajas de este promedio frente al promedio aritmético se puede decir que considera todos los valores de la distribución y es menos sensible que la media aritmética a los valores extremos.

SENSIBILIDAD DEL MÉTODO: es una medida del factor de respuesta del instrumento como una función de la concentración. Normalmente se mide como la pendiente de la curva de calibración. Como valor se puede reportar el promedio para las curvas obtenidas en los ensayos de estandarización y en la medición de muestras, indicando su desviación estándar.

REPETIBILIDAD: es una medida de la precisión de datos obtenidos por un solo operador trabajando siempre en las mismas condiciones (equipos, materiales y reactivos).

REPRODUCTIBILIDAD: es la medida de la precisión de los datos obtenidos entre dos o más analistas y/o laboratorios que utilizan el mismo método en similares condiciones

RECUPERACIÓN: es la capacidad que tiene un procedimiento analítico para determinar cuantitativamente una especie química que ha sido adicionada a una muestra. Se expresa como porcentaje (%R) y se calcula como:

$$\%R = \frac{\text{Masa Recuperada}}{\text{Masa Adicionada}} \times 100$$

Donde:

Masa Recuperada = Concentración real recuperada/Volumen recuperado

Masa Adicionada = Concentración real adicionada/Volumen adicionado

TOXICIDAD: la toxicidad de una sustancia es la capacidad que tiene de causar daños a un organismo vivo.

VOLATILIZACIÓN: la volatilización es un proceso de evaporación de fases líquida o sólida que ocurre cuando los contaminantes líquidos en fase no acuosa o disueltos en agua contactan con una fase gaseosa.

RESUMEN

El presente estudio determinó la concentración de las emisiones de fenol en el reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP) de la Clínica Veterinaria de la Universidad de La Salle Sede Norte, a través de un monitoreo horario durante 15 días, empleando un equipo de tres gases y una solución adsorbente de hidróxido de sodio [0,1 N]. El equipo de muestreo empleado consta de un sistema de conexión a la tubería de salida del biogás, un burbujeador o impinger y una bomba cuyo caudal es de 0,28 L/min.

Las muestras fueron sometidas a un pre-tratamiento basado en un sistema de destilación con el fin de eliminar las impurezas que interfirieran en el análisis de las mismas, posteriormente se realizó un análisis colorimétrico por fotometría, siguiendo medidas de control de calidad con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos en el proyecto y la reproductibilidad del método en otras investigaciones.

Durante el periodo de monitoreo de las emisiones del RAP se verificó la presencia de fenoles en el aire en concentraciones horarias que variaron desde 0.667 hasta 10.490 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Simultaneo al monitoreo de aire, se hizo una caracterización del afluente y efluente basado en el tiempo de retención del reactor, en la cual se analizó en el afluente de la planta los parámetros Fenol, DQO, DBO, Sólidos totales, Sólidos Disueltos y Aceites y Grasas, datos con los cuales se corrió el modelo de emisiones en plantas de tratamiento de la EPA WATER9 para determinar las emisiones de fenol del reactor.

Paralelamente, se desarrolló un balance de masas global para el fenol en el sistema, para el cual se analizó el contenido de fenol en muestras del medio de soporte (espuma de poliuretano – PUF) y muestras de lodo con el fin de tener una aproximación a la concentración del fenol acumulado en el reactor; para ello se propuso una variable incógnita Z en el balance la cual define la posible formación o consumo de fenol por parte de los microorganismos del reactor según fuera un valor positivo o negativo. En los balances diarios desarrollados se hallaron valores positivos, sin embargo, por falta de información como tasas de degradación, acumulación o formación de fenol en el sistema; sólo pudo concluirse que es posible la formación de fenol en el medio debido a condiciones favorables tales como presencia de materia orgánica y condiciones

anaerobias, además de considerar que dentro de las actividades desarrolladas en la clínica veterinaria y en los laboratorios, no se emplean insumos con fenol.

Con el ánimo de establecer los parámetros más influyentes en la volatilización del fenol, se analizaron las correlaciones del fenol volatilizado del sistema a con los parámetros de temperatura ambiente, Fenol, DQO y DBO en el afluente. Se encontró que la relación de linealidad más significativa se da entre la volatilización y la temperatura ambiente (0.64), seguida de una correlación mediana con la DQO (0.46) y por último, la correlación más débil con DBO (0.35).

El modelo WATER9, arrojó valores de emisión diarios entre 1.29×10^{-6} y 5.84×10^{-6} $\mu\text{g}/\text{día}$. Dichos valores se compararon con las cargas diarias detectadas durante los días de monitoreo empleando la prueba estadística de *U de Mann-Whitney*, lo cual permitió determinar que estas dos variables difieren considerablemente. Estos resultados pueden deberse a dos motivos, como primera medida que no es recomendable emplear este modelo en la estimación de emisiones para este sistema de tratamiento y bajo las condiciones ambientales como las de Bogotá y/o que el programa ofrece una unidad que cumpla con todas las condiciones de flujo a pistón para hacer la correcta simulación, por tanto, fue necesario identificar una unidad que cumpliera con las características equivalentes ya que el modelo no cuenta con un reactor anaerobio de flujo a pistón como componente.

En cuanto al sistema de tratamiento, se evaluaron las eficiencias de remoción de fenol, DQO y DBO, obteniendo 69%, 76% y 82% respectivamente. En el caso de la remoción de fenol, se compararon los valores de eficiencia incluyendo la volatilización como parte de la salida a través de la prueba estadística *t-Student*, se establece que la consideración de la volatilización del fenol dentro de los cálculos de eficiencia del sistema no influye considerablemente en el resultado, debido a que el orden de magnitud de la volatilización es 100 veces menor que el fenol presente en el vertimiento tratado. Así mismo a partir del análisis de los resultados de caracterización y las gráficas de los mismos, se determinó que existe una alta fluctuación en las cargas contaminantes, lo cual influye en la variabilidad de las eficiencias de remoción.

SUMMARY

This study determined the phenol concentrations contained in the biogas emissions of the veterinary clinic's plug flow anaerobic reactor (PFAR-unit) located in La Salle University, through hourly sampling by 15 days using a RAC 3-gas sampler and a NaOH adsorbing solution [0,1 N]. The sampling equipment consisted on a connection system to the biogas outlet pipe, an impinger and a pump with a 0,28 L/min flow.

The samples were pre-treated in a distillation system in order to remove impurities that could interfere in the analysis; afterwards it was made a colorimetric analysis by photometry, following quality control procedures to guarantee the reliability on the project results and the method reproducibility in other investigations.

During the sampling period, it was verified the phenol presence in hourly concentrations which were between 0.667 and 10.490 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Simultaneous to the air monitoring, it was made the influent and effluent characterization based on the reactor's hydraulic retention time, where were analyzed the parameters: phenol, COD, BOD, total and dissolved solids and oil and fat which were used to run the EPA's waste water systems emission model WATER9 to estimate the phenol reactor's emissions.

At the same time, it was developed a phenol mass balance in the system, for which was analyzed the phenol content in PUF samples, from the support mean and sludge samples to get an approach to the phenol concentration accumulated in the system; thus was proposed an unknown parameter "*Z*" *in the balance* which defines the possible phenol generation or consumption by the reactor's microorganisms, as a positive or negative value. In the daily balances were found positive values, nevertheless, due the lack of information such as phenol degradation, accumulation or formation rates in the system it was only possible to conclude that it's possible the phenol formation in the system because of favorable conditions such as organic matter presence and anaerobic conditions, besides considering that inside the veterinary clinic and in the laboratories there's not use of phenol.

With the intention of establishing the most influential parameters in the phenol volatilization, it were analyzed the correlations of the volatilized phenol from the system with the parameters temperature, COD and BOD in the influent. It was found that that the most meaningful linear relation is between phenol

volatilization and temperature (0.64), followed by a medium correlation with COD (0.46) and at the end the weakest one was BOD (0.35).

The WATER9 model, reported daily emission values between 1.29×10^{-6} and 5.84×10^{-6} $\mu\text{g/day}$. Those values were compared with the detected daily loads during the sampling days using the *U Mann-Whitney* statistical test, which made possible to determine that this two variables differ considerably. This results could have to reasons: the first one is that is not advisable to use this model for emission estimations of this treatment system and in the local conditions as in Bogota and/or that the program doesn't offer a unit that fulfill equivalent characteristics so the model doesn't have a plug flow anaerobic reactor as an option.

About the treatment system, the removal efficiencies were analyzed to phenol, COD and BOD, getting 69%, 76% y 82% respectively. In the case of phenol removal, the values of the efficiency were compared including the volatilization as part of the output through the *t-Student* statistical test, which established that there is not influence when considering the phenol volatilization within the calculations, due the magnitude of the volatilization is 100 times less than the phenol in the treated water. In the same way, from the analysis of the characterization results It was determined that there's a high fluctuation in the pollutant loads which influences in the removal efficiencies variability.

INTRODUCCIÓN

El proceso de industrialización ha traído como consecuencia la formación de diferentes productos que permanecen en el ambiente, provocando un continuo deterioro de la flora y fauna de los ecosistemas, así como de la salud pública; este proceso involucra diversas actividades dentro de las cuales se encuentran las actividades hospitalarias, en las que se incluyen las actividades veterinarias, que van desde la prestación de servicios hasta las actividades académicas en anfiteatros; a pesar de las mejoras en los procesos, la implementación de políticas de producción más limpia y gestión ambiental como parte del compromiso de los sectores industriales con el ambiente y como requerimientos por parte de las autoridades ambientales, dichas actividades generan desechos sólidos, emisiones contaminantes y/o vertimientos a los cuerpos de agua, aunque se encuentran reguladas en el país y a nivel distrital, es necesario el desarrollo de investigaciones que permitan la implementación de soluciones tecnificadas y económicas, que estén no solo al alcance de las grandes industrias, sino de las pequeñas actividades.

Las aguas residuales que provienen de las actividades hospitalarias, son una mezcla de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. En este tipo de vertimientos, es común la presencia del fenol, que a pesar de su control desde la fuente es inevitable la presencia de ciertas cantidades en los vertimientos, es por esto que existen diversas investigaciones ambientales que se han encaminado a la eliminación de estos compuestos tóxicos de este tipo de aguas para proteger los cuerpos receptores, a pesar de esto, la información que existe acerca de la degradabilidad de los compuestos fenólicos en los sistemas biológicos anaerobios es escasa. En general, la biodegradabilidad en sistemas de tratamiento anaerobio es más lenta que en los sistemas aerobios, y esto sumado a los escasos estudios disponibles sobre el tema, demuestran que este tipo de compuestos orgánicos se consideran persistentes a la degradación bajo ciertas condiciones tales como la temperatura, presencia de aceptores de electrones, estabilidad y origen de los lodos empleados en el sistema.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la concentración de las emisiones de fenoles generadas en un reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP), para el tratamiento del agua residual industrial de la clínica veterinaria de la Universidad De La Salle haciendo uso del modelo WATER9

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 Diagnosticar el funcionamiento del RAP en función del tiempo de retención y su relación en la remoción de cargas expresada como DBO y DQO.

1.2.2 Calibrar y simular la generación de fenoles en la unidad piloto usando el modelo WATER9.

1.2.3 Verificar si las simulaciones del modelo WATER9 pueden emplearse a las condiciones de Bogotá.

1.2.4 Determinar si es significativa la volatilización de fenoles en un RAP

2. ANTECEDENTES

Los modelos de emisión han sido diseñados para producir estimaciones más exactas que las obtenidas con factores de emisión, esto proporciona facilidades y beneficios para el estudio de múltiples procesos y actividades, pues además de proporcionar datos de manera rápida y práctica, evita el uso constante de equipos de medición directa¹. A nivel internacional se han desarrollado diversos modelos computarizados que son de gran utilidad para la estimación de emisiones de diferentes fuentes, todos ellos de gran diversidad ya sea por los requisitos de información o por su finalidad. Sin embargo, no todos los modelos tienen la misma aplicabilidad en todos los países y zonas, debido a las diferencias en latitud y climatología, entre otros aspectos.

En Colombia, el uso de los programas de modelación ha tomado fuerza en diferentes disciplinas incluyendo la ambiental, en el campo del recurso aire se emplean principalmente los modelos de dispersión de contaminantes en el ambiente, y en menor uso el de estimación de emisiones de gases en rellenos sanitarios. En su mayoría los modelos actualmente usados, son modelos recomendados o desarrollados por la EPA².

Si bien no se registraron referencias de aplicación del modelo WATER9 en Colombia previas al presente estudio, en Estados Unidos se encontró que la Universidad de Carolina del Norte, Aneja y Blunden³, diseñaron una cámara dinámica para el estudio de las emisiones de diferentes compuestos y las interacciones atmósfera-biósfera, estudio en el cual emplearon el modelo WATER9 para la validación de sus datos, obteniendo unos resultados acordes a los resultados de la cámara diseñada y a un modelo de transporte de masa también empleado. Para el empleo de este modelo se tuvieron en cuenta condiciones meteorológicas, tales como la temperatura y la humedad relativa. Como conclusión de este estudio se determinó que la dinámica de flujo a través de la cámara del sistema se ha desarrollado con éxito en respuesta a una necesidad de medir las emisiones de nitrógeno, azufre y compuestos de

¹ Disponible en: www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion2.pdf; [Citado Abril 2000]

² Ibid.

³ ANEJA, Viney y BLUNDEN, Jessica. Dynamic Chamber System to Measure Gaseous Compounds Emissions and Atmospheric-Biospheric Interactions. *Environmental Simulation Chambers: Application to Atmospheric Chemical Processes*, 97–109. Springer: 2006. Disponible en la base de datos SpringerLink, ISBN 978-1-4020-4232-4 [on line]. [Citado Abril 2008]

carbono, además los resultados experimentales fueron validados por expertos dando un aval al uso del modelo.

En cuanto a los estudios realizados sobre el comportamiento de los fenoles en sistemas de tratamiento anaerobio, pueden citarse los proyectos de investigación “Comportamiento de fenoles y ácidos de volatilidad media en residuales de plantas de beneficio en café tratados en reactor de flujo ascendente con manto de lodo” de Espinosa⁴, y “Comportamiento de los ácidos y fenoles en la digestión anaeróbica de pulpa de café” del mismo autor, en los que se observó una variación en las cantidades de remoción de fenol entre un 38 y 79%, además de determinar que el tiempo de digestión de la pulpa de café influyen en el comportamiento de los ácidos grasos volátiles, los ácidos de volatilidad media y en la concentración de los fenoles totales. Sin embargo los estudios encontrados hasta ahora, han sido enfocados a la evaluación de los fenoles en los sistemas de tratamiento anaerobio y en eficiencia de remoción de éste en el agua tratada, más no se evaluó la formación y emisiones del compuesto a causa del tratamiento.

En el proyecto de Méndez y Rodríguez⁵, se verificaron eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica (expresada como DBO y DQO). El reactor piloto para los ensayos fue construido por los estudiantes en las riberas del río Tunjuelito en el Barrio El Oasis en la localidad de Usme; sin embargo, por motivos de vandalismo y la falta de protección por parte de los vecinos de dicho barrio, la investigación no pudo ser complementada como para verificar el comportamiento de un RAP frente a otras variables. Con base en los resultados de esta investigación, se vio la importancia de continuar con esta investigación para verificar alternativas de remoción de contaminantes de interés sanitario como los fenoles.

Otra fuente de estudio relacionada con reactores anaerobios de flujo a pistón (RAP), se ve plasmado en el proyecto desarrollado por Cubillos⁶, donde se evaluó el comportamiento de un RAP, para el tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario “Don Juanito” de la ciudad de Villavicencio. Se realizó la puesta en marcha con la ayuda de otras entidades de la región y

⁴ ESPINOSA, M.C y GUERRA, M. Comportamiento de fenoles y ácidos de volatilidad media en residuales de plantas de beneficio en café tratados en reactor de flujo ascendente con manto de lodo. [On line] Revista Cenic N° 19(No. Esp.):118. Cuba 1988.

⁵ RODRÍGUEZ, Ingrith y MENDEZ, César. Análisis comparativo entre medios de soporte fijo de plástico, grava y guadua, en reactores anaerobios de flujo a pistón para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Proyecto de grado Ingenieros Ambientales y Sanitarios. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2004. 145 p.

⁶ CUBILLOS Roa, Fabián. Puesta en marcha de un reactor anaerobio de flujo a pistón para el manejo de lixiviados del relleno sanitario de Villavicencio “Don Juanito”. Proyecto de grado Ingeniero Ambiental y Sanitario. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2004. 106 p.

posterior a esto se trabajó en optimización del dispositivo, teniendo como base de estudio el porcentaje de remoción de DQO y la eficiencia geotextil como medio de soporte biológico. En este proyecto se demostró que la eficiencia del RAP incremento en un 11.32% en tan solo un mes, después arrancado el reactor.

En relación a los dos proyectos anteriores se encuentra el proyecto de investigación “Análisis comparativo entre medios de soporte fijo (Guadua y espuma de poliuretano junto con plantas macrófitas) y medios de soporte fijo únicamente, en reactores de flujo a pistón para remoción de fenoles y materia orgánica en aguas residuales” por los Ingenieros Roberto Balda, Néstor Mancipe y Javier González, con el fin continuar estudiando el comportamiento de los reactores anaerobios de flujo a pistón (RAP) y, paralelamente, compararlos con otro sistema de reactores de flujo a pistón con el empleo de un medio de soporte alternativo a la guadua y de fácil consecución en nuestro país (grava y espuma de poliuretano), poniendo en práctica, además, la ecotecnología como suplemento; investigación que se encuentra en desarrollo.

Como parte de este proyecto marco, Rocha y Jaimes⁷, analizaron el comportamiento del tratamiento piloto planteado anteriormente (RAP y HUMEDAL), para así establecer el cumplimiento de los requisitos exigidos por la secretaria Distrital de Ambiente en cuanto a las concentraciones permisibles de contaminantes de interés sanitario en los vertimientos generados en los laboratorios de la facultad de veterinaria de la Universidad de La Salle. Esa investigación fue desarrollada durante un periodo de 7 meses a través de seis fases consecutivas e interdependientes, en las cuales se contempló un diagnóstico situacional, una pre-experimentación para la selección de la planta macrófita, un acondicionamiento de las unidades piloto, en la que fue necesario controlar condiciones tales como el tiempo de retención, estabilización del medio biológico, la relación entre la alcalinidad y ácidos grasos volátiles y el pH, entre otros para mantener las condiciones óptimas de funcionamiento; así mismo se monitoreó el comportamiento inicial de los reactores, haciendo un seguimiento y control de su funcionamiento para determinar las eficiencias de remoción de cada uno de ellos, y finalmente un análisis estadístico comparativo el cual permitió determinar cuál de los dos reactores resultó ser el más eficiente principalmente en la remoción de fenoles y materia orgánica.

⁷ ROCHA, Andrés y JAIMES, Marcela. Análisis comparativo de la remoción de fenoles en reactores anaerobios de flujo a pistón con guadua y plantas macrófitas en el tratamiento de los vertimientos de la clínica veterinaria de la Universidad De La Salle. Proyecto de grado Ingenieros Ambientales y Sanitarios. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2009. 106pag.

Finalmente se concluyó que el RAP resultó ser más eficiente que el Reactor Híbrido en la remoción de materia orgánica y fenoles, lo cual fue atribuido a que la guadua como medio de soporte fijo presentó un mejor comportamiento bajo condiciones anaerobias (RAP), mientras que en el Reactor Híbrido se presentaron dificultades de adaptación de las macrófitas en la guadua como medio de soporte. Además, aunque la guadua manifestó tener una baja tasa de biodegradabilidad en los reactores, según las pruebas realizadas basadas en la pérdida másica, en el Reactor Híbrido dicha tasa fue ligeramente mayor lo cual se le atribuyó a la presencia de oxígeno, el cual influye en la oxidación de la guadua y posiblemente en su degradación.

Como antecedentes internacionales, se pueden señalar dos proyectos en Venezuela, el primero denominado “Tratamiento de un efluente sintético de glucosa y fenol en un reactor biológico rotativo de contacto”, en este proyecto se evaluó el comportamiento de un reactor aeróbico biológico rotativo de contacto RBC (biodisco) tratando un efluente sintético de glucosa y fenol como fuentes de carbono. La eficiencia del tratamiento se investigó bajo diferentes condiciones de cargas orgánicas e hidráulicas y se monitorearon los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), contenido de fenol, pH, alcalinidad, sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV); dando como resultado un porcentaje de remoción de DQO por encima del 97%, mostrando que el sistema resultó óptimo para disminuir los valores de los parámetros evaluados a los límites de descarga permisibles a un cuerpo de agua superficial establecidos por la normativa venezolana⁸.

El segundo proyecto citado de este país surgió a partir de la problemática en el tratamiento de aguas residuales industriales generadas por las industrias del petróleo con contenido de fenol, titulado “Degradación de fenoles totales mediante reactores SBR en aguas de producción petroleras”. En esta investigación se evaluó la biodegradación aerobia (reactores secuenciales por carga-SBR) de los fenoles totales presentes en las aguas de producción petroleras del patio de tanques Ulé, Tía Juana, estado Zulia, Venezuela. Durante los ensayos de biodegradación se monitorearon las variaciones de: pH, alcalinidad total, DQO y fenoles totales en las aguas de producción de petróleo liviano (APPL), mediano (APPM) y pesado (APPP), siguiendo los métodos estándar. Los resultados muestran un contenido inicial de fenoles totales de 19,16; $\pm 3,32$; 1,66 $\pm 0,39$ y 2,60 $\pm 0,14$ mg/L, para las APPL, APPM y APPP, respectivamente. Se pudo observar que durante la degradación aeróbica se obtuvo un porcentaje de remoción de fenoles totales de 96,8 \pm 2,9%, 89,2; $\pm 4,6\%$ y 82,8 $\pm 12,5\%$. Estos resultados muestran que el sistema de tratamiento aeróbico en reactores SBR es efectivo para la remoción de la

⁸ Disponible en: http://www.serbi.luz.edu.ve/pdf/bcib/v39n3/art_05.pdf. [Citado en Abril 2009]

materia orgánica presente en las aguas de producción petroleras, para las condiciones operacionales que se realizaron en este estudio. Sin embargo, como recomendación los autores propusieron considerar los tipos de fenoles presentes en cada efluente ya que el proceso se hace menos eficiente cuando existen compuestos fenólicos complejos.⁹

Como antecedentes en Bolivia, puede citarse el proyecto de investigación “Modelaje del control biológico de patógenos en un reactor anaerobio a pistón seguido por lagunaje”, en el cual se utilizó un RAP (reactor anaerobio de flujo a pistón) para tratar aguas residuales domesticas, en este caso de estudio se introdujo el uso de modelos, con el fin de predecir la remoción de patógenos para el caso del RAP y comparar el porcentaje de remoción de la laguna con datos reales. En este proyecto se evaluó la capacidad de eliminar patógenos en un sistema piloto de tratamiento de aguas residuales, basado en un reactor anaerobio a pistón RAP-100 (reactor a baffles) seguido por una laguna de flujo pistón.

La planta fue operada con aguas residuales domésticas de mediana carga equivalentes a las generadas por una población de 700 a 1000 habitantes. Los resultados permitieron deducir constantes cinéticas y ecuaciones de diseño bien calibradas y corroboradas con otros estudios. En este RAP se alcanzaron eficiencias de remoción de coliformes totales cercanas al 96.5%, con tiempos de retención hidráulicos medios de 8 h, mientras que en la laguna se han logrado eficiencias cercanas al 96.4% con tiempos de retención hidráulicos entre 4 y 5 días, donde se lograron eficiencias de remoción cercanas al 99.97% en todo el sistema. Esta experiencia permitió obtener información valiosa para la calibración de un modelo utilizado por la OPS (modelo de Thirimurthi) en el caso de la laguna, además de calibrar y comparar dos modelos (modelo de Medina – 2000 & modelo de Polprasert y Hoag- 83) para predecir la remoción de patógenos en el caso reactores anaerobios a baffles o RAP-100¹⁰.

En México, como respuesta a la falta de información disponible sobre la degradabilidad de los compuestos oxigenados y alquilfenólicos en sistemas biológicos anaerobios, Puig¹¹ seleccionó al 2-cresol, 2,6-dimetilfenol, 2-etilfenol, entre otros, como compuestos modelo para realizar pruebas de biodegradabilidad en lote, con la presencia de diferentes aceptores de electrones. Los compuestos fueron suministrados como única fuente de

⁹ Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/diazve.pdf> [Citado en Abril 2009]

¹⁰ Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/medina2.pdf> [Citado en Abril 2009]

¹¹ PUIG Grajales, M^a del Carmen. Degradación de compuestos oxigenados y alquilfenólicos bajo condiciones anaerobias. Tesis de Maestría en Biotecnología. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, División de ciencias tecnológicas y de la salud. 1999, 73 p.

carbono y energía a concentraciones subtóxicas. Como inóculo se utilizó tanto lodo granular y sedimento anaerobio extraído del río Rin. Estos compuestos alquilfenólicos, resultaron ser persistentes a la degradación bajo condiciones de metanogénesis, sulfato-reducción, desnitrificación, reducción de Fe (III) como aceptor de electrones. Sin embargo, se obtuvo una mineralización de los compuestos 2-cresol y 2-etilfenol en presencia de Mn (IV) como único aceptor de electrones. Más del 90% de ambos compuestos fue degradado en un periodo menor a 15 días. El compuesto 2,6-dimetilfenol fue degradado abióticamente en presencia de Mn (IV).

En cuanto a los resultados de biodegradabilidad anaerobia de los compuestos alquilfenólicos, PUIG concluyó que el 2-cresol, 2,6-dimetilfenol y 2-etilfenol en las condiciones anaerobias tradicionales como la metanogénesis, sulfato-reducción y desnitrificación no favorecieron su mineralización, en un periodo de 100 días de incubación. El mismo efecto se observó bajo condiciones de reducción de Fe (III); y la mineralización de los compuestos 2-cresol y 2-etilfenol se demostró bajo condiciones de reducción, de manganeso (IV), por tanto, la reducción del manganeso (IV) resulta una alternativa para la eliminación de los compuestos alquilfenólicos considerados muy persistentes bajo condiciones anaerobias tradicionales. Esto representa el inicio para generar tecnologías anaerobias donde el Mn (IV) en sus diferentes formas amorfas sea incorporado y reciclado dentro del mismo sistema.

En los últimos años ha crecido la posibilidad de destoxificar compuestos aromáticos bajo condiciones metanogénicas y se ha demostrado que la mineralización de este tipo de compuestos a dióxido de carbono y metano es posible. PUIG señala reportes sobre la degradación metanogénica de tolueno, benceno, naftaleno, y aminofenoles, la biodegradabilidad del fenol se ha evaluado con mayor frecuencia vía metanogénesis, los resultados obtenidos en varios estudios muestran que es completamente mineralizado a metano y dióxido de carbón, en periodos cortos de tiempo. De igual manera, los compuestos fenólicos como el catecol a una concentración de 300 mg/L, son mineralizados a dióxido de carbono y metano por un lodo granular proveniente de un reactor anaerobio a nivel laboratorio. Se tienen pocos datos sobre la mineralización vía metanogénesis de los compuestos alquilfenólicos, sin embargo el fenol y el 4-cresol fueron transformados a metano a concentraciones 500 y 200 mg/L, respectivamente; estas pruebas se realizaron en lote, a 37 °C, empleando como inóculo un lodo proveniente del tratamiento de aguas domésticas.

En otro reporte la misma autora señala que concentraciones entre 250 mg/L y 300 mg/L de catecol, fenol, resorcinol y 4-cresol, fueron mineralizados a

metano por lodos granulares provenientes de 5 diferentes fuentes. Las fases de retardo observadas no rebasaron los 19 días para el 4-cresol y 40 para el fenol, observándose una producción teórica total de metano mayor al 77%.

En conclusión, los anteriores estudios sobre el tratamiento de fenoles en reactores anaerobios analizan el comportamiento de la remoción y degradación de éste compuesto a través de la evaluación de la eficiencia de los reactores (en función de las cargas contaminantes), más no se considera la volatilización del fenol como un factor de importancia para la evaluación de dichas eficiencias, esto evidencia una brecha entre los estudios anteriormente mencionados y la posibilidad de considerar la volatilización como un parámetro a evaluar en estos sistemas de tratamiento y además, si este aspecto es significativo para el ambiente y/o la salud humana.

Adicionalmente, la exigua información disponible en Colombia y a nivel internacional sobre el uso del modelo WATER9, despierta la inquietud y el interés para determinar si son útiles las simulaciones del mismo en nuestro país; asimismo, la posibilidad de desarrollarlo en conjunto con el proyecto en curso de comparación de los medios de soporte fijo, hace de este proyecto algo innovador y llamativo, pues permite comprender de manera cabal el comportamiento tanto del reactor como de las emisiones, sirviendo así de soporte para los demás estudios que hacen parte de este proyecto marco de investigación.

3. MARCO TEORICO

3.1 PROCESOS ANAEROBIOS

Durante los tratamientos biológicos los compuestos orgánicos contaminantes son removidos por medio de una conversión a nivel celular de los microorganismos presentes en el sistema de tratamiento dando como resultado, generalmente, productos de mineralización, la mayor ventaja que ofrecen estos sistemas es su alta eficacia para remover materia orgánica disuelta y más aún, la remoción de compuestos tóxicos¹². En la digestión anaeróbica, la materia orgánica se descompone por la acción de los microorganismos en la ausencia del oxígeno, y se producen metano y anhídrido carbónico, obteniendo hasta un 90% de remoción en la degradación anaerobia de diferentes compuestos tóxicos¹³, de igual manera, La producción del lodo en el tratamiento anaerobio es muy baja, porque la mayoría del material orgánico se convierte en biogás y no en lodo¹⁴; este proceso es comúnmente empleado en el tratamiento de aguas residuales procedentes de industrias con una base biológica, donde los residuos tienen un contenido de materia orgánica comparable a la de los lodos espesados, como los provenientes de la producción de levaduras y de la fabricación de almidón, además de las suspensiones de origen animal de las operaciones agrícolas intensivas.

Adicionalmente, la degradación anaerobia se ha estudiado bajo diferentes condiciones de óxido-reducción, donde las bacterias anaerobias dependen del uso de aceptores de electrones con altos potenciales redox, tales como el Oxígeno, Fe(III) soluble, Mn (IV), entre otros¹⁵, esto debido a que las bacterias anaerobias dependen del uso de aceptores de electrones con altos potenciales redox, por lo que es necesario que ocurran reacciones de óxido-reducción para que pueda ser aprovechada la energía por parte de las células; la Tabla 1

¹² PUIG Grajales, M^a del Carmen. Op Cit. p 9

¹³ WINKLER, Michael A. Tratamiento biológico de aguas de desecho. México: Limusa, 2007. p, 314

¹⁴ Disponible en: <http://www.lennotech.com/espanol/Pre-fermentacion.htm> [Citado Junio de 2009]

¹⁵ PUIG Grajales, M^a del Carmen. Op Cit. p 10

resume las reacciones de oxido-reducción posibles en los procesos anaerobios y las relaciones estequiométricas para la degradación del fenol.

Tabla 1. Relación estequiométrica en reacciones redox para la degradación del fenol

REACCIÓN REDOX	RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA
METANOGENÉISIS	$C_6H_5O + 4H_2O \rightarrow 3.5 CH_4 + 2.5 CO_2$
SULFATO-REDUCCIÓN	$C_6H_5O + 3.5 SO_4^{2-} + H^+ + 3H_2O \rightarrow 6 HCO_3^- + 3.5 H_2S$
DESNITRIFICACIÓN	$C_6H_5O + 5.6 NO_3^- + 5.6 H^+ \rightarrow 6 CO_2 + 2.8 N_2 + 5.6 H_2O$

Fuente: PUIG Grajales, M^a del Carmen. Degradación de compuestos oxigenados y alquilfenoles bajo condiciones anaerobias. p 63, adaptado por los Autores, 2009

3.1.1 Mecanismos de la digestión anaeróbica: la digestión anaeróbica se realiza en cuatro etapas metabólicas¹⁶: hidrólisis, acidogénesis o fermentación, acetogénesis y metanogénesis, la Tabla 2 describe estos mecanismos.

Tabla 2. Mecanismos de la digestión anaeróbica

Etapas metabólicas	Descripción
Hidrólisis	O licuefacción. En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados, es decir, los polímeros son convertidos a sus respectivos monómeros por exoenzimas
Acidogénesis	Los compuestos orgánicos solubles (producto de la hidrólisis) son convertidos a ácidos orgánicos tales como ácido acético, propiónico y butírico fundamentalmente
Acetogénesis	Los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono
Metanogénesis	El metano es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H ₂ y CO ₂ , pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa2.shtml>. [Citado Abril 2008]

¹⁶ Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa2.shtml>. [Citado Abril 2008]

3.1.2 Procesos de tratamiento anaerobio El tratamiento anaerobio es un tratamiento secundario, el cual consiste en una serie de operaciones y procesos químicos y/o biológicos a los que son sometidos los efluentes del tratamiento primario. Durante el pretratamiento y el tratamiento primario de las aguas residuales se separa principalmente una gran parte de los sólidos suspendidos y sedimentables, aquellos que fueron retenidos por los sistemas de rejillas, desarenadores, trituradores y los que tuvieron la capacidad de sedimentar en el tiempo retención límite¹⁷.

3.1.2.1 Reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP)¹⁸ El reactor anaerobio de flujo a pistón es un sistema de tratamiento de aguas residuales de película fija, en el cual se ponen en contacto dichas aguas con una población microbiana mixta, en forma de una película de lama adherida a la superficie de un medio sólido de soporte. Los nutrientes y materia orgánica presentes en el líquido se difunden hacia dentro de la película microbiana o biopelícula para ser metabolizados por los microorganismos; por su parte, los sólidos en suspensión y en estado coloidal presentes en el agua residual se aglomeran y adsorben también en la película biológica.

Dado que las bacterias están adheridas al medio y no son arrastradas por el efluente, se pueden obtener altos tiempos de retención celular a bajos tiempos de retención hidráulica. De este modo el RAP se ha podido emplear para el tratamiento de residuos de baja concentración a temperatura ambiente, como es el caso de las aguas residuales domésticas.

Este sistema es una modificación de los filtros anaerobios, ya que su principio de funcionamiento y remoción de los contaminantes orgánicos es el mismo, pero lo que caracteriza al RAP, además de poseer generalmente un compartimiento final de sedimentación, es que el régimen de flujo es de tipo pistón, en el cual el fluido se desplaza y sale del tanque en la misma secuencia en la cual entra; las partículas del fluido no retienen su identidad al paso de la unidad y permanecen en el reactor en la medida en que se van digiriendo hasta completar un periodo igual al tiempo teórico de retención hidráulica. La Tabla 3 presenta los parámetros típicos de diseño de un RAP.

¹⁷ Disponible en: <http://www.aguaslatinas.com/html/tecnologia.htm#3>. [Citado Abril 2008]

¹⁸ BALDA, Roberto, GONZÁLEZ, Javier. Proyecto marco de investigación: "Análisis comparativo entre medios de soporte fijo (guadua y espuma con plantas macrófitas) y medios de soporte fijo únicamente, en reactores de flujo a pistón para remoción de fenoles y materia orgánica en aguas residuales". Bogotá: Universidad De La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2007. p3

Tabla 3. Parámetros típicos de diseño de un RAP

Parámetro	Valor de referencia
Tiempo de retención	10 – 15 horas aprox.
Carga Hidráulica	0.3 – 1.2 m ³ /m ² -h
Carga Orgánica	< 5 Kg DQO/m ³ -día
pH	6.5 – 7.5

Fuente: BALDA, Roberto. 2005¹⁹

Entre las desventajas de este sistema se pueden citar, el alto costo del medio de soporte (cuando se trata de medios sintéticos) y algunos problemas operacionales, entre los cuales se debe resaltar la colmatación del filtro, que ocurre generalmente cuando a éste entran concentraciones elevadas de sólidos en suspensión²⁰.

3.1.2.2 Planta de tratamiento de la Universidad de La Salle: La planta de tratamiento de la sede La Floresta se encuentra ubicada detrás de los laboratorios de la Facultad de Veterinaria de la universidad. Allí se reciben los vertimientos de la Clínica Veterinaria (de las áreas de pequeños y grandes animales) como de los laboratorios de Anatomía e Histopatología de la misma facultad. La Tabla 4 relaciona las actividades comunes de estos espacios de trabajo y los insumos empleados en las mismas.

¹⁹ BALDA, Roberto. Tratamiento Anaerobio. [Diapositivas de clase] Recurso Agua. Universidad de La Salle. [2005], diapositiva 14.

²⁰ CARVALHO H y JURANDYR P. Filtros biológicos anaerobios: revisão de literatura, projeto e desenvolvimento, escola de engenharia de São Carlos. São Paulo: Universidad de São Paulo (EESC – USP), 1996. Citado por BALDA, Roberto Proyecto marco de investigación: “Análisis comparativo entre medios de soporte fijo (guadua y espuma junto con plantas macrófitas) y medios de soporte fijo únicamente, en reactores de flujo a pistón para remoción de fenoles y materia orgánica en aguas residuales”. Bogotá: Universidad De La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2007. 20 p.

Tabla 4. Actividades de los laboratorios de la Clínica Veterinaria

Horario de Funcionamiento	<u>LUNES A VIERNES</u> 7:00 AM A 5:00PM Jornada continua <u>SABADOS</u> 7:00 AM A 12:00 M
Actividades Desarrolladas	<u>LUNES A VIERNES</u> Disección y anatomía de animales <u>SABADOS</u> Limpieza de laboratorios
Insumos	<u>PRACTICAS</u> Formol, Agua <u>LIMPIEZA</u> Agua, Jabón, Hipoclorito de sodio

Fuente: Los autores, 2009

Los vertimientos llegan a un pozo de bombeo, donde se maneja un caudal aproximado de 10 L/min el cual es conducido a un sedimentador primario con el fin de remover la mayor cantidad de sólidos posibles antes de entrar a los reactores, en la entrada de cada reactor se cuenta con cajas reguladoras de caudal, las cuales permiten controlar el flujo del agua para cada reactor en un rango aproximado de 0.23 a 0.25 L/min. ARIAS y ANGULO²¹ determinaron que el reactor maneja tiene un tiempo de retención hidráulico de 10 horas y 7 minutos, resultado obtenido de la prueba preliminar aleatoria realizada en la planta para determinar el régimen de flujo dentro del reactor piloto mediante el uso del cloruro de sodio como un trazador conservativo midiendo la conductividad a la salida de cada reactor, siendo el momento del valor máximo de la conductividad a la salida el tiempo de retención real aproximado; el RAP consta básicamente de una pre-cámara que sirve como receptor y almacenamiento preliminar del agua residual, el reactor cuenta con cuatro cámaras que funcionan de acuerdo al patrón de flujo a pistón y tienen como medio de soporte espumas de poliuretano de 27 cm³, cada una de estas cámaras tienen falsos fondos que sirven como túneles para el paso del agua y válvulas de extracción de lodos ubicadas a un lado del reactor (ver Anexo A). Dado que las condiciones del reactor son anaerobias, la unidad tiene una tapa protectora que permite conducir y muestrear los gases generados por la misma a través una tubería de 1" de diámetro. Al final del reactor, existe un sedimentador secundario el cual ayuda a clarificar el efluente permitiendo la sedimentación de sólidos provenientes de la última cámara del reactor (Ver Figura 1)

²¹ ARIAS, Dayana y ANGULO Alexandra. Evaluación de la remoción y el transporte de fenoles en un reactor híbrido entre flujo a pistón y humedal artificial, con guadua y planta macrofita (*Polygonum hydropiperoides*) como medio de soporte fijo, para el tratamiento de aguas residuales industriales. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2009. 181p.

Figura 1. Planta de tratamiento de la Clínica Veterinaria – Sede La Floresta



Fuente: los autores, 2009

3.2 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV's)

Desde el punto de vista de la química ambiental, los COV's son una de las categorías dentro de las que se clasifican las sustancias químicas de acuerdo a su grado de volatilidad²². Es un grupo de compuestos orgánicos sintéticos que son extraíbles por disolventes y pueden determinarse mediante cromatografía de gas/espectrometría de masa. Los COV's incluyen fenoles, ftalatos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's)²³.

3.2.1 Fenoles: los fenoles están entre los compuestos aromáticos de interés ambiental y sanitario, debido a que son sustancias tóxicas frecuentemente encontradas en los ambientes acuáticos como resultado de la contaminación a

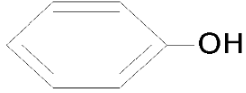
²² LAGREGA, Michael; *et al.* Gestión de residuos tóxicos: Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. México: Mc Graw Hill, 1996. p. 39

²³ USGS - U.S. Geological Survey. Manual de campo interinstitucional para la recolección de datos sobre la calidad del agua. [citado Abril 2008]. Disponible en: http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr00213/manual_sp/glossary.html

partir de una gran variedad de fuentes (industriales, biogeoquímicos, degradación de pesticidas, entre otras). La alta toxicidad de estos compuestos ha hecho que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA) y la Comunidad Económica Europea, los consideren como contaminantes prioritarios²⁴.

Entre los fenoles de interés, pueden nombrarse el derivado monohidroxílico del benceno (C_6H_5OH) que se conoce comúnmente como *fenol* o ácido carbólico, los cresoles que son homólogos del fenol y se diferencian por un (radical CH_3), y fenoles clorados entre otros²⁵. Las propiedades químicas y físicas de los fenoles se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Algunas propiedades químicas y físicas del fenol

Estructura química	
Peso molecular	94.11
Punto de ebullición	181.75 °C (101.3 Pa)
Punto de fusión	43°C 40.9 °C (ultrapuro)
Densidad relativa	1.071 (20°/4°)
Densidad de vapor relativo	3.24 (aire = 1)
Presión de vapor	(20°C) 0.357 mmHg (50°C) 2.48 mmHg
Concentración de saturación en el aire	(20°C) 0.77 g/m ³
Solubilidad en el agua	(25°C) 9 g/100 gr H ₂ O
Log n-octanol/agua coeficiente de partición (Log P _{ow})	1.46
Constante de acidez en el agua a 20°C (K _a)	1.28 x 10 ⁻¹⁰
Constante de Ley de Henry	4 x 10 ⁻⁷ atm·m ³ /mol
Punto de inflamación	80 °C
Limites de explosividad	1.3 - 9.5%
Umbral de olor	0,18 mg/m ³ = 0,046 ppm

Fuente: World Health Organization. Environmental Health Criteria 161 – Phenol. 1994. P. 18

El fenol puro expuesto al aire, absorbe humedad y se licua, esta higroscopicidad no es atribuible, como la de otras sustancias, a una gran solubilidad en el agua (8% a 20°C), sino por una solubilidad relativamente alta del agua en el fenol (28%), hasta cuyo límite puede absorber humedad el fenol

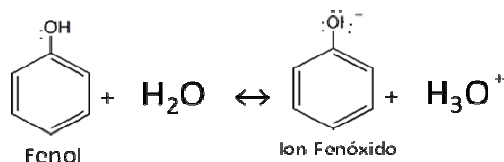
²⁴http://www.serbi.luz.edu.ve/scielo.php?pid=S0375538X2005012000005&script=sci_arttext

²⁵ SAWYER, Clair; McCARTY, Perry y PARKIN Gene. Química para Ingeniería Ambiental. 4 ed. Bogotá: Mc Graw Hill, 2000. p.248

expuesto al aire²⁶. Además de las propiedades mencionadas en la Tabla 5, es importante resaltar la acidez del fenol como una propiedad fundamental que permite comprender la reactividad del fenol.

Aunque el fenol es un ácido débil en comparación con los ácidos carboxílicos, es más fuerte que los alcoholes alifáticos e incluso que el agua (Ecuación 1), por tanto, el carácter básico (carácter nucleofílico) del grupo hidroxilo está disminuido; la acidez del fenol es debida fundamentalmente a la estabilización del ion fenóxido por deslocalización de la carga negativa en el anillo aromático, los sustituyentes presentes en el anillo aromático aumentan o disminuyen de un modo predecible la acidez del fenol, los sustituyentes atrayentes de electrones (como en el caso del *p*-Clorofenol), estabilizan al ion Fenóxido, haciendo más ácido el fenol, mientras que los sustituyentes dadores de electrones (como el *p*-Cresol), aumentan la energía del ion fenóxido y disminuyen la acidez del fenol²⁷.

Ecuación 1. Disociación del fenol en el agua



Fuente: WEININGER, Stephen. Química Orgánica²⁸. p. 986

La solubilidad de los fenoles en álcalis acuosos es mayor que en el agua, por esto, el fenol en medio básico es un excelente nucleófilo (carácter básico), siendo la especie nucleofílica el *ion fenóxido*²⁹; el fenol disuelto en una solución acuosa de hidróxido es lo suficientemente fuerte como base para llevar a cabo la siguiente reacción y producir fenóxido de sodio, y el ion hidróxido es lo

²⁶ KLAGES, F. Tratado de Química Orgánica. Química orgánica sistemática. Disponible en: [www.bbhhttp://books.google.com.co/books?id=nhcGf55Gy58C&pg=PA239&dq=solubilidad+fenol&ei=f7JbSqz-JJKAzGYzPwi](http://books.google.com.co/books?id=nhcGf55Gy58C&pg=PA239&dq=solubilidad+fenol&ei=f7JbSqz-JJKAzGYzPwi). p 239.

²⁷ WEININGER, Stephen. Química Orgánica. Barcelona: Reverté, 1988. p 986. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=O6YvtgAtXmcC&printsec=frontcover>

²⁸ WEININGER, Stephen. Química Orgánica. Barcelona: Reverté, 1988. 1202p. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=O6YvtgAtXmcC&printsec=frontcover>

²⁹ GEISSMAN, T. A. Principios de química orgánica. p 734. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=msYg6lgMFU8C&pg=PA734&dq=solubilidad+fenol&lr=&ei=QLxbStPZBJ-cyATaupGWBw>

Ecuación 2. Reacción del fenol con Hidróxido de sodio



- › Preparación de antisépticos y desinfectantes.
- › Productos farmacéuticos.
- › Indicadores químicos (fenolftaleína).
- › Producción de resinas fenólicas, resinas epoxi y nylon.
- › Industria petroquímica
- › Preparación de especies químicas: ácido salicílico, ácido adípico, pentaclorofenol, reactivos de laboratorio y otros compuestos.
- › Preparación de pinturas germicidas.

- Fenol
- 2-Monoclorofenol
- 4-Monoclorofenol
- 2,4-Diclorofenol
- 2,6-Diclorofenol
- 2,4,6-Triclorofenol
- Tetraclorofenoles
- Pentaclorofenoles
- Cresoles
- Naftoles

³¹ Disponible en: www.fcca.es/Docs/Informe%20fenoles.doc. [citado Abril 2008]

ambiente por la combustión de madera³²; a pesar de esto, la Tabla 9 muestra que en el medio acuático, el fenol puede transformarse en nitrosfenol en presencia de nitratos que además, pueden formar complejos moleculares de carácter salino al interactuar con metales formadores de complejos³³. Numerosas investigaciones han demostrado que los nitrofenoles como los cresoles, son sustancias altamente tóxicas con escasa biodegradabilidad³⁴, la Tabla 6 muestra la biodegradabilidad de algunos de estos derivados fenólicos en función de la relación DBO₅/DQO.

Tabla 6. Ejemplos de biodegradabilidad en función de la relación DBO₅/DQO

Compuesto	Concentración (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DBO ₅ /DQO
4-cresol [1]	108	247	14	0.06
2-nitrofenol [2]	139	215	14	0.07
4-nitrofenol [2]	2000	3400	170	0.05
Referencias: [1] Disponible en: http://weblogs.madrimasd.org/remtavares/archive/2009/04/10/116237.aspx [citado Abril 2009] [2] Disponible en: http://weblogs.madrimasd.org/remtavares/archive/2009/02/20/113222.aspx [citado Abril 2009]				

Fuente: adaptado por los autores, 2009

3.2.1.1 Información Toxicológica Puesto que existe una gran variedad de compuestos fenólicos, sus efectos en organismos vivos varían según la especie. De forma genérica, los fenoles son sustancias muy tóxicas (Hazard Rating=3) en estado puro³⁵, causa la muerte por la ingestión de tan sólo 1 g y puede causar envenenamiento por absorción por la piel; aunque es irritante al tracto respiratorio, su baja volatilidad hace de la inhalación un riesgo menor³⁶, la EPA ha clasificado el fenol dentro del *grupo D*, es decir, sustancia no carcinógena para humanos y animales, basados en la falta de datos relativos a estudios sobre los efectos carcinógenos del mismo³⁷; los aspectos relacionados con la toxicidad de esta sustancia y los riesgos específicos de la misma, se presentan en el Anexo B, los efectos a la salud humana se resumen en la Tabla 7.

Estos compuestos tienen una alta demanda de oxígeno, si se vierte como residuo industrial al medio ambiente y en especial al agua, resulta muy tóxico.

³² Disponible en: <http://weblogs.madrimasd.org/remtavares/archive/2009/02/20/113222.aspx> [citado Abril 2009]

³³ KLAGES, F. Op cit. p 751

³⁴ Disponible en: <http://weblogs.madrimasd.org/remtavares/archive/2009/04/10/116237.aspx> [citado Abril 2009]

³⁵ Disponible en: www.fcca.es/Docs/Informe%20fenoles.doc. [citado Abril 2008]

³⁶ Disponible en: <http://www.fichasdeseguridad.com/fenol.htm>. [citado Abril 2008]

³⁷ Disponible en: <http://www.lakes-environmental.com/toxic/PHENOL.HTML>. [Citado Mayo 2009]

A la concentración de 1mg/L puede ocasionar la extinción de peces y la vida acuática, destrucción de bacterias e interrupción de la autpurificación³⁸.

Tabla 7. Efectos a la salud humana por exposición al fenol

EFFECTOS A LA SALUD HUMANA	<i>En contacto con la piel</i>	› Riesgo de absorción cutánea. Quemaduras si la exposición es muy prolongada [1]
	<i>Por contacto ocular</i>	› Quemaduras. Riesgo de ceguera [1]
	<i>Por inhalación</i>	› Irritaciones de mucosas, tos, dificultades respiratorias [1] › Estudios sobre trabajadores expuestos al fenol concluyen la absorción por inhalación es significativa, con base en estudios de balance de masa se ha determinado que el fenol es eficientemente absorbido en los pulmones [2]
	<i>Efectos sistémicos</i>	› Efectos en el sistema nervioso central, trastornos cardiovasculares, alteraciones sanguíneas, sensibilización, reacción alérgica [1] › Alteraciones hepáticas, renales y cardíacas, incluyendo la toxicidad cardíaca y pulso débil, depresión cardíaca, y la reducción de la presión arterial por exposición oral [3] › Dermatitis de contacto y decoloración de la piel [4] › Existen datos limitados sobre la exposición crónica por inhalación o exposición oral, sin embargo, un estudio publicado por la ATSDR asoció síntomas como dolor muscular, debilidad, niveles elevados de enzimas hepáticas [3]
REFERENCIAS: [1] PANREAC. Ficha de datos de seguridad 134852. [Citado Mayo 2009]. Disponible en: http://www.panreac.com/new/esp/fds/ESP/X134852.htm [2] EPA. Toxicological Review of phenol. CAS No. 108-95-2. Washington D.C.: Septiembre 2002. [Citado Abril 2008], Disponible en: http://www.epa.gov/IRIS/toxreviews/0088-tr.pdf [3] Disponible en: http://www.lakes-environmental.com/toxic/PHENOL.HTML . [Citado Mayo 2009] [4] Manejo del fenol y derivados fenólicos. [Citado Mayo 2009]. Disponible en: http://www.sprl.upv.es/IOP_SQ_33.htm#punto3		

La Tabla 8 relaciona los límites de exposición al fenol:

Tabla 8. Límites de exposición Ocupacionales al fenol

REFERENCIAS	VALOR
TWA (Piel) – NIOSH. Tiempo promedio recomendado: 10 h	5 ppm (19 mg/m ³)
TWA (Piel) – NIOSH. Límite máximo recomendado en 15 min	15.6 ppm (60 mg/m ³)
DFGMAK (Peligro cutáneo de absorción) - EC OEL TWA (piel)	2 ppm (7.8 mg/m ³)
TLV (OSHA). Durante una jornada de 8 horas diarias y 40 horas semanales de trabajo	19 mg/m ³

Fuente: <http://www.ventanamed.com/msds/files/00232044ES.PDF>

El principal problema a confrontar en el tratamiento anaerobio de aguas residuales con compuestos fenólicos, son las altas concentraciones de estos compuestos, que en la mayoría de los casos son inhibitorias para los

³⁸ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. p. 229, 233, 246

microorganismos. Se ha observado una inhibición de los compuestos fenólicos hacia las bacterias metanogénicas a concentraciones de 250 a 3000 mg/L. De entre los compuestos aromáticos el fenol es de los menos tóxicos, pero la toxicidad aumenta si se incrementa la cantidad de grupos alquil o cloro sustituidos³⁹.

3.2.2 Transporte, distribución y transformación en el ambiente⁴⁰

El fenol que está presente en el aire se encuentra casi exclusivamente en fase gaseosa, la deposición seca por partículas se considera insignificante. Con base en su relativa alta solubilidad en el agua y su relativa baja presión de vapor, se considera que en su distribución entre el agua y el aire termina en su mayoría en la fase del agua.

El valor del coeficiente de partición (K_{oc}) del fenol para algunas arcillas (31 y 91 dm³/Kg) indica que el fenol puede tener alta movilidad en el suelo, y por tanto puede filtrarse a las aguas subterráneas. En el agua y suelos húmedos el fenol se encuentra en un estado parcialmente disociado, de allí que su transporte y reactividad pueda afectarse por el pH, con un $pK_a = 10$, el fenol existirá en el agua principalmente como un ácido protonado, en valores de pH ambiental, en suelos y aguas alcalinos, existirá parcialmente como anión, lo cual puede afectar su destino y procesos de transporte; además las mediciones de la absorción y desorción del fenol del agua a la superficie de sedimentos indican que el fenol se fija fuertemente al suelo. La absorción del fenol en el suelo o la biomasa microbiana puede disminuir por la presencia de derivados fenólicos. El fenol es el principal metabolito del benceno, por lo que se encuentra ampliamente en el ambiente, por esto, el fenol puede formarse en el ambiente como resultado de la degradación natural del benceno⁴¹.

Si bien, numerosos estudios recopilados y desarrollados por la EPA⁴² sugieren que el fenol puede ser rápida y completamente degradado bajo condiciones de agua natural y agua residual en plantas de tratamiento, los datos reportados por la misma agencia de concentraciones en diferentes medios, demuestran que a pesar de su aparente biodegradabilidad, aún está presente en el ambiente, lo que sugiere que las condiciones exactas bajo las que el fenol se degrada rápidamente, no se presenta en todos los casos. La Tabla 9 resume las interacciones puede tener esta sustancia en los medios.

³⁹ PUIG Grajales, M^a del Carmen. Op Cit. p 16

⁴⁰ World Health Organization. Environmental Health Criteria 161 – Phenol. Geneva: WHO, 1994. p. 30

⁴¹ EPA. Toxicological Profile of Phenol – Draft. 2006. p. 159, Disponible en: www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp115-c6.pdf. [citado Abril 2008]

⁴² EPA. Op Cit. p 168

Tabla 9. Interacciones del fenol en los medios

Medio		Elementos y/o factores que influyen en las reacciones del fenol	Productos
DEGRADACIÓN ABIÓTICA	AGUA ^a	<p>Las reacciones fotoquímicas aceleran la degradación en este medio.</p> <p>--(NO₃)⁻ (En soluciones acuosas diluidas) y con la presencia de:</p> <p> $\left\{ \begin{array}{l} \text{--(OH)}^{-a} \\ \text{--(Perox)}^{-a} \\ \text{--(Fenoxilo)}^{-a} \end{array} \right.$ </p> <p>Ácido Nitroso</p>	<p> $\left\{ \begin{array}{l} \text{Nitrosofenol} \\ \text{Nitroquinona} \\ \text{Dihidroxibencenos} \end{array} \right.$ </p> <p>Cianuro</p>
	SEDIMENTOS ^a	<p>Fuerte fijación por procesos de absorción y adsorción*</p> <p>El fenol puede degradarse luego de la adsorción, aunque la presencia de sorbentes reduce la tasa de biodegradación.</p> <p>El coeficiente de partición de sorción en el suelo es moderadamente bajo (1.21-1.96), sugiere que la sorción en los sedimentos no es un proceso importante de transporte en el medio⁴³</p>	
BIODEGRADACIÓN	CONDICIONES	<p>Biodegradación anaerobia \longrightarrow</p> <p>CO₂ + CH₄ + Biomasa bacteriana</p> <p>El número de bacterias capaces de utilizar el fenol es generalmente un pequeño porcentaje de la población total presente en el medio. Sin embargo, la exposición repetida al fenol puede dar a lugar a la aclimatación de éstas, favoreciendo así a las cepas que emplean el fenol como alimento</p>	<p><i>Productos intermedios:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Benzoato - Catecol - cis-cis-muconato - β-ketoadipato - succinato - acetato
		<p>Factores que afectan la biodegradación⁴⁴:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentración del fenol - Temperatura - Luz solar - Profundidad - Otros nutrientes para el crecimiento bacteriano - Presencia de otros contaminantes - Abundancia de bacterias 	
<p>* La adsorción en suelos o biomasa microbiana, puede disminuir por la presencia de derivados del fenol</p> <p>^a Las bacterias juegan un rol principal en estos medios para la degradación. En el agua y sedimentos, la degradación puede verse afectada o excluida por la presencia de altas y tóxicas concentraciones de fenol u otros químicos</p> <p>^a Ver Figura 2</p>			

Fuente: adaptado por los autores, 2009

⁴³ Ibid. p. 166

⁴⁴ Ibid. p. 165

3.2.3 Bioquímica del fenol: muchos de los fenómenos que se encuentran en las aguas naturales y muchos de los procesos que constituyen el tratamiento de aguas residuales se deben a reacciones redox que son catalizadas por sistemas biológicos⁴⁵ (ver Tabla 10). La mayoría de estas reacciones químicas que provocan estos organismos, ocurren a temperaturas mucho más bajas de las que se requerirían en su ausencia, por esta razón se necesitan de catalizadores que bajen notablemente la energía de activación de la reacción; los catalizadores son aportados por los organismos vivos y se conocen como enzimas, la Figura 2 muestra un esquema general de la ruta de degradación anaerobia de compuestos aromáticos.

Tabla 10. Reacciones de transformación mediadas por

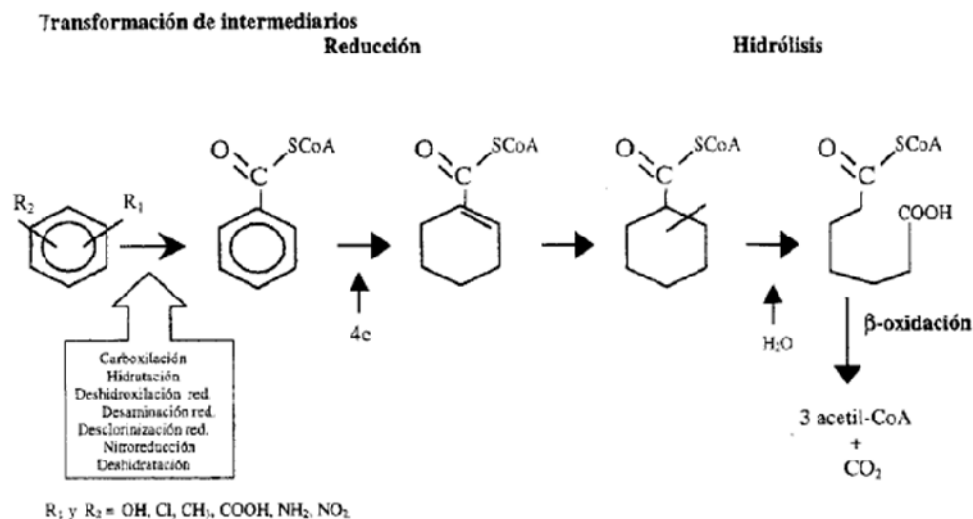
bacterias	1. OXIDACIÓN: liberación de electrones durante la transformación
	2. REDUCCIÓN: adición de electrones durante la transformación
	3. HIDRÓLISIS: adición de agua
	4. SUSTITUCIÓN: cambio de un grupo funcional por otro (OH ⁻ o HS ⁻ por Cl ⁻)
	5. ELIMINACIÓN: remoción de átomos de carbono adyacentes quedando un enlace doble entre ellos

Fuente: SAWYER, Clair. Química para Ingeniería Ambiental⁴⁶. Adaptado por los autores

⁴⁵ SNOEYINK, Vernon; JENKINS, David. Química del Agua. 1 ed. México: Limusa, 1987. P 443

⁴⁶ SAWYER, Clair; McCARTY, Perry y PARKIN Gene. Química para Ingeniería Ambiental. 4 ed. Bogotá: Mc Graw Hill, 2000.

Figura 2. Esquema de la ruta de degradación anaerobia de compuestos aromáticos



Fuente: PUIG Grajales, M^a del Carmen. Degradación de compuestos oxigenados y alquilfenoles bajo condiciones anaerobias. p 63.

3.3 RUTAS DE ELIMINACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Considérese una ruta como cualquier proceso que elimina compuestos orgánicos volátiles de un sitio. La remoción puede ser física (como en la volatilización de un disolvente de un embalse de superficie) o química (como en la oxidación de un alcohol en una planta de tratamiento de aguas residuales).

El tipo de unidades y tratamiento que se empleen, pueden influir de manera significativa en los procesos de eliminación de los compuestos orgánicos volátiles de un sitio, en consecuencia, la importancia de las rutas varía considerablemente, por lo que es posible excluir pequeñas rutas por considerarse insignificantes para estos procesos de eliminación.

Una ruta puede considerarse como una tasa o velocidad del proceso, la tasa a menudo depende fuertemente de la concentración de la desaparición de especies y la temperatura del sistema, y varían en el orden de cero a dos, con predominio de primer orden a bajas concentraciones, que es la siguiente:

Ecuación 3. Tasa o velocidad del proceso

$$tasa = -\frac{dc}{dt} = K_v c$$

Donde :

c = concentración de desaparición, g/l.

t = tiempo, s, y

K_v = constante de volatilización, s⁻¹

La vida media es un concepto útil, es el tiempo requerido para que desaparezca la mitad de la sustancia, ésta es una medida fácil de visualizar el tiempo necesario para la desaparición. Para una tasa de proceso expresada en una ecuación de primer orden, la expresión es:

Ecuación 4. Vida Media

$$t_{1/2} = (\ln 2)K_v^{-1} = 0.693K_v^{-1}$$

Donde :

$t_{1/2}$ = Vida media, en segundos

K_v = constante de volatilización, s^{-1}

La vida media expresada en una ecuación de segundo orden es:

Ecuación 5. Vida Media expresada en una ecuación de segundo orden

$$t_{1/2} = K_s^{-1}C_o^{-1}$$

Donde :

K_s = Constante de volatilización de segundo orden, L / (GCS)

C_o = Concentración inicial, g / L de volatilización, s^{-1}

Cabe resaltar que la vida media en la ecuación de primer orden es independiente de la concentración inicial, a diferencia de la vida media en la de segundo orden. La Tabla 11 presenta una breve descripción algunas rutas por las que se pueden eliminar los compuestos orgánicos, éstas permiten comprender la destrucción y remoción de sustancias orgánicas en un sistema de tratamiento biológico; la hidrólisis, la oxidación y la reducción pueden ser químicas (abióticas), o mediadas por microorganismos (bióticas), en muchos casos, las reacciones de transformación mediadas por microorganismos son mucho más rápidas que las reacciones abióticas⁴⁷; la Tabla 12 compara la importancia de estas rutas en diferentes sistemas de tratamiento, a partir de la misma puede concluirse que la volatilización y la biodegradación son las rutas más significativas en un sistema de tratamiento no aireado.

Tabla 11. Algunas rutas de eliminación de compuestos orgánicos.

RUTA	DESCRIPCIÓN
VOLATILIZACIÓN	Se produce cuando las moléculas de una sustancia disuelta escapan a una fase gaseosa adyacente, la fuerza motriz de este proceso en líquidos no turbulentos es la difusión molecular. La Ecuación 3 muestra la tasa de volatilización de una sustancia orgánica del agua.

⁴⁷ Disponible en: www.idard.org.do/capacitacion/1erDiplomado/Docu/Movimiento.pdf [Citado Abril 2009]

SORCIÓN /PARTICIÓN		La sorción es también un proceso importante que afecta la destrucción y el transporte de las sustancias orgánicas en las aguas superficiales y profundas. El termino general sorción es utilizado por lo general para los procesos naturales en lugar de adsorción o absorción debido a que a menudo se desconoce la forma exacta como ocurre la partición hacia los sólidos
REACCIONES DE TRANSFORMACIÓN	Degradación Biológica / Biotransformación	Esta ocurre cuando los microorganismos rompen los enlaces de los compuestos orgánicos para emplearlos en sus procesos metabólicos. La tasa de descomposición depende de la estructura del compuesto y de las necesidades de los microorganismos
	Descomposición Fotoquímica	Este proceso ocurre de dos formas: una sustancia química puede absorber luz y reaccionar (fotólisis directa), o la sustancia puede reaccionar a causa de la absorción de luz de los elementos que lo rodean (fotólisis indirecta)
	Oxidación / Reducción	Los compuestos orgánicos en sistemas acuáticos pueden ser oxidados por el oxígeno, o radicales hidroxilo o peróxidos. En ambientes anaerobios se presentan reacciones de reducción. Los compuestos organoclorados se ven particularmente afectados.
	Reacciones de radicales Hidroxilo	Estas reacciones se producen a través de la adición de un radical hidroxilo, la abstracción de un átomo de hidrógeno, o ambos.
	Hidrólisis	Ésta ocurre cuando una sustancia reacciona con el agua. Para los compuestos orgánicos, por lo general en la reacción, un grupo funcional se sustituye con un hidroxilo

Fuente: EPA, 1994. Adaptado por los autores

Tabla 12. Importancia de algunas rutas en sistemas de tratamiento de agua residual

Ruta	Sistemas de Tratamiento de Agua Residual		
	Embalse de superficie	Aireado	No aireado
Volatilización	I	I	I
Biodegradación	I	I	I
Fotodescomposición	S	N	N
Hidrólisis	S	S	S
Oxidación / Reducción	N	N	N
Sorción	N	S	S
Reacciones de radicales hidroxilo	N	N	N
I= Importante S= Secundario N= No aplica			

Fuente: EPA, 1994. Adaptado por los autores

3.3.1 Volatilidad de los solutos orgánicos disueltos La volatilización es un proceso de evaporación de fases líquida o sólida que ocurre cuando los contaminantes líquidos en fase no acuosa o disueltos en agua contactan con una fase gaseosa. Este es un proceso importante que tiene lugar en la

remoción y descomposición de los compuestos orgánicos en el medioambiente⁴⁸ y está clasificado como un fenómeno de superficie ya que ocurre en la superficie libre del líquido, está controlado por la presión de vapor del soluto orgánico y además responde a la Ley de Henry⁴⁹ debido a que esta ley es comúnmente empleada para estudiar la volatilización de solutos⁵⁰.

3.3.1.1 Presión de Vapor: La presión de vapor significa una tendencia del compuesto a la evaporación y es esencialmente la solubilidad de un disolvente orgánico en un gas; la presión de vapor de un sólido o un líquido es la presión del gas en equilibrio respecto al sólido o al líquido a una temperatura dada, el equilibrio dinámico entre las dos fases se alcanza más rápidamente cuanto mayor sea la superficie de contacto entre el líquido y el vapor, pues así se favorece la evaporación del líquido; cuanto mayor es la presión de vapor, mayor es la concentración de vapor producida por la sustancia. En función de la presión de vapor (mmHg a 20°C) se clasifica la *volatilidad* de una sustancia, dicha clasificación se presenta en la Tabla 13, la presión de vapor del fenol es de 0.357 mmHg, lo que permite clasificarlo como una sustancia muy poco volátil⁵¹.

Tabla 13. Clasificación de volatilidad de las sustancias

Presión de Vapor (mmHg a 20° C)	Clasificación
< 1	Muy poco volátil.
1 – 30	Poco volátil.
30 – 100	Volátil.
100 – 500	Muy volátil.
> 500	Extremadamente volátil.

Fuente: http://emergencias.euskadi.net/AyudaFichas/html/body_propiedades.html

- **Influencia de la Temperatura:** con el aumento de la temperatura de una sustancia la presión de vapor aumenta, la relación entre estas dos variables no es lineal, sin embargo, para cada valor de temperatura habrá un valor fijo de presión de vapor saturado para cada líquido.

3.3.1.2 Constante de Henry: para estudiar y describir la volatilidad de los compuestos orgánicos de importancia ambiental, la ley de Henry puede describirse ligeramente. La constante de Henry (*H*) del equilibrio químico entre las fases gaseosa y acuosa, expresada con la Ecuación 6, puede ser entendido

⁴⁸ SAWYER, Op Cit. p.30

⁴⁹ Ley de Henry: “a temperatura constante, el peso de un gas que se disuelve en un volumen dado de un líquido, es directamente proporcional a la presión que el gas ejerce sobre el líquido”

⁵⁰ Disponible en: <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ19.pdf>. [citado Abril 2009]

⁵¹ http://emergencias.euskadi.net/AyudaFichas/html/body_propiedades.html [citado Abril 2009]

como el coeficiente de partición entre el agua y la atmósfera; los compuestos orgánicos son menos volátiles a menor temperatura por lo que la constante de Henry tiene una fuerte dependencia de la temperatura, por tanto a mayor valor de H, mayor es la probabilidad del compuesto de separarse a la atmósfera, a 20 °C el valor de esta constante para el Fenol es de $4.57 \times 10^{-7} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{moles}$ ⁵².

Ecuación 6. Constante de la ley de Henry

$$H = \frac{\text{Concentración del compuesto en el gas}}{\text{Concentración del compuesto en el agua}}$$

3.4 BALANCE DE MASAS

Como su nombre lo indica, el balance de masas hace referencia a la conservación de la materia, muchos contaminantes en el ambiente son afectados por transformaciones físicas, químicas, biológicas o nucleares por lo cual, los sistemas donde ocurren aquellas transformaciones deben considerarse sistemas no conservativos. A partir de este concepto, el balance puede definirse como una cuantificación de un contaminante de interés a través del sistema de tratamiento, considerando las características del mismo; este procedimiento de evaluación es una alternativa que permite analizar las rutas que toma el contaminante y establecer relaciones entre éstas y las mediciones hechas en campo.

El balance de masas es muy utilizado en situaciones donde se presentan reacciones químicas, pero también son útiles cuando se realizan operaciones que involucran variables físicas. En general, la US-EPA considera que los balances de materia son apropiados en situaciones donde la cantidad de material se pierde por liberación a la atmósfera.⁵³

El concepto de continuidad o de conservación de masa es uno de los más fundamentales en ingeniería, básicamente este concepto establece que para un sistema real, en el cual el material se *acumula* dentro del sistema, existe una variación entre las entradas y las salidas (ver Ecuación 7), y cuando el material es *producido* o *consumido* dentro del sistema, el concepto de variación se puede escribir tal como se presenta en la Ecuación 8; este concepto general

⁵² SAWYER, Op Cit. p.288

⁵³ IDEAM. Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. [Presentación en diapositivas]. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. [2006], diapositiva 27. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/Presentacion_protocolo.ppt [Citado Junio 2009]

puede ser utilizado para resolver, o al menos abordar, una serie de problemas existentes en la ingeniería o las ciencias ambientales⁵⁴.

Ecuación 7. Variación de la materia entre la salida y entrada de un sistema

$$\text{Variación} = \text{Entradas} - \text{Salidas}$$

Ecuación 8. Balance de masas en un sistema no conservativo⁵⁵

$$\text{Variación} = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Producción} - \text{Consumo}$$

Para simplificar la Ecuación 8, puede considerarse una variable Z, la cual se presenta en la Ecuación 9, esta representa la variable de reacción dentro del sistema, la cual puede ser positiva o negativa, dependiendo del tipo de reacción que predomine dentro del sistema.

Ecuación 9. Variable de reacción dentro del sistema

$$Z = \text{Producción} - \text{Consumo}$$

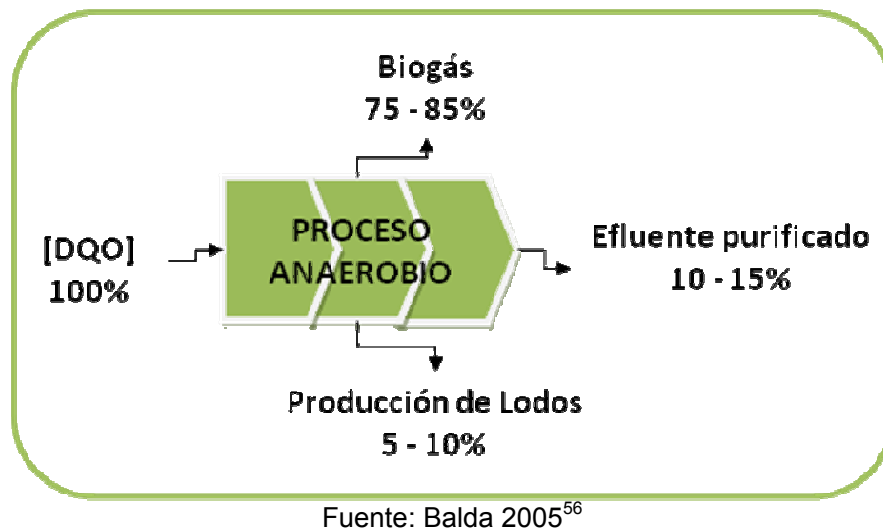
En muchos casos el consumo puede ser modelado como una reacción de primer orden, en la cual se supone que la tasa de consumo es proporcional a la concentración del material presente en el sistema (ver numeral 3.3, Ecuación 3)

La Figura 3 representa el balance teórico de la Demanda Química de Oxígeno en un proceso anaerobio. En un sistema anaerobio, básicamente se consideran cuatro opciones para la degradación o no del material orgánico, cuantificado como DQO (van Haandel & Lettinga, 1994): conversión en lodo, conversión en metano (biogás), mineralización a través de la oxidación y permanencia en la fase líquida (descarga en el efluente).

⁵⁴ RODRIGUEZ, D. Balances de materia o masa. Guía CI41B para Ingeniería Ambiental. Semestre Otoño 2004. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/CI41B/1/material_alumnos/previsualizar?id_material=20695. [Citado Junio 2009]

⁵⁵ Ibid, p. 3

Figura 3 .Balance teórico de DQO en un sistema anaerobio.



Para la elaboración del balance se hace necesario determinar la cantidad de lodos producidos en función de la carga contaminante (DQO). La Figura 3 muestra la relación existente entre la DQO que ingresa al sistema anaerobio y la proporción que se encuentra relacionada con la producción de lodo, de tal forma que es posible plantear la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Producción de Lodos.

$$\text{Producción de Lodo} = 10\% * DQO_{\text{Entrada}}$$

Una vez se conozca la generación aproximada de lodos, es posible dar inicio a la serie de ecuaciones que conformen el balance, de acuerdo con el contaminante de interés.

3.5 MODELACIÓN MATEMÁTICA EN INGENIERÍA

La modelación es la comprensión del comportamiento de un sistema o proceso del mundo real simulado experimentalmente en un ordenador con el fin de obtener resultados acordes al funcionamiento real a partir de una hipótesis o conjunto de hipótesis de trabajo. Lo que pretende la simulación es descubrir el comportamiento del sistema, postular teorías o hipótesis que expliquen lo observado y usar esas teorías para predecir los resultados ante determinadas

⁵⁶ BALDA, Roberto. Tratamiento Anaerobio. [Diapositivas de clase] Recurso Agua. Universidad de La Salle. [2005], diapositiva 10. [Citado Junio 2009]

condiciones⁵⁷; la modelación es una herramienta de gran utilidad en diferentes disciplinas, en la Ingeniería Ambiental y Sanitaria es común el empleo de técnicas como éstas para la obtención de datos sin la necesidad de usar equipos de medición directa, lo que ahorra esfuerzos de trabajo en extensas jornadas de campo pues permite la mejor comprensión del sistema a analizar, sea en la matriz de aire, agua, suelo e incluso en el manejo de los residuos sólidos.

3.5.1 Modelos de emisión y emisiones atmosféricas para residuos y aguas residuales: Con el paso de los años se han desarrollado diversos modelos analíticos para estimar emisiones de compuestos orgánicos e inorgánicos de unidades de manejo de residuos y aguas residuales. Muchos de esos modelos han sido incorporados dentro de hojas de cálculo tales como CHEMDAT8⁵⁸, estos modelos pueden emplearse para estimar la magnitud de las emisiones puntuales para propósitos regulatorios⁵⁹.

Los modelos de emisión deben considerar como factor clave para sus predicciones el proceso de volatilización de las sustancias a modelar (ver numeral 3.3.1). De manera general, la volatilización es el proceso de partición de una sustancia en su fase gaseosa⁶⁰, los resultados de un cálculo de partición pueden ser usados para identificar aquellas características que son importantes para determinar los compuestos orgánicos relativos mostrando los índices de pérdidas, de allí que los términos “volátil” y “semivolátil” sean empleados en estos modelos analíticos para describir la tendencia de un compuesto orgánico para su partición en las fases.

Para predecir la liberación de compuestos volátiles a la atmósfera de residuos líquidos descargados en los sistemas colectores y de tratamiento, pueden emplearse los factores de emisión a la atmósfera. En el caso de las unidades tratamiento, los factores de emisión son sensibles a la magnitud de la velocidad del flujo dentro de estos ya que los compuestos volátiles presentes en los residuos líquidos en tratamiento, pueden ser emitidos a la atmósfera a través de mecanismos de transferencia de masa del aire que fluye a través del mismo; el aire puede entrar en las diferentes unidades de diferentes formas

⁵⁷ FELICÍSIMO, Angel Manuel. Modelo de Simulación: Cap1. Conceptos básicos, modelos y Simulación, 2001, p3. [citado Abril 2008]. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/-feli/>

⁵⁸ CHEMDAT8 es una hoja de cálculo Lotus 123® elaborada por la EPA que incluye modelos para la estimación de emisiones de COVs en establecimientos de manejo de residuos peligrosos.

⁵⁹ EPA. USER'S GUIDE FOR WATER9 SOFTWARE. Version 2.0.0. August 16, 2001, p 1-1. Disponible en : <http://www.epa.gov/ttnchie1/software/water/index.html>

⁶⁰ Disponible en: http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/JornadasPreservacion_VI/031.pdf [citado Abril 2008]

según la unidad o conducto, sea un pozo de inspección, conductos cerrados con sistema de ventilación, desagües, etc.; es así que el factor de emisión dependerá de la estimación del flujo de aire en el sistema, en relación con el flujo de las aguas residuales que fluyen dentro del mismo, permitiendo estimar la fracción de la pérdida de constituyentes volátiles a la atmósfera.

3.5.1.1 WATER9: desde 1970 la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos desarrolla investigaciones que permitan evaluar condiciones ambientales, así como identificar, entender y solucionar problemas ambientales actuales y futuros⁶¹, es así como se han desarrollado modelos de predicción en diferentes campos, como lo es el WATER9. Este es un programa de modelación (el cual es puesto en plataforma Windows) y cuyo objetivo es estimar emisiones de plantas de tratamiento de aguas residuales. WATER9 usa algunos de los mismos modelos que se encuentran en CHEMDAT8, pero contiene datos para un total de 800 compuestos. Este programa también tiene mejoras gráficas para ayudar al usuario a visualizar el sistema que está siendo modelado.

Este programa es una importante actualización de las características anteriormente obtenidas en los programas WATER8, CHEM9, y CHEMDAT8; contiene un conjunto de modelos de equipos que pueden ser utilizados juntos en un proyecto para proporcionar un modelo para toda una instalación de tratamiento de aguas o residuos. WATER9 es capaz de evaluar una completa instalación que contiene múltiples configuraciones de unidades de tratamiento⁶².

Las estimaciones de las emisiones se basan en las propiedades del compuesto y su concentración en el agua; para obtenerlas, el usuario debe identificar los compuestos de interés, y proporcionar al programa sus concentraciones. La identificación de los compuestos se puede hacer a través de la selección de la base de datos que acompaña el programa o introduciendo nuevos datos para las propiedades de un compuesto que no figura en la base de datos⁶³.

Para el manejo de este modelo se debe de contar con algunos datos o parámetros de entrada tales como: sólidos disueltos, sólidos totales, aceites y grasas, caudal, diámetro de la tubería, temperatura del agua y como dato opcional si se tiene, también se puede incluir el valor de la concentración del compuesto que se quiere analizar; de esta manera la obtención de los valores de emisión que genera el WATER9 serán mas precisos. El principio del wáter9

⁶¹ Disponible en: <http://www.epa.gov/espanol/sobreepa.htm#whatwedo>. [citado Abril 2008]

⁶² EPA. Op. cit. p. 1-2

⁶³ Ibid., p. 1-3

se fundamenta en el uso de plantas de tratamiento de aguas residuales para la obtención de valores de emisión de contaminante que se generan en los tratamientos de aguas y así poder determinar que dichas emisiones contribuyan o sean relevantes en la contaminación atmosférica. Existen muchos modelos empleados tanto en agua como en aire, entre estos están: QUAL II⁶⁴; es un modelo que simula valores de calidad de agua; el AERMOD VIEW⁶⁵; es un modelo de dispersión para la calidad de aire en fuentes fijas y móviles; el CALINE 4⁶⁶, es un modelo de dispersión para fuentes móviles, entre otros modelos. Entre estos otros modelos se puede encontrar el WATER9, que es la base de este proyecto de investigación; como se puede notar, existen varios tipos de modelos, pero en este caso se utilizó el WATER9, debido a que es hasta el momento el único que combina las interacciones agua-aire, además, por que estima emisiones generadas en PTAR's, situación que otro tipo de modelos no manejan.

3.6 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

3.6.1 Localización: la planta de tratamiento se encuentra situada en la en la Carrera 7 con Calle 175, en las instalaciones de la Universidad de La Salle, sede La Floresta. La Figura 4 presenta su localización, estas instalaciones pertenecen a la localidad de Usaquén, la cual se encuentra ubicada en el extremo nororiental de Bogotá, limitando al occidente con la Autopista Norte, que la separa de la localidad de Suba; al sur con la calle 100, que la separa de la localidad Chapinero; al norte con los municipios de Chía y Sopo; y al oriente con el municipio de La Calera.

⁶⁴ <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=807596>

⁶⁵ <http://www.weblakes.com/ISCAERMOD/ISCAERFeatures.html>

⁶⁶ <http://www.ess.co.at/GAIA/models/msqlpdb/models/caline/cal1-3.htm>

Figura 4. Localización de la Universidad de la Salle – Sede La Floresta



Fuente: Secretaria De Ambiente⁶⁷, 2009

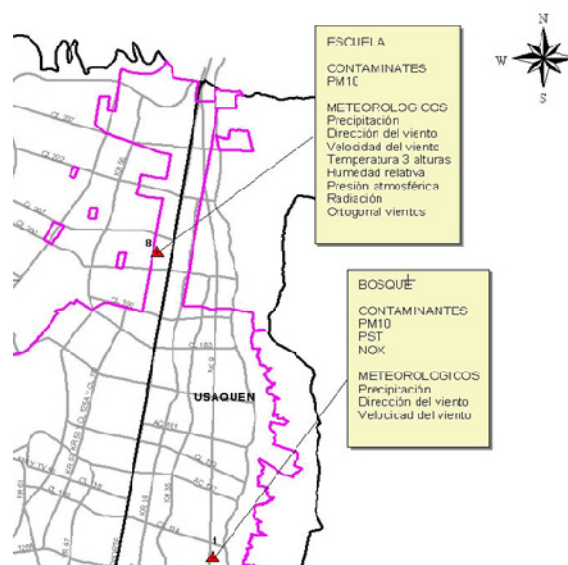
3.6.2 Contaminación atmosférica en la localidad: La calidad del aire se ve afectada por dos tipos de fuentes. La primera se debe al transporte de materiales en las canteras. Estas fuentes móviles producen levantamiento de polvo que se asientan en el sector y viajan hasta depositarse sobre nuevos focos de dispersión como las vías. La segunda fuente es ocasionada por el alto tráfico vehicular que emite monóxido de carbono, el momento más crítico de emisión de gases se da en las denominadas horas pico.⁶⁸

Para la evaluación permanente de la calidad de aire en la localidad, se cuenta con las estaciones ubicadas en la Escuela de ingeniería y la Universidad del Bosque, las cuales hacen parte de las 15 estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá; ambas cubren el área de influencia del proyecto, ésta se encuentra ubicada en el norte de Bogotá, su ubicación mas detallada se puede apreciar en la Figura 5.

⁶⁷ Disponible en: www.secretariadeambiente.gov.co, [Citado Abril 2009]

⁶⁸ Delgado, Adriana. Mejía, María Victoria. Diagnóstico de la actividad extractiva en la Localidad de Usaquén. Contrato 078 de 2000. Disponible en: www.dapd.gov.co/www/resources/tqv_recorriendo_usaquen.pdf, [Citado Abril 2009]

Figura 5. Localización de la estación de monitoreo



Fuente: Secretaria De Ambiente⁶⁹, 2009

⁶⁹ Disponible en: www.secretariadeambiente.gov.co, [Citado Abril 2009]

4. MARCO LEGAL

A nivel nacional, las emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles están reguladas por el Decreto 02 de 1982 y la Resolución 2380 de 2007 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, A nivel distrital la regulación de las emisiones de se encuentra enmarcada dentro del Decreto 948 de 1995, las resoluciones 775 de 2000, 389 de 2003, 1699 de 2003, 1208 de 2003 y 1908 de 2006.

En materia de vertimientos, a nivel nacional la regulación se hace a través del Decreto 1594 de 1984, en el cual se reglamenta parcialmente el [Título I de la Ley 9 de 1979], así como el [Capítulo II del Título VI - Parte II y el Título III de la Parte III - Libro I - del Decreto Ley 2811 de 1974] en cuanto a usos del agua y residuos líquidos; se puede observar que en lo concerniente a fenoles, esta estipulado en el artículo 20: considérense sustancias de interés sanitario las siguientes: Entre esta encontramos todo lo referente a fenoles cresoles clorados.

A nivel Distrital, la normatividad en cuanto a vertimientos a se cuenta con la Resolución 1074 de 1997 por la cual se establecen estándares ambientales en materia de vertimientos; con base en esta regulación y para nuestro interés, las concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y/o red de alcantarillado público a nivel Distrital es de 0,2 mg/L

La Tabla 14 presenta la descripción de los decretos y resoluciones relacionados anteriormente y la Tabla 15 consolida los límites permisibles del fenol y sus derivados presentes en la normatividad. Puesto que Colombia no cuenta con una norma reglamentada que restrinja la exposición o unos valores máximos permisibles, se hace necesaria la adopción de los niveles de referencia límites de exposición ocupacional al fenol, establecidos por la NIOSH (National institute for occupational safety and health), por OHSAS (occupational health and safety information) y por ACGIH: (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) de igual manera los efectos a la salud humana por exposición al fenol (ver Tabla 16).

Tabla 14. Relación de la normatividad colombiana aplicable

RECURSO AIRE	
Decreto 02 de 1982	Por el cual se reglamentan parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas.
Decreto 948 de 1995	Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73,74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.
Resolución 775 de 2000	Por la cual deroga la Resolución No. 509 del 8 de marzo del 2000 del DAMA y se adopta el sistema de clasificación empresarial por el impacto sobre el componente atmosférico, denominado «Unidades de Contaminación Atmosférica -UCA-» para la jurisdicción del DAMA
Resolución 1699 de 2003	Por la cual se oficializa el Programa Iniciativa de Aire Limpio de Bogotá D.C., y se dictan otras disposiciones
Resolución 1208 de 2003	Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire
Resolución 1908 de 2006	Por la cual se fijan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por las fuentes fijas de las áreas-fuente de contaminación alta Clase I; se adoptan medidas tendientes a prohibir el uso de aceites usados como combustibles en el Distrito Capital y se dictan otras determinaciones
Resolución 0601 de 2001	Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire
RECURSO AGUA	
Decreto 1594 de 1984	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.
Resolución 1074 de 1997	Por la cual se establecen estándares ambientales en materia de vertimientos.
Resolución 3957 de de 2009	Por la cual se adopta la norma técnica para control y manejo de los vertimientos realizadas a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital.

Fuente: los autores, 2009

Tabla 15. Límites permisibles establecidos en la normatividad

LÍMITES ESTABLECIDOS EN AIRE		
NORMA	LÍMITE MÁXIMO	
	COMPUESTO	UNIDAD
Resolución 0601 de 2006. Artículo 5, tabla 3 principales sustancias generadoras de olores ofensivos, umbrales	Clorofenol (C ₂ H ₅ ClO)	0.1 µg/m ³
LÍMITES ESTABLECIDOS EN AGUA		
NORMA	LÍMITE MÁXIMO	
	COMPUESTO	UNIDAD
Decreto 1594 de 1984. Artículo 74, concentraciones para el control de la carga	Fenol	0.2 mg/l
Resolución 3957 de de 2009. Artículo 14, tabla A, valores de referencia para vertimientos	Compuestos Fenólicos	0.2mg/l

Fuente: los autores, 2009

Tabla 16. Niveles de referencia límites de exposición ocupacional al fenol

LÍMITES DE EXPOSICION LABORAL				
NORMA	TWA	PEL	TLV	REL
OSHA	8 horas/día	5PPM (19 mg/m ³)	No registra	No registra
NIOSH	10 horas/día 40 horas/semana	5PPM (19 mg/m ³)	No registra	5PPM (19 mg/m ³)
ACGIH	8 horas/día 40 horas/semana	No registra	5PPM (19 mg/m ³)	No registra
TWA : Promedio ponderado en el tiempo. PEL : Límite de exposición permisible. TLV : Valor límite umbral. REL : Límite de exposición recomendados.				

Fuente: <http://www.cdc.gov/niosh/>. Adaptado por los autores, 2009

5. METODOLOGÍA

5.1 METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA MATRIZ AIRE

5.1.1 Selección de la metodología para la toma de muestras de aire: las muestras de fenol en aire pueden ser tomadas por el método de adsorción en una solución de hidróxido de sodio (NaOH)⁷⁰ contenida en botellas de lavado, burbujeadores o filtros impregnados con la misma solución; para volúmenes de aire muy grandes, el método del Hidróxido de Sodio es el más empleado, mientras que para volúmenes pequeños, algunos autores recomiendan métodos con tubos con absorbentes sólidos⁷¹.

Para seleccionar el método de muestreo, es recomendable considerar el método de análisis a emplear y su límite de detección. En la Tabla 17 se presentan algunos de los métodos y condiciones para la detección y análisis del fenol en el aire, con base en esta tabla y los materiales facilitados para el proyecto por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle, se seleccionó el método número 4; para mayor descripción ver Protocolo de Muestreo de Aire (Ver Anexo C)

Tabla 17. Métodos para la detección del fenol en el aire

Muestreo	Volumen de aire (Litros)	Pre-tratamiento	Análisis	Límite de detección ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1 Adsorbancia en solución de NaOH en botella de lavado (1 L/min)	100	Acidificación	Cromatografía de gases y detector FID	10 $\mu\text{g}/\text{muestra}$
2 Absorbancia en solución de NaOH en un burbujeador (20 L/min)	25 000	Acidificación y destilación al vapor	Cromatografía de gases y detector FID	4
3 Filtro de fibra de vidrio impregnado con NaOH y glicerol (120 Lt/min)	600	Acidificación y extracción con éter	Cromatografía de gases y detector FID	13
4 Absorbancia en solución de NaOH en un burbujeador (28 L/min)	1000	Acidificación y destilación al vapor	Colorimetría con 4-amino antipirina	2

⁷⁰ Para una mejor descripción de la adsorción del fenol con este compuesto ver el numeral 3.2.1 y la Ecuación 2

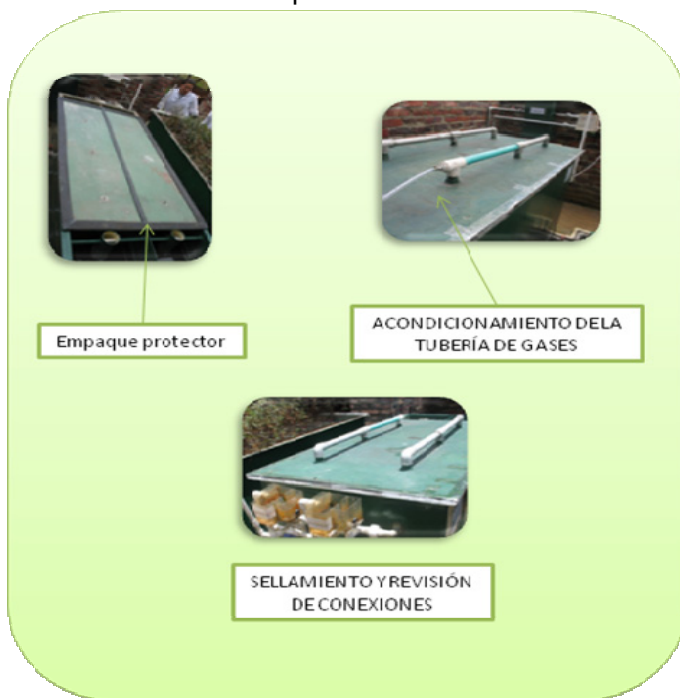
⁷¹ WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria 161 – Phenol. Geneva: WHO, 1994. p. 20

Muestreo	Volumen de aire (Litros)	Pre-tratamiento	Análisis	Límite de detección ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
5 Absorbancia en solución de NaOH en botella de lavado (1 L/min)	-	Ninguna	Colorimetría con 4-amino antipirina	700
6 Absorbancia en solución de carbonato de sodio $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ (1L/min)	30	Calibración a pH=10 y pH=7	UV a 235 nm a 2 valores de pH	160

Fuente: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria 161 – Phenol. Geneva, 1994. P. 21

5.1.2 Acondicionamiento del reactor para el muestreo: para garantizar que el biogás generado por el reactor pasara completamente por el medio de retención de fenol, fue necesario sellar el reactor con el fin de evitar fugas de gas y realizar un acondicionamiento de la tubería de conducción, adaptando un buje con el fin de reducir el diámetro de la tubería (de 1" a ¼") y así hacer la conexión a la manguera del muestreador de 3 gases (Figura 6). Cabe resaltar, que por el carácter orgánico del compuesto de interés en el muestreo, fue necesario que la manguera de conexión fuera de un material inerte, que no reaccionara con el fenol y que minimizara la posibilidad de trazas que afectaran la concentración real de las muestras; es así que se seleccionó una manguera de material inerte marca *Tygon® Fórmula SE-200*.

Figura 6. Acondicionamiento del reactor para el muestreo



Fuente: los autores, 2009

5.1.3 Pruebas preliminares del monitoreo de aire: aunque la metodología de muestreo seleccionada para el proyecto es referenciada por la Organización Mundial de la Salud (ver 5.1.1), no se encontraron estudios que emplearan este método, por lo que se hizo un muestreo preliminar y se determinó conveniente la acidificación de la muestra con ácido fosfórico y no con ácido sulfúrico, esto con el fin de eliminar las interferencias que surgen por la naturaleza de la muestra (biogás) como lo es claramente la presencia de SO₂, así como las causadas por la presencia de sustancias oxidantes y reductoras a valores de pH alcalino.

5.1.4 Selección de la metodología de análisis de muestras de aire: con base en la metodología seleccionada de la Tabla 17, se describe a continuación los procedimientos de pre-tratamiento y análisis de las muestras; el Anexo C presenta el Protocolo de Muestreo de Aire que se siguió en el trabajo.

5.1.4.1 Pre-Tratamiento de las muestras de aire: con base en las recomendaciones del método 5530 de los Métodos Normalizados para el Análisis de aguas potables y residuales⁷², es necesario acondicionar las muestras a temperatura ambiente y destilarla con el fin de eliminar impurezas que interfieran en el análisis (ver Anexo C). El montaje de destilación se describe en la Figura 7.

Figura 7. Montaje de destilación



Fuente: los autores, 2009

⁷² AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Métodos Normalizados para el Análisis de aguas potables y residuales. 17 ed. Madrid (España): Ediciones Díaz de Santos, 1992. 1200 p.

5.1.4.2 Análisis de las muestras de aire: para determinar la concentración de fenol en las muestras se empleó el fotómetro NANOCOLOR®, con el método 1-75 que corresponde al método de 4-nitroanilina diazotada (ver Anexo D) y su principio es la reacción del fenol con la 4-nitroanilina diazotada para formar una coloración roja, la mayoría de los derivados fenólicos también se determinan (excepto el 4-nitrofenol), por lo que el color puede variar entre amarillo, marrón y rojo con otros fenoles⁷³.

Figura 8. Método fotométrico de Nanocolor®



Fuente: Método 1-75 de Nanocolor⁷⁴, adaptado por los autores.

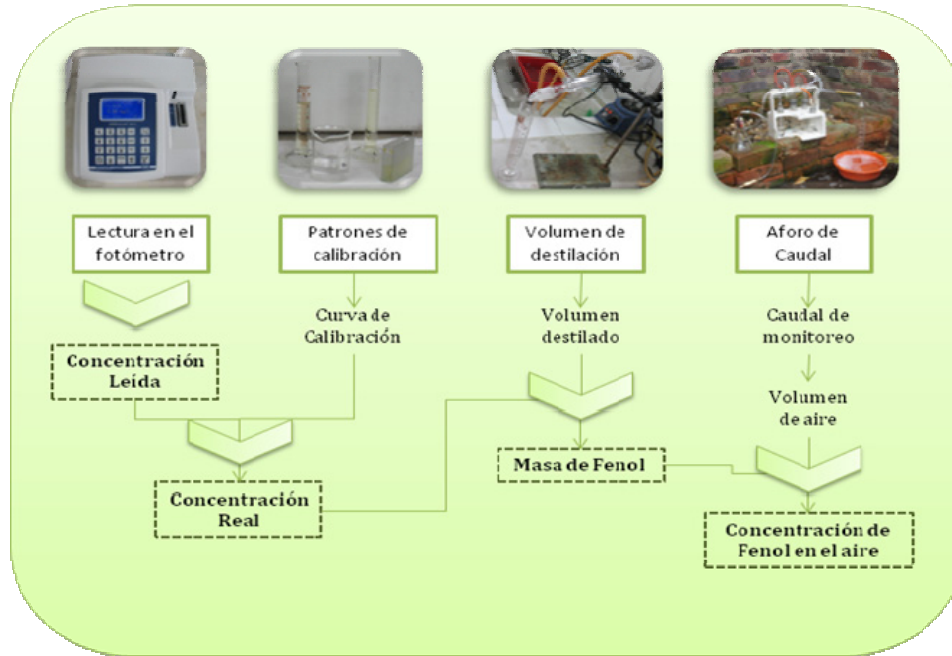
Los cálculos del límite de detección sensibilidad del método se presentan en el Anexo E, y el Protocolo de manejo del equipo se muestra en el Anexo F.

⁷³ Método 1-75. Determinación fotométrica del fenol. Disponible en: <http://www.mn-net.com/StartpageWaterAnalysisTesting/NANOCOLOR/Standardtests/Standardtestphenol/tabid/4746/language/en-US/Default.aspx>, [Citado Febrero 2009]

⁷⁴ Ibid.

5.1.4.3 Cálculo de las concentraciones de fenol en las muestras de aire: La Figura 9 esquematiza las fuentes de obtención de las variables a emplear en las ecuaciones planteadas en este numeral, las ecuaciones 11, 12, 13 y 14 reúnen estas variables y son empleadas para los cálculos de concentración de fenol en las muestras de aire.

Figura 9. Visualización de las variables empleadas en las ecuaciones



Fuente: los autores, 2009

Ecuación 11. Concentración real de las muestras

$$C_{real} [mg/L] = \frac{C_{leída} - b}{m}$$

Donde:

- C_{real} : Concentración real de fenol en la muestra destilada [mg/L]
- $C_{leída}$: Concentración reportada por el equipo [mg/L]
- b : Punto de corte en la gráfica de la curva de calibración
- m : Pendiente de la curva de calibración

Ecuación 12. Masa de fenol [mg]

$$M_{Fenol} = C_{real} \times V_{destil}$$

Donde:

- M_{Fenol} : Cantidad de fenol contenida en la alícuota [mg]
- C_{real} : Concentración real de fenol en la muestra destilada [mg/L]
- V_{destil} : Volumen resultante del proceso de destilación [L]

Ecuación 13. Volumen de Aire [L]

$$V_{aire} = Q \times t$$

Donde:

V_{aire} : Volumen total de aire muestreado [L]
 Q : Caudal de succión de la bomba [L/min]
 t : Tiempo de funcionamiento de la bomba [min]

Ecuación 14. Concentración de fenol en el aire [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

$$C_{fenol} = \frac{M_{fenol}}{V_{aire}}$$

Donde:

C_{Fenol} : Concentración de fenol en el volumen de aire monitoreado [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 M_{Fenol} : Cantidad de fenol contenida en la alícuota [μg]
 V_{aire} : Volumen total de aire muestreado [L]

5.1.4.4 Estimación de las emisiones de fenol: a partir de las concentraciones de fenol determinadas en el numeral 5.1.4.3, se determinaron las emisiones de fenol horarias, éstas son expresadas en carga [mg/min].

Ecuación 15. Emisión de fenol

$$W_{Fenol} = C_{Fenol} \times Q \times 10^{-3}$$

Donde:

W_{Fenol} : Emisión de Fenol [mg/min]
 C_{Fenol} : Concentración de fenol en el volumen de aire monitoreado [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 Q : Caudal de muestreo [L/min]

5.1.5 Diseño de un biofiltro para el manejo de los gases: el biofiltro propiamente dicho está formado por una estructura porosa e inerte que sirve de soporte de los cultivos bacterianos que realizan la depuración. A medida que el gas atraviesa el lecho filtrante, los contaminantes y nutrientes son incorporados por los microorganismos presentes en el mismo que los transforman en compuestos inocuos⁷⁵. El Anexo O presenta de una manera explicativa las ecuaciones empleadas y el diseño del mismo

⁷⁵ CRITES, Ron y THOBANOGLIOUS, George. Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Colombia: Mc Graw Hill, 2000. T1, p333-336.

5.2 METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA MATRIZ AGUA

5.2.1 Selección de la metodología para la toma de muestras de agua: de acuerdo con el tiempo de retención establecido para el RAP (10hr, 7min) y simultaneo al monitoreo de aire, se tomaron muestras puntuales a la entrada y a la salida del reactor conforme a los protocolos establecidos por el IDEAM⁷⁶ para la medición de parámetros en campo y toma de muestras. Como parámetros en campo se midieron durante el monitoreo Temperatura y pH, y dentro de los análisis de laboratorio se consideraron DQO, DBO, Fenoles, sólidos totales, sólidos disueltos y aceites y grasas, los métodos de análisis empleados corresponden a los Métodos Normalizados para el Análisis de aguas potables y residuales y se relacionan en la Tabla 18.

Tabla 18. Métodos de muestreo y análisis

PARÁMETRO	MÉTODO
<i>Caudal (L/min) Entrada</i>	Vertedero ⁷⁷
<i>Caudal (L/min) Salida</i>	Volumétrico ⁷⁸
<i>DQO (mg/L)</i>	SM-5220 D
<i>DBO (mg/L)</i>	SM- 5210 B
<i>Fenoles (mg/L)</i>	SM-5530 D
<i>Sólidos totales (mg/L)</i>	SM- 2540 B
<i>Sólidos disueltos totales (mg/L)</i>	SM- 2540 C
<i>AyG (mg/L)</i>	SM-5520 D

Fuente: los Autores, 2009

5.3 METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL REACTOR:

Con el fin de tener una aproximación a la concentración de fenol presente en el reactor para realizar el balance de masas, se tomaron muestras de lodo y espumas del reactor, las cuales fueron sometidas al mismo procedimiento de extracción y análisis que las muestras de aire (ver numerales 5.1.4.1 y 5.1.4.2) con algunas modificaciones en su pre-tratamiento.

⁷⁶ IDEAM. Manual de métodos y protocolos para el análisis químico de aguas naturales, domésticas y efluentes industriales. Programa de Química Ambiental, Laboratorio de Química Ambiental. Bogotá: IDEAM, 1997.

⁷⁷ IDEAM. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá: IDEAM, 2004. Disponible en: [http:// www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/guia.pdf](http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/guia.pdf). [Citado Abril 2009]

⁷⁸ Ibid

5.3.1 Preparación de las muestras de lodo: con el fin de tener una idea de la concentración de fenol en el lodo del reactor, se tomaron muestras de 100 ml de cada cámara, las cuales se homogenizaron para componer una muestra final de 100 ml; dicha muestra se sometió a doble destilación ya que los gases generados por el lodo provocaban turbidez en la primera destilación.

Figura 10. Destilación de lodos anaerobios



Fuente: los autores, 2009

5.3.1.1 Determinación de la concentración de fenol en el lodo: siguiendo las ecuaciones 12 y 13, se calculó la concentración de fenol en una muestra de 100 ml de lodo.

5.3.2 Preparación de las espumas de poliuretano: dado que el método de determinación de fenoles de Nanocolor es para muestras acuosas, no es conveniente realizar la extracción de las espumas con un solvente orgánico; es por esto que se propuso un lavado de éstas en la solución adsorbedora de Hidróxido de Sodio 0,1 N empleada en el monitoreo. Las espumas fueron tomadas aleatoriamente a la mitad de la profundidad de cada cámara, se almacenaron en frascos de vidrio ámbar y tapa de teflón con solución adsorbedora; para garantizar el contacto de la solución con la espuma en todos los poros, se hizo el lavado de las mismas en el baño ultrasonido por 15 minutos y a temperatura ambiente (ver Figura 11), verificando que la espuma quedara sin material retenido. Esta solución final, se manipuló como las muestras de aire, sometiéndolas al ajuste de pH y destilación.

Figura 11. Pre-tratamiento de las espumas de poliuretano



Fuente: los autores, 2009

5.3.3 Determinación de la concentración de fenol en el medio soporte: luego del procedimiento descrito en el numeral anterior, se analizaron las muestras resultantes de la extracción de las espumas. Se tomaron dos espumas de manera aleatoria a la mitad de la profundidad de cada cámara, y se tuvo en cuenta la dimensión de las mismas para estimar la concentración del fenol con respecto al volumen total contenido en el reactor; para una mejor comprensión de las variables y ecuaciones se presenta la Figura 12 y las ecuaciones que se relacionan a continuación.

Ecuación 16 . Concentración de Fenol en la espuma

$$C_{en\ Espuma} = \frac{m_{fenol}}{V_{espuma}}$$

Donde:

$C_{en\ Espuma}$:	Concentración de Fenol en espuma [mg/L]
m_{fenol} :	Masa de fenol [mg]
V_{espuma} :	Volumen de la espuma analizada [cm ³]

Ecuación 17. Masa de fenol en la cámara

$$m_{cámara} = \frac{C_{en\ Espuma}}{V_{medio\ de\ soporte}}$$

Donde:

$m_{\text{cámara}}$: Masa de fenol estimado en una cámara del reactor [mg]

$C_{\text{en Espuma}}$: Concentración de Fenol en espuma [mg/L]

$V_{\text{medio de soporte}}$: Volumen aproximado del medio de soporte en la cámara [cm³]

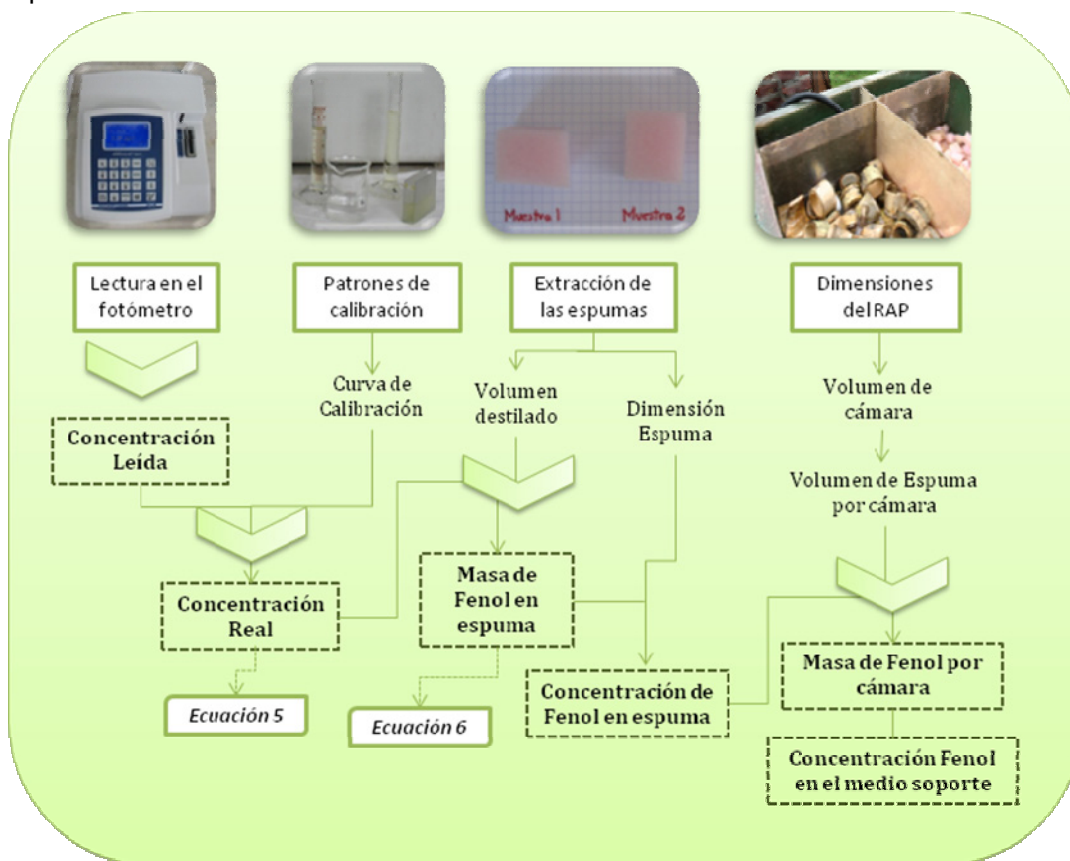
Ecuación 18. Masa de fenol total en el medio de soporte

$$m_{\text{medio de soporte}} = m_{\text{cámara1}} + m_{\text{cámara2}} + m_{\text{cámara3}}$$

$m_{\text{medio de soporte}}$: Masa de fenol total en el medio de soporte [mg]

$m_{\text{cámara}}$: Masa de fenol estimado en una cámara del reactor [mg]

Figura 12. Visualización de las variables empleadas en el método de extracción de espumas



Fuente: los autores, 2009

5.3.4 Diagnóstico del funcionamiento del reactor

5.3.4.1 Determinación de eficiencias de remoción en el reactor: para la estimación de las eficiencias de remoción en términos de la DQO, DBO y Fenol, se propone la Ecuación 19 como la eficiencia en términos absolutos, es decir que puede emplearse para cualquier parámetro.

Ecuación 19. Eficiencia de remoción
$$E = \frac{C_0 - C_F}{C_0}$$

Donde: E: Eficiencia de remoción
C₀: Concentración del parámetro a la entrada del reactor
C_F: Concentración del parámetro a la salida del reactor

En el caso de la eficiencia de remoción del fenol, es necesario incluir la volatilización, por lo que la eficiencia se calcularía en términos de masa tal como se presenta en la Ecuación 20.

Ecuación 20. Eficiencia de remoción de fenol
$$E = \frac{m_e - m_s}{m_e}$$

Donde: E: Eficiencia de remoción
m_e: masa de fenol a la entrada del reactor
m_s: masa del fenol a la salida del reactor

Y por tanto,

Ecuación 21. Masa de Fenol a la salida del reactor
$$m_s = m_{ef} - m_v$$

Donde: m_s: Masa a la salida del reactor
m_{ef}: masa de fenol en el efluente
m_v: masa del fenol volatilizado

5.3.4.2 Determinación de la constante de remoción de DBO: Romero⁷⁹ plantea la Ecuación 22 como modelo de remoción de DBO para un RAP.

Ecuación 22. Modelo de remoción de DBO
$$\theta = \frac{1}{K} \ln \frac{1}{1 - E}$$

Donde: θ: Tiempo de retención hidráulico (d)
k: Constante de remoción de DBO de primer orden (día⁻¹)
E: Eficiencia de remoción de DBO

⁷⁹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. p.266

Cabe resaltar que en la medida en que cambian las características del agua residual sometida a tratamiento y cuando varían las condiciones ambientales, también cambian las constantes de remoción, por lo tanto, la determinación de las constantes puede ser una herramienta útil para diseños preliminares de sistemas RAP para el tratamiento de vertimientos similares en zonas de condiciones climáticas semejantes a las de Bogotá.

5.4 CONTROLES DE CALIDAD

El control de calidad en la metodología empleada durante la toma de las muestras y en el desarrollo de los análisis de las mismas en el laboratorio corresponde a todos los controles, cuidados o medidas que se incluyen en los procedimientos a fin de evitar interferencias o contaminación de las muestras, lo que da un mayor grado de confianza en los resultados obtenidos.

5.4.1 Controles en campo

Lavado del material:

- Para la eliminación de interferencias se limpiaron cuidadosamente los recipientes de las muestras iniciando con un lavado general de toda la vidriería con jabón, agua caliente y el enjuague final se realizaba con la solución adsorbedora. (ver Anexo G. Protocolo de lavado de material)

Verificación del equipo de muestreo (ver Anexo C):

- El equipo de tres gases empleado en el monitoreo, pasó por una verificación inicial, donde se inspecciona que todas las mangueras estén bien conectadas y que tanto éstas como los burbujeadores se encuentren limpios.

Controles durante la toma de las muestras (ver Anexo C):

- Comparando el caudal del método de muestreo (28 L/min) con otros métodos más comunes manejados con el equipo de 3 gases (menores a 10 L/min), el caudal necesario es considerablemente alto por lo que se hace necesaria una verificación del funcionamiento de la bomba con el aforo constante del caudal de aire y que el volumen de la solución adsorbedora en el burbujeador no rebosara durante su funcionamiento para disminuir las pérdidas de solución.
- Dado que en el sistema de muestreo de tres gases el flujo de aire es susceptible a variar, se estableció, dentro de los procedimientos de

muestreo para este proyecto, una verificación horaria del caudal por el método descrito en el protocolo desarrollado.

- Debido a las dificultades para encontrar la bomba que manejara el caudal requerido en este proyecto, se determinó como tiempo de muestreo $35 \text{ min} < t < 60 \text{ min}$, ya que el equipo empleado no tenía la capacidad de funcionamiento continuo para un muestreo de 24 horas.
- Al finalizar cada toma de muestra se verificó la línea de volumen marcada en el burbujeador, ya que las pérdidas por evaporación debían mantenerse inferiores a 5 ml; es decir, se estableció el criterio para descartar la muestra: Volumen de la solución $< 25 \text{ ml}$.

5.4.2 Almacenamiento y transporte de las muestras

- Las muestras se dispusieron en envases de vidrio ámbar con tapa de teflón, debidamente rotulado para la identificación de las mismas.
- El burbujeador debía enjuagarse dos (2) veces con 1 ml de solución absorbadora, con el fin de remover la muestra del mismo y éste era depositado en el envase de la muestra.
- De acuerdo con el procedimiento establecido por NIOSH⁸⁰, las muestras deben acidificarse con ácido sulfúrico 1N hasta un $\text{pH} < 2$. Como resultado de las pruebas y análisis preliminares, se encontró que por medio de acidificación con ácido fosfórico a $\text{pH} < 2$ se controlaban no sólo las interferencias causadas por la presencia de sustancias oxidantes y reductoras y valores de pH alcalinos, sino que también se lograba eliminar la interferencia de SO_2 , debido a la naturaleza de la muestra (biogás).
- Las muestras se transportaron en neveras de icopor manteniendo la temperatura de custodia recomendada por el método (4°C), con el fin de evitar pérdidas de constituyentes volátiles.
- Las muestras conservadas y almacenadas, se analizaron dentro de los 4 días siguientes a la toma de la muestra, lo que se encontraba dentro del rango establecido por el método (análisis dentro de un plazo máximo de 28 días)
- Blancos: se hizo un blanco de ambiente y de transporte para determinar que el entorno no contaminara las muestras ni aportara analitos que alteraran o interfirieran en las concentraciones reportadas (ver Anexo E).

⁸⁰ NIOSH. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Phenol. Appendix I. Sampling Phenol in air, pag 118. Disponible en: <http://www.cdc.gov/NIOSH/76-196.html>

5.4.3 Análisis de laboratorio

Calibración del método:

- Preparación De Los Patrones: Toda solución patrón se preparó con agua destilada y se tuvo presente el porcentaje de pureza del fenol (reactivo 99.5% de pureza) a la hora de hacer los cálculos respectivos para determinar la cantidad de fenol a agregar a cada balón.
- De acuerdo a las recomendaciones del método SM-3330, los patrones preparados fueron analizados máximo dentro de las 2 horas siguientes a su preparación
- Elaboración de la Curva de calibración (ver Anexo E): a través del gráfico de valores de concentración de las soluciones preparadas frente a los valores reportados por el equipo en mg/L, se determinó un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9999$ y la Ecuación 23, con la cual se ajustaron todos los resultados de concentraciones reportadas por el equipo.

Ecuación 23. Curva de calibración

$$Y = 1.0623X + 0.0004$$

Porcentajes de recuperación (ver Anexo E)

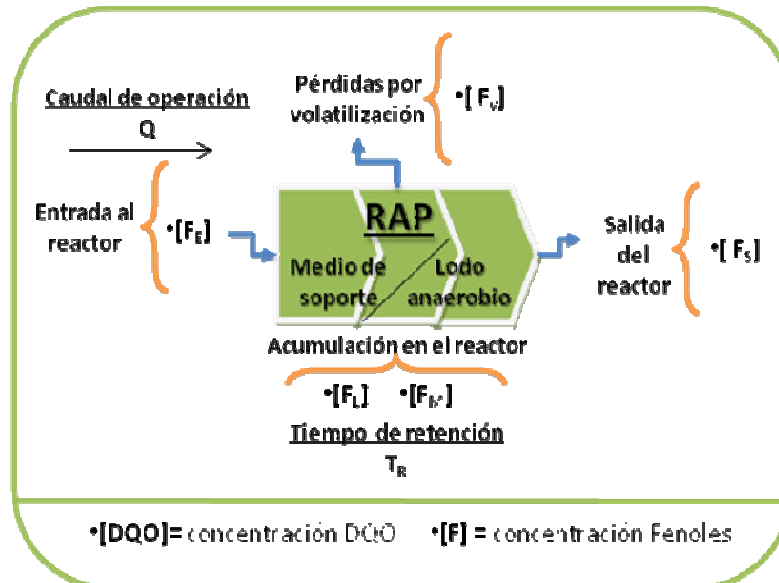
- Se determinó que para el montaje realizado de destilación de las muestras se obtuvo un porcentaje de recuperación del 98,21%.
- Debido a que el método para la extracción del fenol de las espumas se desarrolló empíricamente, se consideró también la importancia de determinar el porcentaje de recuperación del fenol, resultante del lavado de las espumas de poliuretano; para tal fin se aplicaron volúmenes específicos de una solución de fenol de 1000 mg/L a 3 espumas similares a las empleadas en el reactor, que posteriormente se les dio el mismo manejo que las espumas extraídas del reactor para así determinar la masa recuperada de fenol.

5.5 BALANCE GLOBAL DE MASAS PARA EL FENOL

5.5.1 Configuración del sistema: para la realización del balance global, es necesario definir la configuración del sistema, en la cual sea posible ver las variables que hacen parte del mismo y, además de dar cumplimiento a la ley de conservación de las masas en un sistema no conservativo, lo cual permitirá

determinar eficiencias. Como resultado de la aplicación de dicha ley, se presenta en la Figura 13.

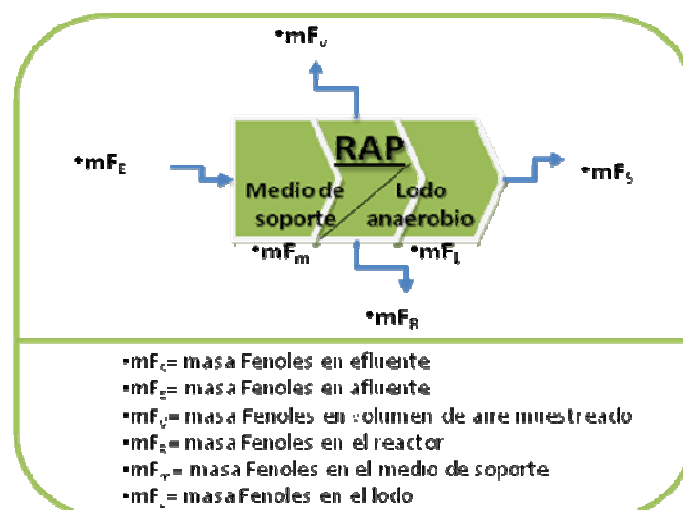
Figura 13. Configuración del sistema para el balance teórico.



Fuente: los autores, 2009

Una vez identificadas las variables, se hace necesario interpretar el sistema en función de las masas que intervienen, de esta forma, se plantea el esquema representado en la Figura 14.

Figura 14 . Esquema del balance de masas teórico.



Fuente: los autores, 2009

Es así como las ecuaciones presentadas a continuación, muestran la forma de calcular las masas presentadas en el esquema:

Ecuación 24. Masa de fenoles en el afluente

$$mF(e) = F(e) \left[\frac{mg}{L} \right] * Q * T_R$$

$$mF(s) = F(s) \left[\frac{mg}{L} \right] * Q * T_R$$

Ecuación 25. Masa de fenoles en el efluente

Ecuación 26 . Masa Fenol volatilizado

$$mF(v) = \sum_{h:00:00}^{h:10:07} mF_v$$

Donde: mF_v : masa de fenol volatilizado en cada hora (mg) a partir de las cargas horarias de volatilización (Ver anexo L)

Ecuación 27. Masa Fenol en medio soporte

$$mF(m) = F(espumas) \left[\frac{mg}{L} \right] * \forall_{espuma \text{ en el reactor}}$$

(Ver Anexo J)

Ecuación 28 . Masa Fenoles en los lodos

$$mF(l) = F(l) \left[\frac{mg}{L_{lodos}} \right] * \forall(Lodos)[L]$$

Donde:

$$\forall(Lodos) = Lodos \text{ almacenados}[L] + Lodos \text{ generados}$$

$$Lodos \text{ generados } [mg] = Producción \text{ de lodo } \left[\frac{mg}{L} \right] * Q [L/min] * T_R [min]$$

$$Lodos \text{ generados } [L] = Lodos \text{ generados } [mg] \times \frac{1}{(\rho_{lodo}) \left[\frac{mg}{L} \right]}$$

(Ver Anexo J)

Ecuación 29. Masa Fenoles en el reactor

$$mF(R) = mF(m) + mF(l)$$

A partir de la Ecuación 8, Ecuación 9 y las ecuaciones anteriores (24 a 29), es posible establecer la ecuación de balance del fenol en el sistema, donde:

Ecuación 30. Ecuación general balance

$$mF(e) = mF(s) + mF(v) - mF(acum) + Z$$

Donde: $mF(acum) = mF(R) + (mF(e) - mF(s))$ (Ver Tabla 19)

A partir del balance propuesto, es posible estimar el balance global de masas para el fenol en el reactor, sin embargo, es necesario partir de unos supuestos (ver Tabla 19) debido a que el sistema en estudio es un sistema real operado bajo condiciones variables en cuanto a cargas contaminantes e incluso caudales y no una unidad piloto sobre la cual se puedan controlar todas las variables para obtener resultados más precisos (como tasas de degradación, formación o de volatilización).

Tabla 19. Supuestos base para la elaboración del balance global de masas

PARÁMETRO	VALOR	OBSERVACIONES
Base de cálculo	10h7min = 10,1166h	Se asume el tiempo de retención del reactor como la base de cálculo para el balance ya que los análisis del afluente y efluente se hicieron basados en el mismo, sin embargo, para facilidad de los cálculos en el balance, este tiempo se expresa en días
Fenol presente en el reactor	- Masa de fenol en el lodo - Masa de fenol en el medio de soporte	En cuanto a las mediciones realizadas para la concentración de fenol en el medio de soporte y en el lodo, se emplea en todos los balances el mismo valor como valor base, adicionándoles la diferencia de fenol entre la entrada y la salida (ver masa de fenol acumulada) y la generación de lodo respectivamente, debido a que no se cuentan con análisis diarios de éstos debido a las condiciones de sellamiento del reactor.
Fenol Volatilizado	Carga de fenol emitida al aire durante las 10,1166 horas del tiempo de retención	Se asume que la volatilización presente en el balance es la suma de las cargas emitidas durante el tiempo de retención del reactor, es decir, desde la hora 0 (toma de muestra del afluente) hasta la hora 10 y 7 minutos (toma de la muestra del efluente); adicionalmente, es posible que esta emisión corresponda no solo al fenol volatilizado de la carga entrante al reactor, sino al que se encuentra

PARÁMETRO	VALOR	OBSERVACIONES
		acumulado en el mismo sistema, ya que como lo señalan los estudios de PUIG ⁸¹ , los compuestos fenólicos son muy persistentes bajo condiciones anaerobias tradicionales y pueden requerir hasta 100 días de incubación para su mineralización.
Masa de Fenol acumulada	$mF(acum) = mF(R)$	Con base en los antecedentes mencionados en esta tabla, se asume que el periodo de retención no es suficiente como tiempo de reacción para la mineralización del fenol, por tanto, el sistema como tal retiene el fenol en su medio de soporte y en el lodo anaerobio, de tal manera que tenga un mayor tiempo de permanencia dentro del reactor para su transformación. PUIG ⁸² , señala que es posible degradar compuestos aromáticos, especialmente bajo condiciones metanogénicas en periodos cortos de tiempo (días) y a 37°C, lo que permite suponer que en las condiciones climáticas de Bogotá, el tiempo de degradación sería mayor

Fuente: los autores, 2009

En conclusión, el balance global de masas planteado permite establecer teóricamente la variable de reacción del sistema, que como se mencionó anteriormente, puede ser positiva o negativa, dependiendo del tipo de reacción que predomine dentro del reactor, esto permitirá (a pesar de la falta de información de la dinámica del fenol en el reactor) comprender la tendencia del sistema a la producción o consumo con respecto a un balance global ya que no solo se analiza a nivel del afluente, efluente y acumulación, sino que también se considera la volatilización del compuesto como una variable en el balance.

5.6 MODELO DE EMISIONES WATER9

5.6.1 Pruebas pre-experimentales con el programa WATER9: Para la aplicación del modelo WATER9 en el presente proyecto se realizaron pruebas preliminares con el fin de lograr un mayor y mejor manejo del mismo, así como identificar todos los factores que intervienen en la corrida del modelo.

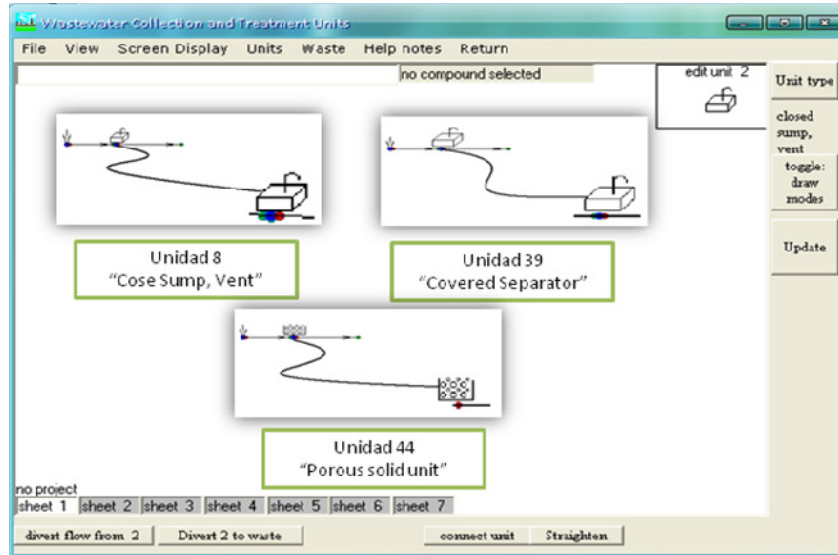
Cada prueba consistió en hacer ensayos de diferentes corridas del modelo en donde se identificó, como primera medida, el componente o unidad del sistema que cumpliera las funciones del RAP ya que el modelo no cuenta con un reactor anaerobio de flujo a pistón como unidad predeterminada para hacer la simulación. Dentro de las opciones consideradas se encontraron 3 posibles

⁸¹ Ver antecedentes del documento.

⁸² Ver antecedentes del documento.

unidades, la *unidad 8 (close sump,vent)*, *unidad 39 (covered separator)* y la *unidad 44 (porous solid unit)* (ver Figura 15). Luego de revisarlas, se consideró conveniente la unidad *número 8* ya que ésta posee más características que se aproximan en cuanto al funcionamiento y estructura real del RAP, tales como: poseer falso fondo, no usar recirculación, el agua residual fluye por un sistema cerrado y tiene una tubería para escape de gas.

Figura 15. Unidades evaluadas para la ejecución del modelo WATER9



Fuente: los autores, 2009

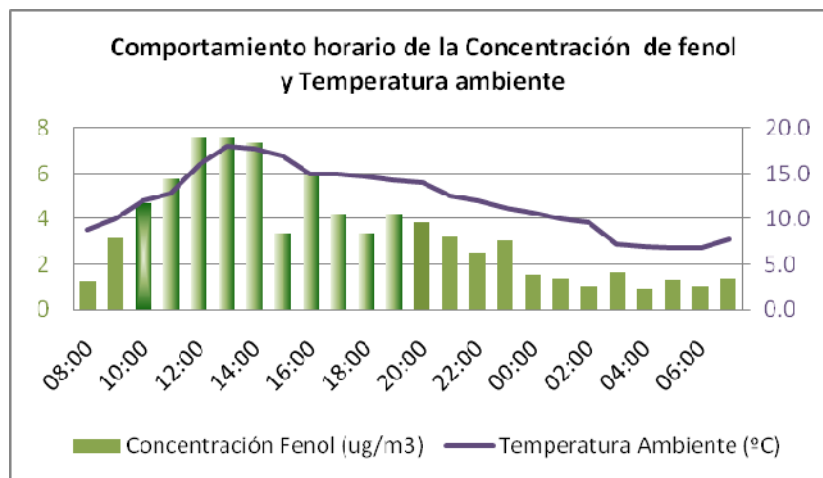
Una vez seleccionada la unidad, se realizaron las pruebas pre-experimentales, en las cuales se variaron los datos de entrada que requiere el modelo para su aplicación, dichos datos corresponden a las siguientes variables: caudal, sólidos totales, sólidos disueltos, temperaturas y fenol. Los datos empleados para estos ensayos preliminares, provienen de las caracterizaciones realizadas a lo largo de la ejecución del proyecto RAP.

6. RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DE LA MATRIZ AIRE

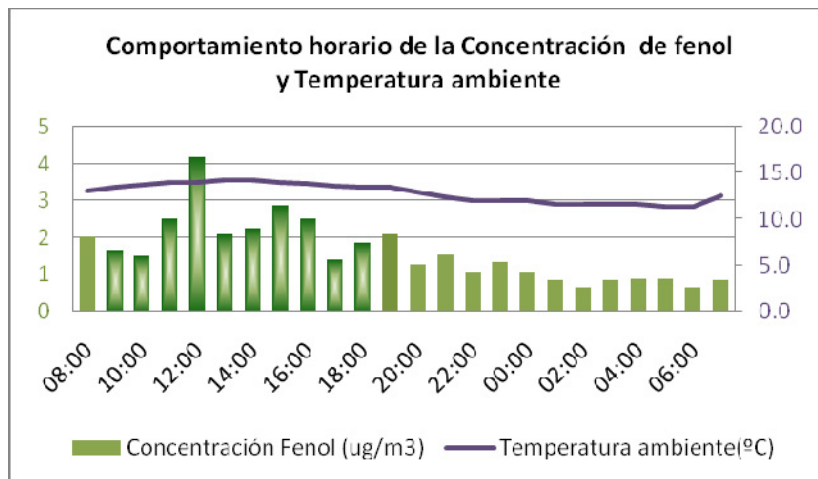
6.1.1 Concentraciones de fenol en las muestras de aire: a partir de las ecuaciones 11, 12, 13 y 14, se determinaron las concentraciones de fenol durante 15 días, en 9 de los cuales se hizo un monitoreo de 24 horas y los días restantes, un monitoreo de 14 horas; los resultados del análisis de aire y sus respectivas gráficas se consolidan en el Anexo H; a continuación se presentan las gráficas 1 a 3 como ejemplos de algunos de los días de monitoreo, las barras en color verde degradado representan el periodo seleccionado para las muestras de agua según el tiempo de retención hidráulico, así mismo en ellas se observa el comportamiento de las emisiones de fenol a lo largo del día y sobre estas mismas se señala el comportamiento de la temperatura, en lo que puede identificarse una relación directamente proporcional ya que con el aumento de la temperatura, se evidencia un aumento de las emisiones y viceversa; las barras de color verde degradado, indican el período en el que se tomaron las muestras de agua de entrada y salida del reactor para correlacionar posteriormente la información en el balance de masas.

Gráfica 1. Resultados del monitoreo de aire. Lunes 02 de Marzo de 2009



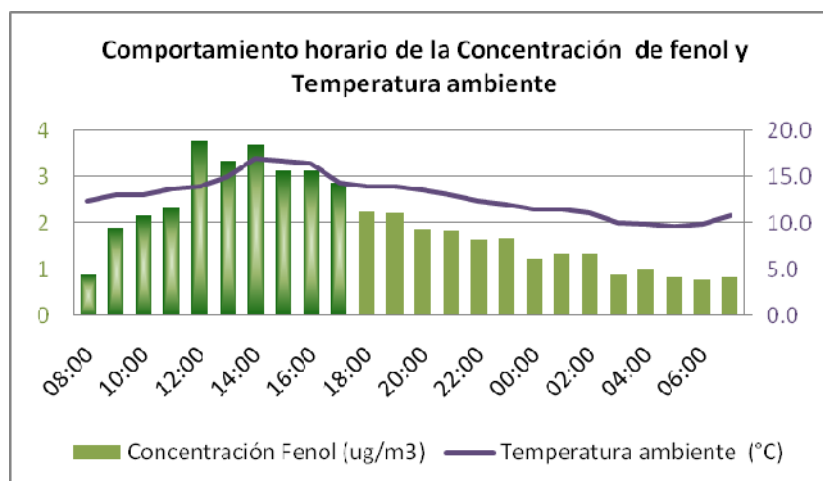
Fuente: los autores, 2009

Gráfica 2. Resultados del monitoreo de aire. Martes 10 de Marzo de 2009



Fuente: los autores, 2009

Gráfica 3. Resultados del monitoreo de aire. Lunes 16 de Marzo de 2009



Fuente: los autores, 2009

6.2 RESULTADOS DE LA MATRIZ AGUA

6.2.1 Caracterización del reactor: se realizó una caracterización preliminar con el fin de determinar el funcionamiento de la planta, con base en el tiempo de retención y con la ayuda de los estudiantes de recurso agua asignados al seguimiento del proyecto, se programó el muestreo y se realizaron los respectivos análisis de laboratorio. Los resultados se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados de la caracterización preliminar

Fecha: Febrero 26 de 2009			
	ENTRADA	SALIDA	MÉTODO
Caudal (L/min)	0.23	0.18	IDEAM ⁸³
DQO (mg/L)	228	94	SM-5220 D
DBO (mg/L)	193	65	SM- 5210 B
Fenoles (mg/L)	2	1.3	SM-5530 D
Sólidos totales (mg/L)	214.08	90.31	SM- 2540 B
Sólidos disueltos totales (mg/L)	198.34	57.14	SM- 2540 C
AyG (mg/L)	11.37		SM-5520 D
Toma de Muestras	09:00 a.m.	07:07 p.m.	

Fuente: los autores, 2009

Simultáneo al monitoreo de aire, se tomaron muestras de agua de entrada y salida del reactor, con el fin de establecer un balance de masas en el reactor, el Anexo I reúne todos los datos de estas caracterizaciones así como el periodo de tiempo en el que se tomaron las muestras de agua (teniendo en cuenta el tiempo de retención del reactor).

6.3 CONCENTRACIÓN DE FENOL EN EL REACTOR

Con el fin de proponer un balance de masas, es necesario estimar un valor aproximado al fenol presente dentro del reactor, es decir, establecer una concentración aproximada del fenol presente en el medio soporte y en el lodo anaerobio.

6.3.1 Concentración de fenol en el medio soporte: a partir de las ecuaciones 16, 17 y 18, se determinó la concentración aproximada de fenol en el medio soporte, dando como resultado $1,167 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ y una masa total de 314,9769 mg de fenol. Los cálculos se consolidan en el Anexo J.

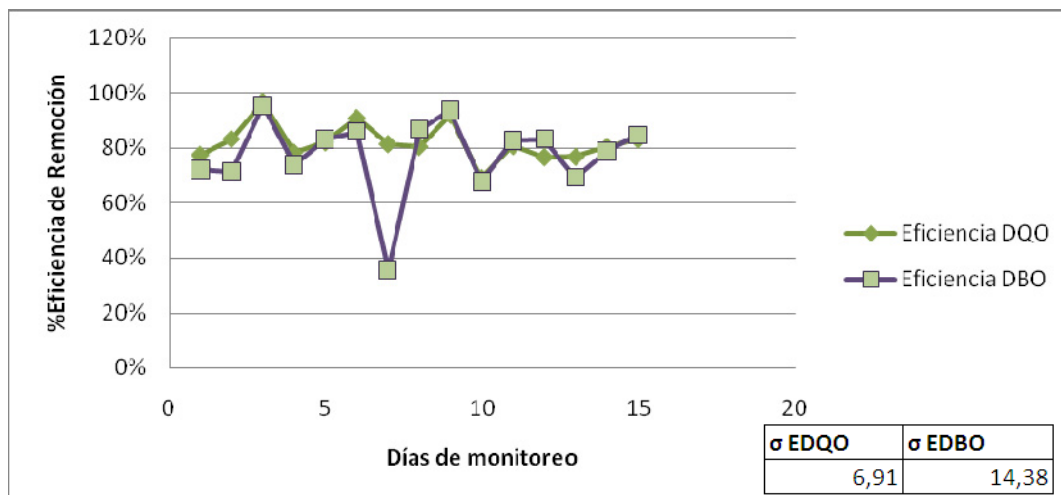
6.3.2 Concentración de fenol en el lodo: el Anexo J, contiene los cálculos a partir de los cuales se determinó que la concentración de fenol en el lodo es aproximadamente de $9.83 \text{ mg}/\text{L}_{\text{Lodo}}$.

⁸³ IDEAM. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá: IDEAM, 2004. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/guia.pdf>. [Citado Abril 2009]

6.4 DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR

6.4.1 Eficiencias de remoción: a partir de la Ecuación 19 se determinaron las eficiencias de remoción del Fenol, DBO y DQO para cada uno de los días de monitoreo, los cálculos se consolidan en el Anexo K, los resultados se representan en la Gráfica 4 y Gráfica 5, en éstas se observa una variación considerable en las eficiencias por los picos presentes en las gráficas, es por esto que se consideró conveniente estimar un promedio geométrico y no uno aritmético para la determinación de la eficiencia promedio de cada uno de los parámetros, obteniendo como resultado un porcentaje de remoción de DQO del 82%, 76% para la DBO y 69% en el fenol.

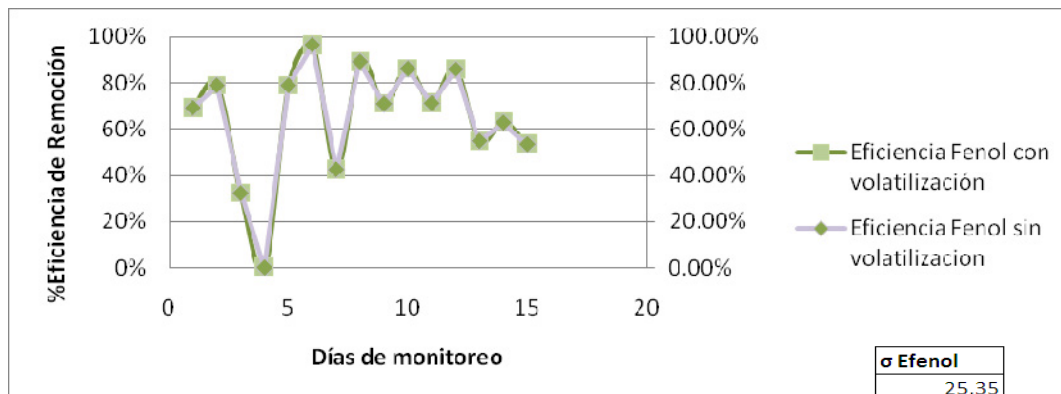
Gráfica 4. Eficiencia de Remoción de DBO y DQO



Fuente: los autores, 2009

Tal como se explicó en la metodología, la eficiencia de remoción del fenol se estimó considerando solo el afluente y efluente y se comparó con la eficiencia en la que se incluye la volatilización como una salida (ver Ecuación 19 y Ecuación 20), la Gráfica 5 compara las eficiencias mencionadas y permite observar que la volatilización no es un factor significativo a la hora de estimar la eficiencia del reactor.

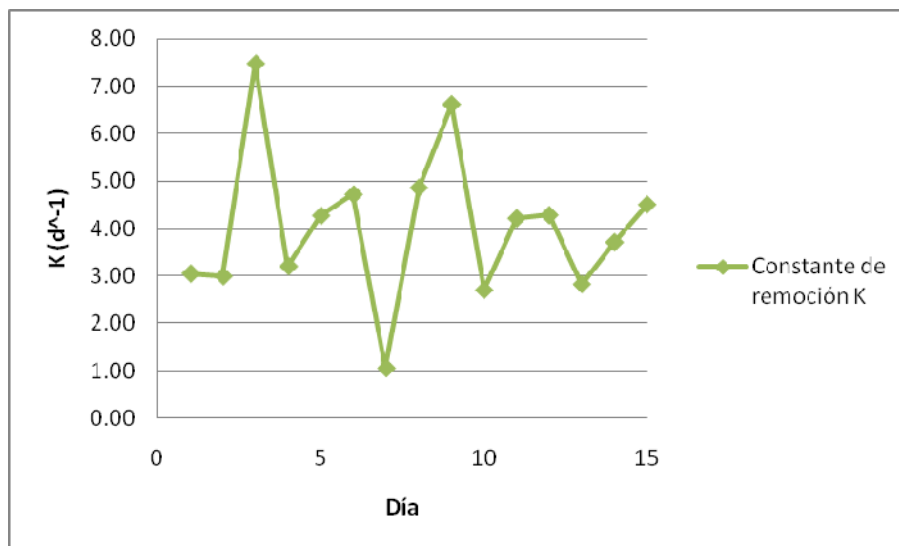
Gráfica 5. Eficiencia de remoción de fenol



Fuente: los autores, 2009

6.4.2 Constante de remoción de DBO: a partir de las eficiencias de remoción de DBO determinadas en el numeral anterior, se determinó la constante de remoción de DBO para cada uno de los días, dando como resultado una constante de remoción promedio de $K = 3.70 \text{ d}^{-1}$; los cálculos del modelo se resumen en el Anexo K. En la Gráfica 6 se observa una variación considerable en las la constante por los picos presentes en la gráfica, es por esto que se consideró conveniente estimar un promedio geométrico.

Gráfica 6. Constante de Remoción K



Fuente: los autores, 2009

6.4.3 Producción de lodos en el reactor:

Se estimó la producción de lodos diaria en el reactor con base en el balance teórico de DQO, los resultados se presentan en el Anexo L, ya que es necesario estimar este valor dentro del balance de masas.

6.5 BALANCE DE MASAS

A manera de ejemplo, a continuación se presenta el procedimiento para el balance de masas del primer día de monitoreo, los resultados de los demás días se resumen en la Tabla 21, las memorias de cálculo se consolidan en el Anexo L.

Fecha: Marzo 2/03

$$1) \quad mF(e) = mF(s) + mF(v) - mF(acum) + Z$$

a. Ecuación 24

$$mF(e) = 2.6 \left[\frac{mg}{L} \right] * 0.25 \left[\frac{L}{min} \right] * 607 min = 394.55 mg$$

b. Ecuación 25

$$mF(s) = 0.8 \left[\frac{mg}{L} \right] * 0.25 \left[\frac{L}{min} \right] * 607 min = 121.4 mg$$

c. Ecuación 26

$$mF(v) = \sum_{h:00:00}^{h:10:07} mF_v$$

Tabla 21. Sumatoria de cargas de emisión de fenol

Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)
10:00	0,1315	7,892E-03
11:00	0,1611	9,663E-03
12:00	0,2115	1,269E-02
13:00	0,2115	1,269E-02
14:00	0,2057	1,234E-02
15:00	0,0940	5,641E-03
16:00	0,1678	1,007E-02
17:00	0,1174	7,046E-03
18:00	0,0939	5,637E-03
19:00	0,1174	7,046E-03
Σ=		9,072E-02

Fuente: el presente estudio

$$mF(v) = 9,072 \times 10^{-2} [mg]$$

d. Ecuación 27

$$mF(m) = 314,9769 [mg]$$

e. Ecuación 10

$$Producción\ de\ Lodo = 0,10 * 676 [mg/L] = 67,6 [mg/L]$$

$$Lodos\ generados\ [mg] = 67,6 [mg/L] * 0,25 [L/min] * 607 [min] = 10.258,3mg$$

$$Lodos\ generados\ [L] = 10.258,3mg \times \frac{1}{9.294mg/L} = 1,104L$$

$$\forall(Lodos) = Lodos\ almacenados[L] + Lodos\ generados$$

$$\forall(Lodos) = 177,66[L] + 1,104[L] = 187,76[L]$$

Ecuación 28

$$mF(l) = 9,8269 \left[\frac{mg}{L_{lodos}} \right] * 187,76 [L_{lodos}] = 1756,69 mg$$

f. Ecuación 29

$$mF(R) = 314,9769 mg + 1756,69mg = 2.071,673mg$$

g. Balance Global

Ecuación 30.

$$mF(acum) = 2.071,67mg + (394.55mg - 121.4)$$

$$mF(acum) = 2344,82$$

Ecuación 8

$$Z = mF(e) - mF(s) - mF(v) + mF(acum)$$

$$Z = 394.55 - 121.4 - 9.072 * 10^{-2} + 2344,82 = 2.617,88mg$$

6.6 EJECUCIÓN DEL MODELO WATER9

Con base en los resultados de los diferentes muestreos de agua consolidados en el Anexo I, se incorporó la información en el programa WATER9 y se ejecutaron las corridas para los 15 días de pruebas; las respuestas del modelo se presentan en el Anexo M y se resumen en la Tabla 22. Para una mejor comprensión del manejo del programa WATER9, se elaboró un flujograma para indicar los pasos hechos en la incorporación de los datos para la ejecución del modelo (ver Anexo N)

Tabla 22. Resultados de emisiones estimadas por el modelo WATER9

Día	Emisión (mg/año)	Emisión (ug/día)
MARZO 2 DE 2009	5,97E-07	1,63562E-06
MARZO 04 DE 2009	4,71E-07	1,29041E-06
MARZO 06 DE 2009	1,22E-06	3,34247E-06
MARZO 10 DE 2009	5,50E-07	1,50685E-06
MARZO 12 DE 2009	6,66E-07	1,82466E-06
MARZO 14 DE 2009	1,54E-06	4,21918E-06
MARZO 16 DE 2009	8,47E-07	2,32055E-06
MARZO 18 DE 2009	5,97E-07	1,63562E-06
MARZO 20 DE 2009	7,40E-07	2,0274E-06
MARZO 22 DE 2009	1,26E-06	3,45205E-06
MARZO 24 DE 2009	8,57E-07	2,34795E-06
MARZO 26 DE 2009	8,32E-07	2,27945E-06
MARZO 28 DE 2009	2,13E-06	5,83562E-06
MARZO 30 DE 2009	9,08E-07	2,48767E-06
ABRIL 1 DE 2009	1,07E-06	2,93151E-06

Fuente: los autores, 2009

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las gráficas y pruebas estadísticas se realizaron con el programa SPSS v.15.0, debido a que éste ofrece múltiples herramientas para el análisis de la información obtenida en el estudio.

7.1 COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES DE FENOL

7.1.1 Estimación de datos faltantes: en el numeral 6.1.1 se estimaron las concentraciones de fenol emitidas al aire por el sistema de tratamiento y las cargas horarias de las mismas. Para la realización de los análisis estadísticos se hace necesario como primera medida la estimación de las cargas faltantes de los días de monitoreo donde se obtuvieron 15 de las 24 horas normalmente monitoreadas, para ello el programa empleado (SPSS) realiza la correlación entre los datos registrados para cada hora correspondiente a los días de monitoreo completo de tal forma que, de acuerdo con las emisiones registradas en determinada hora del día, es posible establecer la tendencia de las mismas y de esta forma, se obtiene el dato faltante para las horas que requieren ser completadas.

Tabla 23 . Estimación de datos faltantes en las Cargas horarias de fenol

CARGAS DE FENOL HORARIAS (ug/h)						
	14-Mar	18-Mar	20-Mar	22-Mar	26-Mar	28-Mar
08:00	1.88	0.56	2.81	2.34	2.82	1.88
09:00	5.64	0.63	4.65	2.81	3.38	4.22
10:00	5.19	0.70	7.52	3.76	3.10	6.27
11:00	9.28	0.77	14.1	5.92	4.57	7.05
12:00	14.1	0.84	15.1	6.20	6.04	6.27
13:00	14.1	0.91	14.1	6.20	5.28	7.05
14:00	13.3	0.98	12.7	7.05	6.34	8.77
15:00	11.6	1.05	12.4	7.05	6.20	8.81
16:00	10.6	1.12	10.6	7.05	7.05	8.46
17:00	10.9	1.19	12.3	5.64	5.26	8.81
18:00	8.29	1.26	11.3	5.64	5.31	7.05
19:00	6.58	1.33	8.46	4.70	4.22	5.64
20:00	5.76	1.40	8.11	4.22	2.82	5.64

CARGAS DE FENOL HORARIAS (ug/h)						
	14-Mar	18-Mar	20-Mar	22-Mar	26-Mar	28-Mar
21:00	5.64	1.47	7.05	3.38	2.81	4.22
22:00	5.01	1.54	6.69	3.38	2.44	3.76
23:00	3.90	3.70	3.60	3.50	3.29	3.19
00:00	3.33	3.25	3.20	3.16	3.07	3.03
01:00	2.41	2.42	2.43	2.43	2.44	2.44
02:00	2.07	2.14	2.17	2.21	2.27	2.30
03:00	1.91	1.88	1.87	1.85	1.83	1.81
04:00	1.78	1.79	1.79	1.79	1.80	1.80
05:00	1.73	1.69	1.66	1.64	1.59	1.57
06:00	1.68	1.67	1.66	1.65	1.63	1.63
07:00	1.94	1.93	1.92	1.92	1.91	1.90
CARGA DE FENOL (ug/d)	148.62	36.22	168.19	95.49	87.47	113.57

Fuente: el presente estudio

En la Tabla 23, las casillas identificadas con color amarillo, corresponden a las cargas horarias estimadas con el programa de estadística.

Teniendo un registro completo de las cargas horarias, es posible determinar la carga diaria de emisiones de fenol mediante la sumatoria de las 24 horas de emisión correspondientes a cada día de estudio (ver Anexo P).

7.1.2 Determinación del tipo de distribución en las emisiones de fenol: la aplicación de la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*, permite determinar si las variables en cuestión *se distribuyen de un modo normal*, para lo cual, se observa el valor calculado de la significancia bilateral de cada día, donde un valor mayor de 0.05, indica que se trata de una distribución normal.

La significancia encontrada en la Tabla 24 determina que las cargas emitidas diariamente tienen un comportamiento con distribución normal.

Tabla 24. Prueba de *Kolmogorov-Smirnov* sobre las cargas horarias de fenol volatilizado

Día	N	Parámetros Normales(a,b)		Diferencias más extremas			Z de K-S	Significancia (bilateral)
		Mean	Std. D	Absolute	Positive	Negative		
Marzo2	24	5.6725	3.6464	0.1588	0.1588	-0.1263	0.7778	0.5806
Marzo4	24	7.8758	5.7066	0.1673	0.1673	-0.1463	0.8197	0.5124
Marzo6	24	6.9508	3.9518	0.1396	0.1396	-0.0997	0.6839	0.7379
Marzo10	24	2.7183	1.4232	0.1307	0.1248	-0.1307	0.6404	0.8068
Marzo12	24	3.6092	2.3959	0.2182	0.2182	-0.1634	1.0689	0.2033
Marzo14	24	6.1925	4.2895	0.1652	0.1652	-0.1464	0.8091	0.5294
Marzo16	24	3.2896	1.5977	0.1174	0.1174	-0.1077	0.5750	0.8956
Marzo18	24	1.5092	0.7814	0.1284	0.1284	-0.1122	0.6292	0.8234
Marzo20	24	7.0079	4.7592	0.1797	0.1797	-0.1306	0.8803	0.4205
Marzo22	24	3.9788	1.9080	0.1414	0.1407	-0.1414	0.6926	0.7236
Marzo24	24	5.6075	3.0335	0.1033	0.0856	-0.1033	0.5062	0.9599
Marzo26	24	3.6446	1.6944	0.1870	0.1870	-0.1215	0.9163	0.3706
Marzo28	24	4.7321	2.6109	0.1433	0.1433	-0.1129	0.7022	0.7076
Marzo30	24	4.9188	3.1777	0.1442	0.1442	-0.1410	0.7065	0.7003
Abril1	24	5.0608	2.9855	0.2018	0.2018	-0.1433	0.9885	0.2825

Fuente: el presente estudio

7.1.3 Posibles efectos de las emisiones a la salud humana: Los resultados de las emisiones horarias se resumen en el Anexo H, comparando los valores de concentración en el aire de fenol con los límites permisibles establecidos en la Tabla 16, puede concluirse que no existe un riesgo por las emisiones de fenol generadas por el reactor a nivel de salud ocupacional, ya que ni siquiera la suma de todas las cargas horarias se acercan a los límites de exposición mencionados, aspecto evidente por las unidades de las emisiones y de los límites de exposición, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y mg/m^3 respectivamente.

7.2 CORRELACIÓN DE LAS VARIABLES

Para el análisis y comparación de las variables, se toman como base las 10 horas de muestreo directo de los 15 días de monitoreo para las emisiones de fenol y los valores de las concentraciones de entrada detectadas durante dicho periodo que corresponde igualmente al tiempo de retención del sistema de tratamiento ($T_r = 10\text{h}, 7\text{min}$).

Estos valores, concentraciones de DQO (DQOe), DBO (DBOe) y Fenoles (FENE) en el afluente, así como la temperatura ambiente ($T^\circ\text{C}$), y el Fenol

volatilizado (FENv) se analizan bajo la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* para determinar la normalidad de los datos.

Tabla 25 . Prueba de *Kolmogorov-Smirnov* sobre las variables del sistema

VARIABLE	N	Parámetros Normales(a,b)		Diferencias más extremas			Z de K-S	Significancia (bilateral)
		Mean	Std. D	Absolute	Positive	Negative		
DQOe	15	707.2	712.8	0.3804	0.3804	-0.2454	1.4734	0.0260
DBOe	15	297.8	240.8	0.2735	0.2735	-0.2033	1.0593	0.2117
FENe	15	4.0007	1.8187	0.2085	0.2085	-0.1240	0.8073	0.5322
T°C	150	15.9	2.3	0.1004	0.1004	-0.0784	1.2298	0.0971
FENv	150	4.5927	2.1652	0.0992	0.0992	-0.0437	1.2148	0.1045

Fuente: el presente estudio

La Tabla 25 señala que existe un comportamiento normal para las variables DBO (DBOe) y Fenoles (FENe) en el afluente, así como la temperatura ambiente (T°C), y el Fenol volatilizado (FENv), de allí que es posible calcular el coeficiente de correlación de *Pearson*, el cual es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas (con distribución normal).

A diferencia de las anteriores, la variable de concentración de DQO (DQOe) muestra un valor de significancia en la prueba menor a 0.05, lo que indica que para estos valores no hay una distribución normal, razón por la cual, se analizará este parámetro bajo el coeficiente de correlación de *Spearman*, ya que éste es un excelente método para el análisis de valores que tienen una distribución diferente a la normal⁸⁴.

Para ambas correlaciones se establece que los valores a obtener de coeficientes, se encuentran dentro del intervalo cerrado [-1,1], de tal forma que cuando los valores son cercanos a 1 en términos absolutos la dependencia entre ambas variables es estrecha, los valores próximos a 0 indican la ausencia de la relación lineal entre ambas variables.

Es importante aclarar que los coeficientes de correlación *no presupon*en dependencia de una variable respecto a la otra; además, la existencia de correlación lineal entre 2 variables no implica necesariamente una relación causa-efecto entre ellas, sino que explica su covariación.⁸⁵

⁸⁴ SALINAS, M. Modelos de Regresión y Correlación IV. Correlación de Spearman. Fundación Científica y Tecnológica ACHS Disponible en: www.cienciaytrabajo.cl/pdfs/25/pagina%20143.pdf, p. 145 [Citado Julio 2009]

⁸⁵ Disponible en: <http://estadistico.com/dic.html?p=4584>. [Citado Julio 2009]

Por otro lado, el diagrama de dispersión de los puntos constituye un método sencillo para detectar situaciones de correlación entre variables, de allí que son un complemento a la aplicación del coeficiente de correlación de *Pearson* y *Spearman*, mediante la interpretación visual del mismo.

Tabla 26 . Coeficiente de correlación de *Pearson*

	FENV	DBOe	FENe	T°C
FENV	1	0.35	0.00	0.64

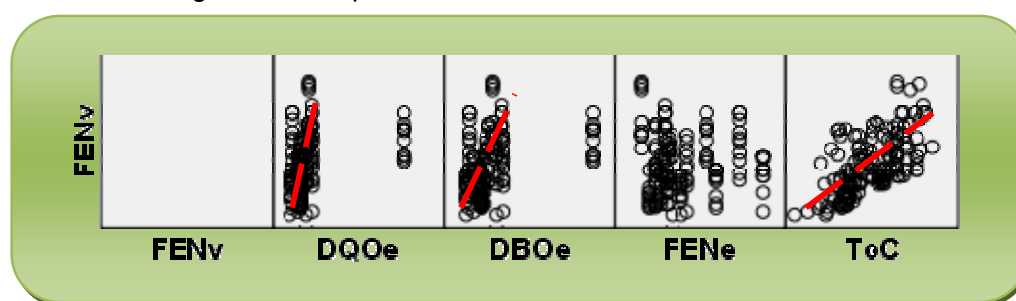
Fuente: el presente estudio

Tabla 27 . Coeficiente de correlación de *Spearman*

	FENV	DQOe
FENV	1	0.46

Fuente: el presente estudio

Gráfica 7 . Diagrama de dispersión de variables. Correlación de datos



Fuente: el presente estudio

La correlación más significativa para el fenol volatilizado (FENV) se identificó con respecto a la temperatura ambiental (T°C), con un coeficiente de correlación de *Pearson* de 0.64 (ver Tabla 26), ésta puede considerarse una correlación en el rango de media a fuerte, es decir, son variables que fluctúan con un comportamiento positivo y directamente proporcional de una forma más significativa que las otras, situación que puede observarse en el diagrama de dispersión de variables, donde se evidencia la menor dispersión de los datos y la clara tendencia lineal de los mismos.

En el caso del coeficiente de *Spearman* para la variable DQOe (0,46) (ver Tabla 27) y el coeficiente de *Pearson* con la variable DBOe (0,35) deben considerarse como una correlación con comportamiento igualmente positivo y directamente proporcional pero menos fuerte ya que, en la escala considerada del rango [-1,1], estos valores se encuentran dentro de las correlaciones discutidas como débiles, ya que se están entre el rango (-0.5,0.5), de baja significancia, es decir, las variables fluctúan linealmente, pero bajo una correlación muy débil.

En el caso de la correlación de las concentraciones de fenol de entrada (FENe) se encuentra una relación extremadamente débil con respecto a las concentraciones del fenol volatilizado (FENv), relación que incluso podría considerarse nula, ya que son valores menores que 0,1.

7.3 COMPARACIÓN RESULTADOS DEL MODELO VS EMISIONES DE FENOL ESTIMADAS EN CAMPO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO WATER9

Para realizar una calibración del modelo WATER9, es necesario establecer si existe una correlación entre los datos arrojados por el modelo y las emisiones diarias determinadas en el presente estudio (ver Tabla 28); a partir de esta información, puede establecerse si el modelo puede emplearse en condiciones diferentes de su país de origen, o si es necesaria una modificación interna del modelo para lograr su aplicabilidad en otras zonas.

Tabla 28. Comparación de datos de emisión medidos en campo y arrojados por el modelo

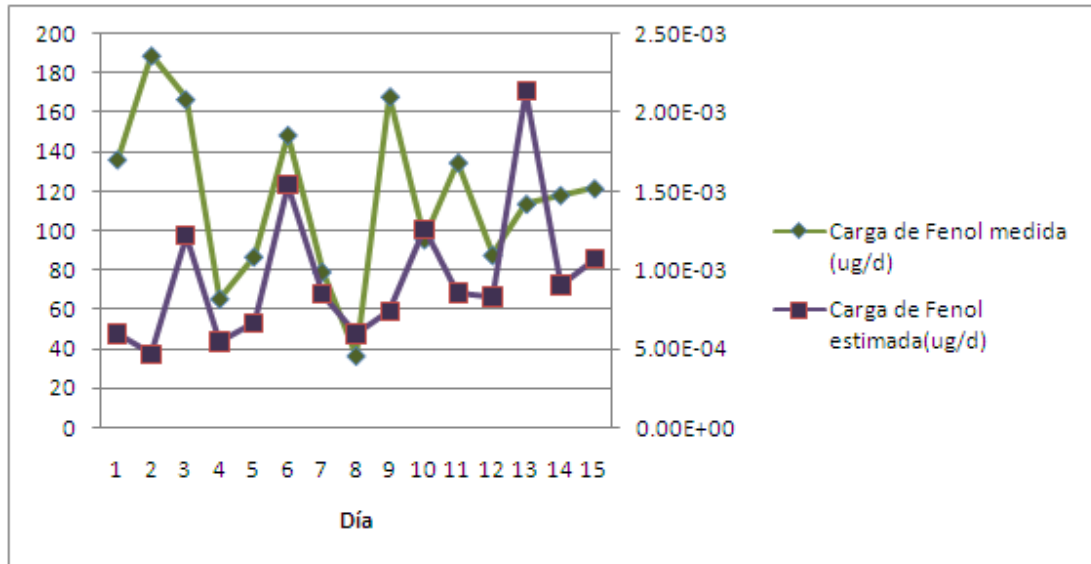
Día	Emisión medida (ug/día) ⁽¹⁾	Emisión estimada (ug/día) ⁽²⁾
Marzo 2 de 2009	1.36E+02	1.64E-06
Marzo 04 de 2009	1.89E+02	1.29E-06
Marzo 06 de 2009	1.67E+02	3.34E-06
Marzo 10 de 2009	6.52E+01	1.51E-06
Marzo 12 de 2009	8.66E+01	1.82E-06
Marzo 14 de 2009	1.49E+02	4.22E-06
Marzo 16 de 2009	7.90E+01	2.32E-06
Marzo 18 de 2009	3.62E+01	1.64E-06
Marzo 20 de 2009	1.68E+02	2.03E-06
Marzo 22 de 2009	9.55E+01	3.45E-06
Marzo 24 de 2009	1.35E+02	2.35E-06
Marzo 26 de 2009	8.75E+01	2.28E-06
Marzo 28 de 2009	1.14E+02	5.84E-06
Marzo 30 de 2009	1.18E+02	2.49E-06
Abril 1 de 2009	1.21E+02	2.93E-06
1) Determinada por monitoreo		
2) Estimada con WATER9		

Fuente: el presente estudio

La siguiente gráfica se puede observar la comparación entre los resultados experimentales y los arrojados por el modelo, la variación entre los resultados

es significativa, razón por la cual incluso las escalas de los ejes deben ser ajustadas de manera independiente.

Gráfica 8. Comparación de valores de fenol experimentales y modelados



Fuente: los autores, 2009

7.3.1 Comparación de medias: para comprobar si los valores de *las cargas diarias de volatilización de fenol* difieren al agruparlas por su categoría de origen (medición de la emisión o estimación por modelo) se debe establecer la *comparación de medias*, la cual abarca la comparación de los valores de una variable continua (cargas diarias de volatilización) según las categorías establecidas (origen) lo que determina la necesidad de aplicar una *prueba estadística para datos independientes*.

La decisión de la prueba que se deba aplicar depende básicamente de las características inherentes a la variable que se desea analizar. En general, las pruebas paramétricas exigen que se cumplan una serie de supuestos como:

- Normalidad en la distribución de la variable
- Igualdad de varianzas
- Independencia de las observaciones

Mediante la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*, se establece la normalidad de la distribución de la serie de datos.

Tabla 29 . Prueba de *Kolmogorov-Smirnov* sobre las cargas diarias de fenol volatilizado

ORIGEN	N	Parámetros Normales		Diferencias más extremas			Z de K-S	Significancia (bilateral)
		Mean	Std. D	Absolute	Positive	Negative		
MEDICIÓN	15	2.61E-06	1.21E-06	0.2067	0.2067	-0.1375	0.801	0.543
MODELO	15	1.16E+02	4.22E+01	0.0902	0.0902	-0.0839	0.349	1.000

Fuente: el presente estudio

La significancia encontrada para ambos grupos ($> 0,05$) determina que las cargas emitidas diariamente tienen un *comportamiento con distribución normal*. Seguidamente, la igualdad de varianzas se determina aplicando la prueba de *Levene* o *test de la razón de varianzas* el cual permite decidir si la varianza en ambos grupos es o no la misma. Esta prueba permite conocer si las varianzas de los dos grupos de observaciones son o no iguales. Si su valor de significancia $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se supondrá que la variabilidad en ambos grupos es sustancialmente distinta (H_1).

Tabla 30 . Prueba de *Levene* sobre las cargas diarias de fenol volatilizado

	Prueba Levene para igualdad de Varianzas	
	F	Significancia
CARGA	29.127	9.380E-06

Fuente: el presente estudio

El valor encontrado de significancia de la prueba determina que las varianzas no son iguales, de tal forma que se debe aplicar la prueba *no paramétrica*.

Las *pruebas no paramétricas* se aplican cuando se desea comparar única y exclusivamente las medias entre dos grupos que no cumplen con los requisitos de normalidad e igualdad de varianzas, para lo cual se emplea la prueba *U de Mann-Whitney*. Esta prueba se emplea entonces con el fin de determinar si dos muestras independientes (cargas de fenol volatilizado medidas y estimadas por modelo) son comparables como para considerar que hayan sido extraídas de poblaciones con la misma distribución.

Tabla 31. Descriptivos de los categorías de carga analizadas. Prueba *U de Mann-Whitney*

	ORIGEN	N	Media del rango	Suma del rango
CARGA	EMISION	15	8	120
	MODELO	15	23	345
	Total	30		

Fuente: el presente estudio

Tabla 32. Prueba *U de Mann-Whitney* para las cargas de volatilización de fenol

	CARGA
Mann-Whitney U	0
Z	-4.66680177
Significancia (bilateral)	3.0592E-06
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	1.2893E-08
Variable de agrupación: ORIGEN	

Fuente: el presente estudio

La prueba *U de Mann-Whitney* muestra una significancia $p < 0.05$, lo que permite establecer que se rechaza la hipótesis nula (H_0), la cual es la igualdad de medias, frente a la hipótesis alternativa (H_1) que determina que las medias no son iguales debido a una variabilidad sustancialmente distinta.

Estos resultados pueden tener dos motivos: el primero es que las cargas de fenol volatilizado medidas y estimadas por el modelo difieren considerablemente; el segundo, es que no existe una unidad que cumpla con todas las condiciones de flujo a pistón para hacer la correcta simulación, por tanto, fue necesario identificar una unidad que cumpliera con las características similares ya que el modelo no cuenta con un reactor anaerobio de flujo a pistón como componente.

Lo anterior significa que si las cargas estimadas mediante el modelo con respecto a las cargas medidas mediante el monitoreo no son iguales, los valores que arroja el modelo no pueden emplearse para la estimación de las cargas en el sistema, este rechazo de hipótesis implica la invalidez de los datos del modelo frente a las mediciones directas de volatilización hechas en campo.

7.3.2 Ventajas y desventajas encontradas en el modelo: entre las ventajas encontradas al aplicar el modelo WATER9, se destacan las siguientes:

- El programa permite simular datos de emisión sin necesidad de utilizar equipos de muestreo directo y análisis de laboratorio
- Los resultados arrojados por el modelo pueden emplearse como punto de referencia al momento de comparar con otras fuentes de información (mediciones directas, análisis de laboratorio, factores de emisión, etc)
- Se pueden considerar diferentes condiciones y variables químicas al momento de modelar.
- Es el único modelo que correlaciona variables fisicoquímicas presentes en los vertimientos o aguas industriales con las emisiones atmosféricas producidas en el sistema.
- Ofrece diferentes unidades de tratamiento que pueden ajustarse a los casos reales.

Como desventajas del modelo, se encontró que:

- No existen muchos registros de su aplicación a nivel mundial.
- No se puede adicionar unidades de tratamiento de aguas residuales que estén por fuera de las que ofrece el modelo.
- No se puede adicionar otros parámetros de fisicoquímicos de aguas residuales, diferentes a los ofrecidos por el modelo.

7.4 BALANCE DE MASAS

La variable de reacción “Z” es positiva en el caso de todos los balances diarios, lo que señala dos posibilidades: la formación de fenol en el sistema, y/o una alta tasa de acumulación (lo cual requiere mayores estudios para comprobarse y reformular algunas ecuaciones).

Es necesario hacer énfasis en que la formación de fenol en el reactor puede darse debido a condiciones favorables tales como presencia de materia orgánica y condiciones anaerobias, además de considerar que dentro de las actividades desarrolladas en la clínica veterinaria y en los laboratorios, no se emplean insumos con fenol.

Adicionalmente, a partir de la Tabla 9 y la Figura 2, se puede concluir que en el reactor puede haber formación de clorofenoles por dos razones principales: el uso de hipoclorito de sodio como uno de los insumos para las labores de limpieza y por la estabilidad que busca el ion fenóxido en el agua (ver numeral 3.2.1), propiedad que le proporciona este sustituyente atrayente (Cl^{-1}); Nitrosfenoles y Nitroquinona, por la presencia de nitratos; y Dihidroxibenceno,

debido a los radicales OH^\cdot disociados (ver Tabla 9). En el caso de los posibles compuestos formados, respaldarían la idea de la posibilidad de formación de fenol en el reactor, así como podría considerarse una baja tasa de degradación o consumo por parte de los microorganismos (respaldado por los antecedentes y la literatura referenciada), lo que demostraría que son compuestos relativamente resistentes a la biodegradación anaerobia.

7.5 DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR

7.5.1 Eficiencias de remoción: Se determinaron las eficiencias de remoción para Fenol, DBO y DQO, dando como resultado 82%, 76% y 69% respectivamente (ver Anexo K); así mismo se compararon las eficiencias de remoción de fenol considerando la volatilización y sin considerarla, a partir de esto, puede concluirse que la diferencia entre éstas es insignificante tal como se muestra en los datos presentados en el Anexo K; en la Gráfica 5 puede observarse la representación gráfica de ambas eficiencias, observando claramente la misma tendencia y con valores cercanos hasta el punto de superponerse en la gráfica.

En las gráficas 4 y 5 observarse una alta fluctuación de las eficiencias, en especial en el fenol y seguido de la DBO, aspecto que se confirma con la desviación estándar para cada una de las eficiencias, la cual se presenta en la gráfica, las cuales demuestran que la eficiencia de DQO es la que tiene menos dispersos los datos. Se considera que esta condición está dada por la variación de las cargas, lo cual afecta la dinámica de flujo a pistón en el reactor.

Así mismo, la baja eficiencia de remoción de fenol (69%), puede atribuirse a la eficiencia del medio de soporte dado por la saturación del sistema por la variación constante de cargas, las cuales probablemente hacen que la tasa de acumulación de fenol en el sistema y/o la producción de fenoles en el mismo supere a la tasa de degradación de los mismos.

De la misma forma, se determinó la constante de remoción K , para definir el modelo de remoción de DBO para este reactor, se obtuvo como resultado la constante $K=3.7 \text{ d}^{-1}$, la Gráfica 5 permite analizar su comportamiento a lo largo de los días de monitoreo observando así una fluctuación considerable, se asume que el motivo de esta fluctuación está dada por la variabilidad de los caudales y la concentración de la carga orgánica que maneja la planta, sin embargo, el promedio geométrico de las constantes estimadas permiten aplicar el modelo para posteriores análisis que se hagan en la planta, así como la posibilidad de considerarla en los diseños de reactores de flujo a pistón que

manejen este tipo de agua industrial y en condiciones climáticas similares a las de Bogotá.

Es así que la ecuación del modelo de remoción de DBO se plantearía como:

Ecuación 22. Modelo de remoción de DBO

$$\theta = \frac{1}{3.7} \ln \frac{1}{1-E}$$

7.5.2 Comparación de eficiencias: como parte del estudio se estimaron las eficiencias del sistema bajo las consideraciones tradicionales (diferencia de cargas en agua) y considerando en la salida, la carga de fenol volatilizado (ver numeral 6.4.1)

Al encontrar que esta es una misma variable (Eficiencia) categorizada por tipo (Con o sin volatilización) se tiene que es posible establecer una comparación de medias para determinar el grado de variabilidad de las mismas. Para ello se tiene que, de acuerdo con la significancia de la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*, las eficiencias muestran una distribución normal. Por otra parte, la prueba de *Leven* determina que debido a que su significancia es $p > 0.05$, las varianzas de los grupos de eficiencias son iguales, de tal forma que se debe aplicar la prueba *T de student* para realizar la comparación de las mismas.

Tabla 33. Prueba de *Kolmogorov-Smirnov* sobre la comparación de eficiencias de fenol

EFICIENCIA	N	Parámetros Normales		Diferencias más extremas			Z de K-S	Significancia (bilateral)
		Mean	Std. D	Absolute	Positive	Negative		
SINV	15	0.628	0.317	0.185	0.143	-0.185	0.717	0.682
CONV	15	0.627	0.318	0.186	0.143	-0.186	0.719	0.680

Fuente: el presente estudio

Tabla 34 . Prueba de *Levene* sobre las eficiencias de fenol

EFICIENCIA	Prueba Levene para igualdad de Varianzas	
	F	Significancia
	1.88E-07	0.9997

Fuente: el presente estudio

Para la prueba *T de student* se establecen las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis nula (H_0):** igualdad de eficiencias

- **Hipótesis alternativa (H_1):** variabilidad en las eficiencias

Tabla 35 . Descriptivos del tipo de eficiencias analizadas. Prueba *T de Student*

	TIPO	N	Media	Desv. Estándar	Error de la media
EFICIENCIA	CON VOLATILIZACIÓN	15	0.628	0.317	0.082
	SIN VOLATILIZACIÓN	15	0.627	0.318	0.082
	Total	30			

Fuente: el presente estudio

Tabla 36 . Prueba *T de Student* para las eficiencias de Fenol

	t	df	Significancia bilateral	Diferencia de Media	Error std. De la diferencia	95% Intervalo de confianza	
	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower
EFICIENCIA	0.002	28	0.999	0.000	0.116	-0.237	0.238

Fuente: el presente estudio

La hipótesis nula de la prueba *T de student* se acepta debido a que el valor de la significancia es $p > 0,05$, lo que permite determinar que la consideración de la volatilización del fenol dentro de los cálculos de eficiencia del sistema no influye considerablemente en el resultado, debido a que la orden de magnitud de la volatilización es 100 veces menor que el fenol presente en el vertimiento tratado.

CONCLUSIONES

El monitoreo permanente del caudal permitió tener un mejor control del reactor facilitando la obtención de las cargas y por tanto mejorando las eficiencias de remoción en términos de DBO, y DQO.

Para el sistema de tratamiento en estudio, se encontró una eficiencia de remoción para el Fenol del 69%, DBO 82% y DQO 76%

La baja eficiencia de remoción de fenol (69%), puede atribuirse al efecto de saturación del medio de soporte y/o a la variación constante de la concentración de fenol en el vertimiento, las cuales probablemente hacen que la tasa de acumulación de fenol en el sistema y/o la producción de fenoles en el mismo supere a la tasa de degradación de éstos.

En cuanto a las eficiencias de remoción del fenol, no resultaron ser las esperadas (establecidas teóricamente entre el 70–90%), esto se atribuyó principalmente a las fluctuaciones constantes de las cargas contaminantes en el afluente.

Se determinó la constante de remoción $K=3.7 \text{ d}^{-1}$, para definir el modelo de remoción de DBO para este reactor anaerobio de flujo a pistón, a partir de éste, se estimó el modelo de remoción de DBO, el cual podrá emplearse para posteriores análisis que se hagan en la planta, así como la posibilidad de considerarla en los diseños preliminares de reactores de flujo a pistón que manejen este tipo de agua industrial y en condiciones climáticas similares a las de Bogotá.

En cuanto al control de calidad en el análisis de las muestras, se obtuvieron porcentajes de recuperación confiables para el pre-tratamiento de las muestras (98%) y el método de extracción de las espumas (81.5%)

Para las emisiones de fenoles detectadas, se determinó que no existe un riesgo a la salud de las personas por exposición a dichos niveles, ya que ninguno de los valores diarios y horarios se acercan a los límites de exposición al fenol establecidos por la norma OSHAS ni la NIOSH.

Se planteó un balance global para el fenol, en el cual se estimó la formación y acumulación de fenol en el sistema a partir de la variable "Z", el valor de esta variable de reacción fue positivo en el caso de todos los balances diarios, lo que señala dos posibilidades: la formación de fenol en el sistema, lo cual tiene una alta probabilidad debido a las condiciones favorables para su formación, tales como materia orgánica y el ambiente anaerobio y/o una alta tasa de acumulación (lo cual requiere mayores estudios para comprobarse y reformular algunas ecuaciones).

La fracción más importante de fenol dentro del sistema es el presente en los lodos, debido a que el fenol tiende a migrar en el medio acuoso a los sedimentos, aspecto que se comprobó en la alta concentración de fenol encontrada en el lodo anaerobio (9.84 mg/L).

Se detectaron emisiones de fenol en el reactor anaerobio durante las 24 horas en los diferentes días de monitoreo, con cargas diarias que variaron entre 36.22 y 189.02 $\mu\text{g/día}$ y una media de 116.43 $\mu\text{g/día}$.

Se ejecutaron las corridas del modelo WATER9 correspondientes a los días y condiciones de monitoreo, tomando como datos de entrada las concentraciones de DBO, DQO, Fenol, Sólidos Totales y disueltos y Aceites y Grasas en el afluente de la planta, así como la temperatura ambiente. A partir de esta información y los datos correspondientes a la configuración del sistema de tratamiento, se estimaron valores de emisión diarios entre 1.29×10^{-6} y 5.84×10^{-6} $\mu\text{g/día}$, con una media de 2.61×10^{-6} $\mu\text{g/día}$.

Se compararon las emisiones de fenol detectadas en campo y las estimadas por el modelo a través de la prueba *U de Mann-Whitney*, lo cual permitió determinar que estas dos variables difieren considerablemente. Estos resultados pueden tener dos motivos: el primero es que las cargas de fenol volatilizado medidas y estimadas por el modelo difieren considerablemente; el segundo, es que no existe una unidad que cumpla con todas las condiciones de flujo a pistón para hacer la correcta simulación, por tanto, fue necesario identificar una unidad que cumpliera con las características similares ya que el modelo no cuenta con un reactor anaerobio de flujo a pistón como componente.

La prueba de *Kolmogorov-Smirnov*, determinó que las eficiencias de remoción de fenol tienen una distribución normal; asimismo, a través de la prueba *t-Student* se establece que la consideración de la volatilización del fenol dentro de los cálculos de eficiencia del sistema no influye considerablemente en el resultado, debido a que el orden de magnitud de la volatilización es 100 veces menor que el fenol presente en el vertimiento tratado.

En cuanto a la correlación del fenol volatilizado del sistema a través de Pearson y Spearman, se estableció que la relación de linealidad más significativa se da entre la volatilización y la temperatura ambiente (0.64), seguida de una correlación mediana con la DQO (0.46) y por último, la correlación más débil con DBO (0.35). Estos resultados permiten establecer una dependencia entre la temperatura y la volatilización, aspecto que no ocurre con los parámetros de DBO, DQO y fenol en el afluente.

Las emisiones de fenol detectadas en campo no representarían un riesgo significativo para la salud de las personas expuestas a dichos niveles como una persona trabajando en la operación de la planta.

RECOMENDACIONES

Se hace necesario realizar estudios referentes a las tasas de degradación, acumulación y volatilización del fenol en estos sistemas de tratamiento, con el fin de comprender de manera más precisa la dinámica del reactor y así determinar si hay una formación significativa de estos compuestos en el medio anaerobio.

Se sugiere realizar estudios de la eficiencia del reactor bajo diferentes condiciones de oxido-reducción, ya que estudios como los presentados por PUIG⁸⁶ demuestran que aceptores de electrones tales como Fe(III) y Mn(IV) son metales muy importantes en sistemas biológicos.

Es recomendable profundizar el análisis de la eficiencia retención de fenol en la espuma, comparada con otros medios de soporte permitiendo así la selección del medio que favorezca más la retención de los contaminantes y la adhesión de la masa microbiana para los procesos de biodegradación.

Se recomienda a los próximos investigadores que trabajen en el RAP, la revisión y retroalimentación del modelo de remoción del fenol, con el fin de tener un dato más preciso a través de los datos históricos de eficiencias del reactor.

La posible formación de clorofenoles en el medio por la presencia del hipoclorito de sodio, permite sugerir realizar un estudio en el que se compruebe esta hipótesis, debido a que este compuesto es de gran interés en el campo ambiental por su nivel de toxicidad.

La fracción más importante de fenol dentro del sistema son los lodos, debido a que el fenol tiende a migrar en el medio acuático a los sedimentos, por lo cual se recomienda centrar la atención en este aspecto debido al manejo que debe darse de los lodos anaerobios.

⁸⁶ PUIG Grajales, M^a del Carmen. Op Cit. p 22

Se recomienda implementar medidas de producción más limpia en la clínica veterinaria para disminuir las cargas contaminantes en el efluente.

Una de las medidas de control en la fuente en la clínica veterinaria puede darse a través de la evaluación de sustitución de insumos de aseo, en el que pueda considerarse el reemplazo del hipoclorito de sodio por una sustancia que tenga una mayor biodegradación y así disminuir la presencia de cloro en el efluente de la clínica, ya que éste puede ser una condición que favorezca la producción de clorofenoles en el sistema de tratamiento.

Se recomienda llevar a cabo un mantenimiento diario de la planta de tratamiento, en la que se incluye limpieza del pozo, control de caudales por parte de personal responsable de la operación de la PTAR.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Métodos Normalizados para el Análisis de aguas potables y residuales. 17 ed. Madrid (España): Ediciones Díaz de Santos, 1992. 1200 p.

ANEJA, Viney y **BLUNDEN**, Jessica. Dynamic Chamber System to Measure Gaseous Compounds Emissions and Atmospheric-Biospheric Interactions. Environmental Simulation Chambers: Application to Atmospheric Chemical Processes, 97–109. Springer: 2006. Disponible en la base de datos SpringerLink, ISBN 978-1-4020-4232-4 [on line]. [Citado Abril 2008]

ARIAS, Dayana y **ANGULO** Alexandra. Evaluación de la remoción y el transporte de fenoles en un reactor híbrido entre flujo a pistón y humedal artificial, con guadua y planta macrofita (*Polygonum hydropiperoides*) como medio de soporte fijo, para el tratamiento de aguas residuales industriales. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2009. 181p.

BALDA, Roberto, **GONZÁLEZ**, Javier. Proyecto marco de investigación: “Análisis comparativo entre medios de soporte fijo (guadua y espuma con plantas macrófitas) y medios de soporte fijo únicamente, en reactores de flujo a pistón para remoción de fenoles y materia orgánica en aguas residuales”. Bogotá: Universidad De La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2007. 20 p.

BALDA, Roberto. Tratamiento Anaerobio. [Diapositivas de clase] Recurso Agua. Universidad de La Salle. [2005], 20 diapositivas.

CARVALHO H y **JURANDYR** P. Filtros biológicos anaerobios: revisao de literatura, projeto e desenvolvimento, escola de engenharia de Sao Carlos. São Paulo: Universidad de Sao Paulo (EESC – USP), 1996. Citado por BALDA, Roberto Proyecto marco de investigación: “Análisis comparativo entre medios de soporte fijo (guadua y espuma junto con plantas macrófitas) y medios de soporte fijo únicamente, en reactores de flujo a pistón para remoción de fenoles y materia orgánica en aguas residuales”. Bogotá: Universidad De La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2007. 20 p.

CRITES, Ron y **THOBANOGLIOUS**, George. Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Colombia: Mc Graw Hill, 2000. Tomo 1

CUBILLOS Roa, Fabián. Puesta en marcha de un reactor anaerobio de flujo a pistón para el manejo de lixiviados del relleno sanitario de Villavicencio “Don Juanito”. Proyecto de grado Ingeniero Ambiental y Sanitario. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2004. 106 p.

DELGADO, Adriana. **MEJÍA**, María Victoria. Diagnóstico de la actividad extractiva en la Localidad de Usaquén. Contrato 078 de 2000. Disponible en: www.dapd.gov.co/www/resources/tqv_recorriendo_usaquen.pdf, [Citado Abril 2009]

EPA. Toxicological Profile of Phenol – Draft. 2006. p. 159, Disponible en: www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp115-c6.pdf. [citado Abril 2008]

EPA. Toxicological Review of phenol. CAS No. 108-95-2. Washington D.C.: Septiembre 2002. [Citado Abril 2008], Disponible en: <http://www.epa.gov/IRIS/toxreviews/0088-tr.pdf>

EPA. User's Guide For WATER9 Software. Version 2.0.0. August 16, 2001, p 1 - 1. Disponible en : <http://www.epa.gov/ttnchie1/software/water/index.html>

ESPINOSA, M.C y **GUERRA**, M. Comportamiento de fenoles y ácidos de volatilidad media en residuales de plantas de beneficio en café tratados en reactor de flujo ascendente con manto de lodo. [On line] Revista Cenic N° 19(No. Esp.):118. Cuba 1988.

GEISSMAN, T. A. Principios de química orgánica. p 734. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=msYg6lgMFU8C&pg=PA734&dq=solubilidad+fenol&lr=&ei=QLxbStPZBJ-cyATaupGWBw>

HERNANDEZ M., Aurelio. Depuración de Aguas Residuales. Colegio de Ingenieros de caminos, Canales y Puertos. Cuarta Edición. Madrid, 1998. P 828

IDEAM. Manual de métodos y protocolos para el análisis químico de aguas naturales, domésticas y efluentes industriales. Programa de Química Ambiental, Laboratorio de Química Ambiental. Bogotá: IDEAM, 1997.

IDEAM. Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. [Presentación en diapositivas]. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. [2006], diapositiva27. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/Presentacion_protocolo.ppt [Citado Junio 2009]

KLAGES, F. Tratado de Química Orgánica. Química orgánica sistemática. Disponible en: www.bbhttp://books.google.com.co/books?id=nhcGf55Gy58C&pg=PA239&dq=solubilidad+fenol&ei=f7JbSqz-JJKAzgTYzPwi. p 239.

LAGREGA, Michael; *et al.* Gestión de residuos tóxicos: Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. México: Mc Graw Hill, 1996. Manejo del fenol y derivados fenólicos. [Citado Mayo 2009]. Disponible en: http://www.sprl.upv.es/IOP_SQ_33.htm#punto3

<http://www.mn-net.com/StartpageWaterAnalysisTesting/NANOCOLOR/Standardtests/Standardtestphenol/tabid/4746/language/en-US/Default.aspx>, [Citado Febrero 2009]

NIOSH. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Phenol. Appendix I. Sampling Phenol in air, pag 118. Disponible en: <http://www.cdc.gov/NIOSH/76-196.html>

PANREAC. Ficha de datos de seguridad 134852. [Citado Mayo 2009]
PUIG Grajales, M^a del Carmen. Degradación de compuestos oxigenados y alquilfenólicos bajo condiciones anaerobias. Tesis de Maestría en Biotecnología. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, División de ciencias tecnológicas y de la salud. 1999, 80 p.

ROCHA, Andrés y **JAIMES**, Marcela. Análisis comparativo de la remoción de fenoles en reactores anaerobios de flujo a pistón con guadua y plantas macrófitas en el tratamiento de los vertimientos de la clinica veterinaria de la Universidad De La Salle. Proyecto de grado Ingenieros Ambientales y Sanitarios. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2009. 106pag.

RODRIGUEZ, D. Balances de materia o masa. Guía CI41B para Ingeniería Ambiental. Semestre Otoño 2004. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/CI41B/1/material_alumnos/previsualizar?id_material=20695. [Citado Junio 2009]

RODRÍGUEZ, Ingrith y **MENDEZ**, César. Análisis comparativo entre medios de soporte fijo de plástico, grava y guadua, en reactores anaerobios de flujo a pistón para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Proyecto de grado Ingenieros Ambientales y Sanitarios. Bogotá: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2004. 145 p.

ROMERO R., Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. 1248 p.

SALINAS, M. Modelos de Regresión y Correlación IV. Correlación de Spearman. Fundación Científica y Tecnológica ACHS Disponible en: www.cienciaytrabajo.cl/pdfs/25/pagina%20143.pdf, p. 145 [Citado Julio 2009]

SAWYER, Clair; **McCARTY**, Perry y **PARKIN** Gene. Química para Ingeniería Ambiental. 4 ed. Bogotá: Mc Graw Hill, 2000

SNOEYINK, Vernon; **JENKINS**, David. Química del Agua. 1 ed. México: Limusa, 1987. 508 p.

U. S. Environmental Protection Agency. Air Emissions Models For Waste And Wastewater. November, 1994

U. S. Environmental Protection Agency. Toxicological Profile of Phenol – Draft. 2006. Disponible en: www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp115-c6.pdf

U. S. Environmental Protection Agency. User's guide for WATER9 software. Version 2.0.0. August 16, 2001

USGS - U.S. Geological Survey. Manual de campo interinstitucional para la recolección de datos sobre la calidad del agua. [citado Abril 2008]. Disponible en: http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr00213/manual_sp/glossary.html

WEININGER, Stephen. Química Orgánica. Barcelona: Reverté, 1988. 1202p. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=O6YvtgAtXmC&printsec=frontcover>

WINKLER, Michael A. Tratamiento biológico de aguas de desecho. México: Limusa, 2007. p. 314

World Health Organization. Environmental Health Criteria 161 – Phenol. Geneva: WHO, 1994. 60 p.

[http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/JornadasPreservacion VI/031.pdf](http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/JornadasPreservacion_VI/031.pdf) [citado Abril 2008]

http://emergencias.euskadi.net/AyudaFichas/html/body_propiedades.html [citado Abril 2009]

<http://estadistico.com/dic.html?p=4584> [Citado Julio 2009]

<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=807596>

<http://water.me.vccs.edu/courses/ENV149/lesson4b.htm>.

<http://weblogs.madrimasd.org/remtavares/archive/2009/02/20/113222.aspx> [citado Abril 2009]

<http://weblogs.madrimasd.org/remtavares/archive/2009/04/10/116237.aspx> [citado Abril 2009]

<http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ19.pdf>. [citado Abril 2009]

<http://www.aguaslatinas.com/html/tecnologia.htm#3>. [Citado Abril 2008]

<http://www.cdc.gov/niosh/>

<http://www.epa.gov/espanol/sobreepa.htm#whatwedo>. [citado Abril 2008]

<http://www.ess.co.at/GAIA/models/msqldb/models/caline/cal1-3.htm>

<http://www.fcca.es/Docs/Informe%20fenoles.doc>

<http://www.fichasdeseguridad.com/fenol.htm>. [citado Abril 2008]

<http://www.ingenieroambiental.com/4014/diazve.pdf> [Citado en Abril 2009]

<http://www.ingenieroambiental.com/4014/medina2.pdf> [Citado en Abril 2009]

<http://www.lakes-environmental.com/toxic/PHENOL.HTML>. [Citado Mayo 2009]

<http://www.lenntech.com/espanol/Pre-fermentacion.htm> [Citado Junio de 2009]

<http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa2.shtml>. [Citado Abril 2008]

<http://www.panreac.com/new/esp/fds/ESP/X134852.htm>

<http://www.scribd.com/doc/15573270/13-REACION-D-SCHOTTEN-BAUMANN-Obtencion-d-Benzoato-de-Fenilo>

http://www.serbi.luz.edu.ve/pdf/bcib/v39n3/art_05.pdf. [Citado en Abril 2009]

<http://www.ventanamed.com/msds/files/00232044ES.PDF>

<http://www.weblakes.com/ISCAERMOD/ISCAERFeatures.html>

IDEAM. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá: IDEAM, 2004. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/guia.pdf>. [Citado Abril 2009]

www.secretariadeambiente.gov.co, [Citado Abril 2009]

www.fcca.es/Docs/Informe%20fenoles.doc. [citado Abril 2008]

www.fcca.es/Docs/Informe%20fenoles.doc. [citado Abril 2008]

www.idard.org.do/capacitacion/1erDiplomado/Docu/Movimiento.pdf[Citado Abril 2009]

www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion2.pdf; [Citado Abril 2000]

ANEXOS

ANEXO A. PLANOS DEL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO A PISTÓN

ANEXO B. FICHA DE SEGURIDAD DEL FENOL



Ficha de Datos de Seguridad

Según Directiva 2001/58/CE

Panreac

164852 **Fenol cristalizado** (cristales sueltos) PS

1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa

1.1 Identificación de la sustancia o del preparado

Denominación:

Fenol cristalizado (cristales sueltos)

1.2 Uso de la sustancia o preparado:

Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

1.3 Identificación de la sociedad o empresa:

PANREAC QUIMICA, S.A. E 08110 Montcada i Reixac
(Barcelona) España Tel.:(+34) 935 642 408

Urgencias:

Número único de teléfono para llamadas de urgencia: 112 (UE)

Tel.: (+34) 935 642 408

2. Composición/Información de los componentes

Denominación: Fenol cristalizado (cristales sueltos)

Fórmula: C_6H_6O M.=94,11 CAS [108-95-2]

Número CE (EINECS): 203-632-7

Número de índice CE: 604-001-00-2

3. Identificación de los peligros

Tóxico en contacto con la piel y por ingestión. Provoca quemaduras.

4. Primeros auxilios

4.1 Indicaciones generales:

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

4.2 Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.

4.3 Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. Extraer el producto con un algodón impregnado en polietilenglicol 400.

4.4 Ojos:

Lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir inmediatamente atención médica.

4.5 Ingestión:

Beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

5. Medidas de lucha contra incendio

5.1 Medios de extinción adecuados:

Agua. Espuma.

5.2 Medios de extinción que NO deben utilizarse:

5.3 Riesgos especiales:

Inflamable. Mantener alejado de fuentes de ignición. Los vapores son más pesados que el aire, por lo que pueden desplazarse a nivel del suelo. Puede formar mezclas explosivas con aire. En caso de incendio pueden formarse vapores tóxicos.

5.4 Equipos de protección:

6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones individuales:

Evitar el contacto con la piel, los ojos y la ropa.

6.2 Precauciones para la protección del medio ambiente:

No permitir el paso al sistema de desagües. Evitar la contaminación del suelo, aguas y desagües.

6.3 Métodos de recogida/limpieza:

Recoger en seco y depositar en contenedores de residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante.

7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Manipulación:

Sin indicaciones particulares.

7.2 Almacenamiento:

Recipientes bien cerrados. Ambiente seco. Protegido de la luz. En local bien ventilado. Mantener alejado de sustancias inflamables, fuentes de ignición y calor. Temperatura ambiente. Acceso restringido, sólo autorizado a técnicos. No almacenar en recipientes metálicos.

8. Controles de exposición/protección personal

8.1 Medidas técnicas de protección:

8.2 Control límite de exposición:

VLA-ED: 5 pm ó 20 mg/m³, resorción dermal

8.3 Protección respiratoria:

En caso de formarse polvo, usar equipo respiratorio adecuado. Filtro A. Filtro P₃.

8.4 Protección de las manos:

Usar guantes apropiados

8.5 Protección de los ojos:

Usar gafas apropiadas.

8.6 Medidas de higiene particulares:

Quitarse las ropas contaminadas. Usar equipo de protección completo. Lavarse manos y cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo. No comer, beber ni fumar en el lugar de trabajo.

8.7 Controles de la exposición del medio ambiente:

Cumplir con la legislación local vigente sobre protección del medio ambiente.

El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y, cuando proceda, el tiempo de penetración de dicho material, en relación con la cantidad y la duración de la exposición.

9. Propiedades físicas y químicas

Aspecto:

Cristales incoloros.

Olor:

Característico.

pH~5

Punto de ebullición :182°C

Punto de fusión : 40,85°C

Punto de inflamación : 79°C

Límites de explosión (inferior/superior): 1,7/8,6 Vol. %

Presión de vapor: 40,7 hPa (25°C)

Solubilidad: 90 g/l en agua a 20°C

10. Estabilidad y reactividad

10.1 Condiciones que deben evitarse:

10.2 Materias que deben evitarse:

Aluminio. Aldehídos. Halógenos. Nitritos. Nitratos. Peróxido de hidrógeno (agua oxigenada). Compuestos férricos. Halogenatos. Peróxidos. Goma.

10.3 Productos de descomposición peligrosos:

10.4 Información complementaria:

Higroscópico.

11. Información toxicológica

11.1 Toxicidad aguda:

DL₅₀ oral rata: 317 mg/kg

DLLo oral hombre: 140 mg/kg

DL₅₀ dermal rata: 669 mg/kg

DL₅₀ intraperitoneal ratón: 180 mg/kg

Toxicidad subaguda a crónica:

Ensayos sobre animales: -----

11.2 Efectos peligrosos para la salud:

En contacto con la piel: quemaduras. Riesgo de absorción cutánea.

Por contacto ocular: quemaduras. Riesgo de ceguera (lesión irreversible del nervio óptico)

Efectos sistémicos: efectos en el sistema nervioso central, trastornos cardiovasculares, alteraciones sanguíneas, sensibilización, reacción alérgica. Por inhalación del polvo: Irritaciones en mucosas, tos, dificultades respiratorias.
No se descartan otras características peligrosas. Observar las precauciones habituales en el manejo de productos químicos.

12. Información Ecológica

12.1 Movilidad :

Reparto: $\log P(\text{oct}) = -1,46$

12.2 Ecotoxicidad :

12.2.1 - Test EC_{50} (mg/l) :

Bacterias (*Photobacterium phosphoreum*) = 25 mg/l ; Clasificación : Extremadamente tóxico.

Crustáceos (*Daphnia Magna*) = 100 mg/l ; Clasificación : Extremadamente tóxico.

Peces (*C. auratus*) = 44,5 mg/l ; Clasificación : Extremadamente tóxico.

12.2.2 - Medio receptor :

Riesgo para el medio acuático = Alto

Riesgo para el medio terrestre = Alto

12.2.3 - Observaciones :

Elevada toxicidad.

12.3 Degradabilidad :

12.3.1 - Test : DQO 2,3 g/g

ThOD = 2,26 mg/g

$DBO_5 = 1,88$ g/g

12.3.2 - Clasificación sobre degradación biótica :

DBO_5/DQO Biodegradabilidad = Alta, más de 1/3

12.3.3 - Degradación abiótica según pH : -----

12.3.4 - Observaciones :

Producto biodegradable.

12.4 Acumulación :

12.4.1 - Test :

12.4.2 - Bioacumulación :

Riesgo = -----

12.4.3 - Observaciones :

Producto no bioacumulable.

12.5 Otros posibles efectos sobre el medio natural :

Producto contaminante del agua. Efecto bactericida. No permitir su incorporación al suelo ni a acuíferos.

13. Consideraciones sobre la eliminación

13.1 Sustancia o preparado:

En la Unión Europea no están establecidas pautas homogéneas para la eliminación de residuos químicos, los cuales tienen carácter de residuos especiales, quedando sujetos su tratamiento y eliminación a los reglamentos internos de cada país. Por tanto, en cada caso, procede contactar con la autoridad competente, o bien con los gestores legalmente autorizados para la eliminación de residuos.

2001/573/CE: Decisión del Consejo, de 23 de julio de 2001, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE de la Comisión en lo relativo a la lista de residuos.

Directiva 91/156/CEE del Consejo de 18 de marzo de 1991 por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos.

En España: Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. Publicada en BOE 22/04/98.

ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Publicada en BOE 19/02/02.

13.2 Envases contaminados:

Los envases y embalajes contaminados de sustancias o preparados peligrosos, tendrán el mismo tratamiento que los propios productos contenidos.

Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases.

En España: Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. Publicada en BOE 25/04/97.

Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. Publicada en BOE 01/05/98.

14. Información relativa al transporte

Terrestre (ADR 1999):

Denominación técnica: Fenol sólido

ONU 1671 Clase: 6.1 Apartado y letra: 14b

Terrestre (ADR 2001):

ONU 1671 Clase: 6.1 Grupo de embalaje: II

Marítimo (IMDG):

Denominación técnica: Fenol sólido

ONU 1671 Clase: 6.1 Grupo de embalaje: II

Aéreo (ICAO-IATA):


Denominación técnica: Fenol sólido

ONU 1671 Clase: 6.1 Grupo de embalaje: II

Instrucciones de embalaje: CAO 615 PAX 613

15. Información reglamentaria

15.1 Etiquetado según Directiva de la CE

Símbolos: 

Indicaciones de peligro: Tóxico

Frases R: 24/25-34 Tóxico en contacto con la piel y por ingestión. Provoca quemaduras.

Frases S: 28f-45 En caso de contacto con la piel, lávese inmediata y abundantemente con polietilenglicol 400 y agua abundante. En caso de accidente o malestar, acuda inmediatamente al médico (si es posible, muéstrole la etiqueta).

Número de índice CE: 604-001-00-2

15.2 Disposiciones particulares en el ámbito comunitario:

16. Otras informaciones

Número y fecha de la revisión:1 23.03.02

Respecto a la revisión anterior, se han producido cambios en los apartados: 8.
Los datos consignados en la presente Ficha de Datos de Seguridad, están basados en nuestros actuales conocimientos, teniendo como único objeto informar sobre aspectos de seguridad y no garantizándose las propiedades y características en ella indicadas.

ANEXO C. PROTOCOLO DE MUESTREO DE AIRE

PROTOCOLO DE MUESTREO Y TÉCNICA ANALÍTICA PARA LA DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE FENOL EN EL AIRE POR MEDIO DEL MÉTODO DE ADSORCIÓN EN SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO Y ANÁLISIS COLORIMÉTRICO CON 4-NITROANILINA DIAZOTADA

Las muestras de fenol en aire pueden ser tomadas por el método de adsorción en una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) contenida en botellas de lavado, burbujeadores o filtros impregnados con la misma solución; para volúmenes de aire muy grandes, el método del Hidróxido de Sodio es el más empleado, mientras que para volúmenes pequeños, algunos autores recomiendan métodos con tubos con absorbentes sólidos¹. Para seleccionar el método de muestreo, es recomendable considerar el método de análisis a emplear y su límite de detección. En la siguiente tabla se presentan algunos de los métodos y condiciones para la detección y análisis del fenol en el aire.

Tabla 1. Métodos para la detección del fenol en el aire

Muestreo	Volumen de aire (Litros)	Pre-tratamiento antes del análisis	Análisis	Límite de detección ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Adsorbancia en solución de NaOH en botella de lavado (1 L/min)	100	Acidificación	Cromatografía de gases y detector FID	10 $\mu\text{g}/\text{muestra}$
Absorbancia en solución de NaOH en un burbujeador (20 L/min)	25 000	Acidificación y destilación al vapor	Cromatografía de gases y detector FID	4
Filtro de fibra de vidrio impregnado con NaOH y glicerol (120 Lt/min)	600	Acidificación y extracción con éter	Cromatografía de gases y detector FID	13
Absorbancia en solución de NaOH en un burbujeador (28 L/min)	1000	Acidificación y destilación al vapor	Colorimetría con 4-amino antipirina	2
Absorbancia en solución de NaOH en botella de lavado (1 L/min)	-	Ninguna	Colorimetría con 4-amino antipirina	700
Absorbancia en solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) (1L/min)	30	Calibración a pH=10 y pH=7	UV a 235 nm a 2 valores de pH	160

Fuente: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria 161 – Phenol. Geneva, 1994. P. 21

¹WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria 161 – Phenol. Geneva, 1994. P. 20

1. PRINCIPIO Y APLICACIÓN DEL MÉTODO:

Un volumen conocido de aire es pasado a través de un burbujeador (o impinger), el cual contiene 50 ml de una solución de Hidróxido de Sodio 0,1N como medio absorbedor. La solución resultante es acidificada con ácido fosfórico con el fin de eliminar las interferencias en la muestra²; una alícuota de la muestra, es analizada por un método de determinación fotométrico con 4-nitroanilina diazotada luego de ser sometida a un proceso de destilación para la eliminación de impurezas. El fenol reacciona con la 4-nitroanilina diazotada para formar una coloración roja, la mayoría de los derivados fenólicos también se determinan, por lo que el color puede variar entre amarillo, marrón y rojo con otros fenoles³.

La concentración reportada por el método es proporcional al volumen de aire que pasó a través del burbujeador durante el periodo de monitoreo⁴.

2. PRECISIÓN DEL MÉTODO:

La eficiencia de la absorción es del 95 al 99% en los burbujeadores con 50 ml de solución absorbente⁵. La cantidad detectable mínima del método es de 0.01 mg/L de fenol empleando una celda de 5 cm.⁶

3. INTERFERENCIAS⁷:

- ▶ Los recipientes de las muestras deben limpiarse cuidadosamente. Lave toda la vidriería tan pronto como sea posible después de su uso enjuagando con el último solvente empleado en el mismo. Este enjuague puede ser seguido de un lavado con jabón, agua caliente y enjuagado con agua de la llave y agua destilada.
- ▶ La botella y la tapa deben ser lavados y enjuagados con acetona o cloruro de metileno y secar antes de usarlo para reducir al mínimo su contaminación
- ▶ Las interferencias como presencia de sustancias oxidantes y reductoras, y valores de pH alcalinos pueden controlarse por medio de la acidificación

² Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales p. 5-62

³ Determinación fotométrica del fenol. Disponible en: <http://www.mn-net.com/StartpageWaterAnalysisTesting/NANOCOLOR/Standardtests/Standardtestphenol/tabid/4746/language/en-US/Default.aspx>

⁴ NIOSH. Pág 121

⁵ Universidad de la Salle. Protocolo para la determinación de dióxido de nitrógeno en el aire ambiente para la asignatura de Estudios de Calidad. Bogotá, 2005

⁶ <http://www.mn-net.com/StartpageWaterAnalysisTesting/NANOCOLOR/Standardtests/Standardtestphenol/tabid/4746/language/en-US/Default.aspx>

⁷ EPA. Appendix a to part 136 methods for organic chemical analysis of municipal and industrial wastewater. Method 604 – Phenols. Pág 2

4. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS:

La figura 1 resume los elementos necesarios para el desarrollo del protocolo.

Figura 1. Materiales, equipos y reactivos para la determinación de fenol en aire.

	Monitoreo	Transporte y almacenamiento	Análisis de las muestras
Materiales	<ul style="list-style-type: none">- Medidor de Burbuja- Cronómetro- Manguera tipo teflón o Tygon- Probeta 100 ml	<ul style="list-style-type: none">- Nevera de Icopor- Envase de vidrio ámbar y tapa Teflón (Si no hay disponibles, la muestra debe protegerse de la luz)	<ul style="list-style-type: none">- Balón aforado de 1 L- 4 Balones aforados de 25 ml- Espátula- Beaker 50 ml- Probeta 50 ml- Pipetas de 1 ml y 10 ml aforadas
Equipos	<ul style="list-style-type: none">- Equipo de tres Gases		<ul style="list-style-type: none">- Equipo de desdilación- Fotómetro- Balanza analítica- pHmetro
Reactivos	<ul style="list-style-type: none">- Solución de Hidróxido de sodio 0,1 N- Solución de Ácido Fosfórico 1 N		<ul style="list-style-type: none">- Fenol- Kit para análisis de Fenoles Nanocolor

Fuente: Los autores, 2008

- **Preparación de los reactivos⁸:**

- *Solución de Hidróxido de sodio 0,1 N:* disuelva 4 gr de NaOH en 100 ml de agua
- *Solución de Ácido Fosfórico 1 N:* agregue 1,9 ml de H₃PO₄ en un valor de 100 ml, y complete el volumen con agua destilada.

⁸ Las soluciones preparadas para este método son corrosivas, por lo que usted debe tener precaución en la manipulación de las mismas usando los elementos de protección personal, tales como guantes y gafas de seguridad. Para mayor información sobre la manipulación de estas sustancias, consulte las fichas de seguridad.

5. MONITOREO

5.1 Procedimiento de muestreo

- Verificación del equipo:
Prepare el equipo de tres gases para el monitoreo, verifique que todas las mangueras están bien conectadas y que éstas y los burbujeadores se encuentran limpios (Ver Interferencias y Recomendaciones); así mismo verifique el funcionamiento de la bomba.
- Transfiera al absorbedor (burbujeador o impinger) la cantidad de solución de hidróxido de sodio 0.1 N, dado el caudal de la bomba que requiere el método, para un muestreo de 1 hora agregue 30 ml de la solución absorbidora al burbujeador (esto evitará pérdidas de la solución y contaminación de la muestra ya que el burbujeo no alcanza a rebosar dentro del impinger)
- Haga una marca en el nivel de los 30 ml con el fin de revisar las pérdidas durante el muestreo por evaporación
- Conecte el absorbedor al tren de muestreo y revise las conexiones (Imagen 1)
- Encienda la bomba
- Al identificar que el aire pasa por los absorbedores, realice el paso de calibración (Revisar Procedimiento de aforo de caudal)
- La tubería de salida gases del reactor debe estar acondicionada para el muestreo; en la tubería de salida de gases, se instala un buje con el fin de reducir el diámetro de la tubería (de 1" a ¼") y así hacer la conexión a la manguera del muestreador de 3 gases (Imagen 2). Así mismo, verifique que el reactor se encuentra completamente sellado para garantizar que el aire muestreado proviene únicamente del reactor.
- Conecte la manguera de muestreo al buje adaptado a la unidad de tratamiento y dé inicio al monitoreo (Imagen 3)
- Mantenga los burbujeadores dentro de una nevera de icopor con hielo y aislado de la luz, esto disminuirá las interferencias posibles por evaporación de la muestra y por la naturaleza reactiva del fenol en presencia de luz solar.

Imagen 1. Verificación de las conexiones del equipo de muestreo



Fuente: los autores, 2009

Imagen 2. Acondicionamiento de la tubería de gases para el muestreo



Fuente: los autores, 2009

Imagen 3. Sistema de monitoreo



Fuente: los autores, 2009

5.2 Procedimiento de aforo de caudal

Ya que la exactitud de un análisis es a menudo limitada por la exactitud del volumen de aire que se mide, es esencial la calibración del instrumento de monitoreo⁹. En el sistema de muestreo de tres gases el flujo de aire es susceptible a variar, por lo cual se recomienda que durante todo el monitoreo, se esté revisando el caudal cada hora por el método que se describe a continuación.

a. Determinación del caudal por medio del método de burbuja¹⁰

La Imagen 4 muestra la conexión del sistema para la determinación del caudal

- Humedezca el cilindro graduado de 500 ml con agua y luego enjabone las paredes del mismo para que la burbuja se pueda deslizar
- Conecte la manguera de monitoreo al cilindro graduado

⁹ NIOSH.... Pag 119

¹⁰ Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Protocolo para la determinación de dióxido de nitrógeno en el aire ambiente para la asignatura de Estudios de Calidad. Bogotá, 2005

- Ponga el cilindro graduado sobre un recipiente que contenga agua jabonosa, de tal forma que cuando se encienda el equipo, la burbuja se deslice por las paredes del cilindro
- Encienda la bomba
- Tome como volumen de referencia 200 ml, es decir, identifíquelo para contabilizar el tiempo que demora la burbuja en recorrerlo.
- Contabilice el tiempo de recorrido de la burbuja
- Realice el cálculo del flujo volumétrico que pasa a través del orificio, éste se calculará por medio de la ecuación 1.

Ecuación 1.
$$Q = \frac{\text{Volumen recorrido por la burbuja (l)}}{\text{Tiempo de recorrido (min)}}$$

Imagen 4. Montaje del equipo de tres gases y aforo del flujo por el método del orificio crítico



Fuente: los Autores, 2009

5.3 Revisión posterior al muestreo

- Verifique las siguientes condiciones:
 - o Establezca el periodo de monitoreo que puede ser hasta de 24 horas, garantice siempre que cada vez que se apague la bomba, se reemplace la solución adsorbente, esto para minimizar las interferencias por el tiempo que permanezca dicha solución expuesta a las condiciones ambientales
 - o Verifique la línea marcada en el burbujeador, las pérdidas por evaporación deben ser inferior a 9 ml; es decir, si el volumen de la solución es inferior a 21 ml es necesario descartar la muestra, para el caso de este método, el monitoreo era menor a 1 hora, por lo que no se presentaba evaporación de las muestras.

5.4 Procedimiento de almacenamiento y transporte de las muestras¹¹

- Destape el burbujeador y vacíe el contenido del mismo cuidadosamente en el envase de vidrio ámbar con tapa de teflón, el cual estará debidamente rotulado, enjuague el burbujeador dos veces con 1 ml de solución absorbedora para terminar de remover la muestra del mismo y deposítelo en el envase de la muestra. Recuerde el uso de los elementos de protección personal para su manipulación por su carácter corrosivo.
- Agregue unas gotas de la solución de ácido fosfórico 1N y mezcle, asegúrese que el pH de la muestra es menor a 4.00 (si no cuenta con pHmetro, puede verificarlo con indicador naranja de metilo)
- Cierre bien el envase, garantizando que no haya derrames durante el transporte, y que la tapa del envase sea preferiblemente de teflón.
- Deposite la muestra en la nevera de icopor y mantenga la temperatura recomendada de 4°C mientras se analiza la muestra en el laboratorio, a no ser que el análisis se haga en un plazo máximo de 4 horas después de finalizado el muestreo.
- Las muestras conservadas y almacenadas, deben analizarse en un plazo máximo de 28 días

Estas recomendaciones evitan derrames o evaporaciones de la muestra durante su transporte y/o almacenamiento. La solución de hidróxido de sodio 0.1 N que se maneje como blanco en el análisis en el laboratorio, debe ser manejada en las mismas condiciones, excepto por someterlo al muestreo de 24 horas en el equipo de tres gases.

6. ANÁLISIS DE LA MUESTRA

- Lleve las muestras a temperatura ambiente
- Si hubo evaporación de la muestra, completar hasta 50 ml con solución absorbedora.
- Realice la calibración del método siguiendo el procedimiento que se describe en el numeral 6.1

6.1 Procedimiento de calibración del método

Debido a que las cantidades relativas de compuestos fenólicos en una muestra dada es impredecible, no es posible proporcionar un patrón universal que contenga una mezcla de fenoles. Por esta razón, el propio fenol (C_6H_5OH) ha sido seleccionado como un patrón para los procedimientos colorimétricos; cualquier color producido por la reacción de otros compuestos fenólicos se informa como *fenol*. Debido a que la

¹¹ NIOSH. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Phenol. Appendix I. Sampling Phenol in air, pag 118. Disponible en: <http://www.cdc.gov/NIOSH/76-196.html>

sustitución suele reducir la respuesta, esta concentración representa la concentración mínima de los compuestos fenólicos¹².

6.1.1 Preparación de patrones

- En 5 balones de 100 ml, prepare soluciones patrón de 0.1; 0.5; 1.0; 3.0 y 5.0 mg/L¹³ (recuerde tener presente la pureza del reactivo para los cálculos respectivos)
- Debido a la volatilidad del fenol puro, y la sensibilidad de los patrones, se recomienda la preparación de un patrón inicial o solución madre de 100 mg/L, a partir de la cual se prepare un patrón secundario de 10 mg/L y de éste último los patrones a emplear en el método. Esta solución madre puede emplearse dentro de un periodo máximo de 1 semana, el patrón secundario máximo un día, y los patrones de calibración se deberán emplear dentro de las dos horas siguientes a su preparación¹⁴. Puede envolver en papel aluminio los balones de las soluciones para evitar exponer los patrones a la luz solar.
- No olvide lavar cuidadosamente el material de trabajo, preparar las soluciones con agua destilada y previamente hervida, y tener presente el porcentaje de pureza del fenol para hacer los cálculos respectivos y determinar la cantidad de fenol a agregar a cada balón

6.1.2 Curva de calibración

Represente en un gráfico la concentración real de los patrones frente a los valores reportados por el equipo. Compruebe cada curva periódicamente para asegurar su reproductibilidad.

6.2. Pre- Tratamiento de las muestras

Dado que el método se requiere una solución adsorbedora para la retención del fenol en el medio acuoso, es necesario realizar el pre-tratamiento que se describe a continuación:

6.2.1 Pre-Tratamiento de las muestras de aire: con base en las recomendaciones del método 5530 de los Métodos Normalizados para el Análisis de aguas potables y residuales¹⁵, la muestra debe acondicionarse a temperatura ambiente, ajustar el pH a 4.00 ± 0.1 con hidróxido de sodio para luego destilarla con el fin de eliminar impurezas que interfieran en el análisis. El montaje de destilación se describe en la Figura 2.

¹² AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y aguas residuales p. 5-57

¹³ Ibid, p. 5-63

¹⁴ Ibid

¹⁵ Ibid

Figura 2. Montaje de destilación



Fuente: los autores, 2009

Vierta la solución a tratar en el balón de 250 ml, agregue 5 ml de agua desionizada al balón y una las conexiones del montaje de destilación (balón, tubo de vidrio y condensador), se recomienda envolver los tapones de caucho en teflón debido a que se analizan compuestos orgánicos, al ser inerte el teflón frente a los compuestos orgánicos, se evita las interferencias por este aspecto.

6.3 Procedimiento de análisis de la muestra tratadas

Trátase la muestra, el blanco (agua desionizada) y los patrones como se describe en la Tabla 2

Tabla 2. Preparación de las muestras para el análisis de fenol

Muestra	Valor en blanco
1 ml R1 unas cuantas partículas de R2, hasta que la solución sea incolora 20 ml de la muestra a analizar (<i>el valor del pH de la muestra debe ser pH 7</i>), mezclar 1 ml R3, mezclar	1 ml R1 unas cuantas partículas de R2, hasta que la solución sea incolora 20 ml de agua destilada, mezclar 1 ml R3, mezclar

Fuente: Método 1-75 Determinación de fenol por el fotómetro Nanocolor

- Seleccione en el fotómetro Nanocolor® (ver Imagen 5) el método 175, el equipo preguntará si acepta el conteo de los 5 minutos de reacción, oprima OK; el equipo activa una alarma al terminar el tiempo de reacción.
- Verter la solución del blanco en la celda de 5 cm, ubicarla en el espacio lector del equipo y oprimir Z, el equipo indicará que puede leer sus muestras.

- Verter la solución de la muestra a leer en la celda de 5 cm, o presione OK, registre el valor reportado por el equipo; en caso de ser reportar que sea mayor a 1 mg/L, cambie la solución a la celda de 10 mm y lea nuevamente en el equipo.

Imagen 5. Equipo Nanocolor



Fuente: los autores, 2009

7. CÁLCULOS

La concentración determinada por el método es proporcional al volumen de aire que pasó a través del burbujeador durante el periodo de monitoreo¹⁶; por tanto, a partir de los resultados de concentración en las muestras de solución absorbadora, calcule la concentración en el volumen de aire que pasó a través del burbujeador durante el tiempo total de monitoreo.

El volumen de aire muestreado es llevado a condiciones estándar (25 °C y 760 mm Hg). La desviación normal de estas condiciones adiciona solamente pequeñas correcciones.

¹⁶ NIOSH. Pag 121

ANEXO D. MÉTODO 1-75, DETERMINACIÓN DE FENOLES

Art. N° 918 75

es

Test 1-75 09.08

NANOCOLOR® Fenol

Método:

Determinación fotométrica con 4-nitroanilina diazotada

Cubeta rectangular:	50 mm	20 mm	10 mm
Rango (mg/l Fenol):	0,01-1,00	0,05-3,50	0,1-7,0
Factor:	00.85	02.10	004.2
Longitud de onda (HW = 5-12 nm):	470 nm		
Tiempo de reacción:	5 min (300 s)		
Temperatura de reacción:	20-25 °C		

Contenido del kit de reactivos:

2 x 100 ml Fenol R1	22 g Fenol R2
2 x 100 ml Fenol R3	1 cuchara medidora de 85 mm

Precauciones de seguridad:

Este kit de reactivos no contiene ninguna cantidad de sustancia peligrosa de obligada señalización.

Interferencias:

Aparte del fenol, se determinan también la mayoría de los otros derivados fenólicos (a veces con coloraciones distintas). El 4-nitrofenol no se registra. Con aguas fuertemente contaminadas, los fenoles deben ser separados antes mediante destilación al vapor.

El método puede ser aplicado también para el análisis de agua de mar, tras dilución (1+9).

Procedimiento:

Accesorios requeridos: matraces graduados de 25 ml, pipeta de émbolo con puntas

Verter en dos matraces graduados de 25 ml distintos:

Muestra	Valor en blanco
1 ml R1 unas cuantas partículas de R2, hasta que la solución sea incolora 20 ml de la muestra a analizar (<i>el valor del pH de la muestra debe ser pH 7</i>), mezclar 1 ml R3, mezclar	1 ml R1 unas cuantas partículas de R2, hasta que la solución sea incolora 20 ml de agua destilada, mezclar 1 ml R3, mezclar

Ajustar el volumen de los dos matraces a 25 ml con agua destilada y mezclar nuevamente. Después de 5 min verter en cubetas y medir.

Medición:

Para fotómetros **NANOCOLOR®** consulte el manual, test 1-75.

Medición cuando las muestras son coloreadas o turbias:

Para todos los fotómetros **NANOCOLOR®** consulte el manual, capítulo 5.11., utilice la tecla de corrección.

Fotómetros de otros fabricantes:

Comprobar el factor para cada tipo de aparato mediante medición de los estándares.

Reducción del volumen de la preparación analítica:

Para aumentar el número de determinaciones, se puede trabajar con matraces graduados de 10 ml: 0,4 ml de R1 + unas partículas de R2 + 8 ml de muestra + 0,4 ml de R3, cubeta semimicro (Art. N° 919 50).

Eliminación:

El contenido de las cubetas y los matraces puede ser vertido al desagüe con agua abundante

ANEXO E. ESTANDARIZACIÓN DEL MÉTODO ANALÍTICO

La estandarización de un método analítico es un proceso riguroso que dependiendo de la técnica analítica a la que pertenezca el método, la matriz, el analito, la cantidad de parámetros de estandarización, y de la logística empleada para su desarrollo, puede requerir de un tiempo más o menos considerable¹. Es por esto, que en este anexo se presentan los parámetros más importantes que se definieron durante el montaje de la técnica, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos en el proyecto y la reproductibilidad de la misma en otras investigaciones, que incluso, puedan retroalimentar este método.

Los parámetros que sirven como criterios de confianza de un método analítico, se desarrollan a continuación:

a. CURVA DE CALIBRACIÓN:

Se prepararon 5 patrones de fenol en agua desionizada, los cuales se sometieron al procedimiento de análisis con fenoles (Método 1-75 Nanocolor). De acuerdo a las recomendaciones del método SM-3330, los patrones preparados fueron analizados máximo dentro de las 2 horas siguientes a su preparación. Se obtuvo un coeficiente de correlación $r = 0.9999$, el cual permite aceptar las lecturas de los análisis hechos con este método.

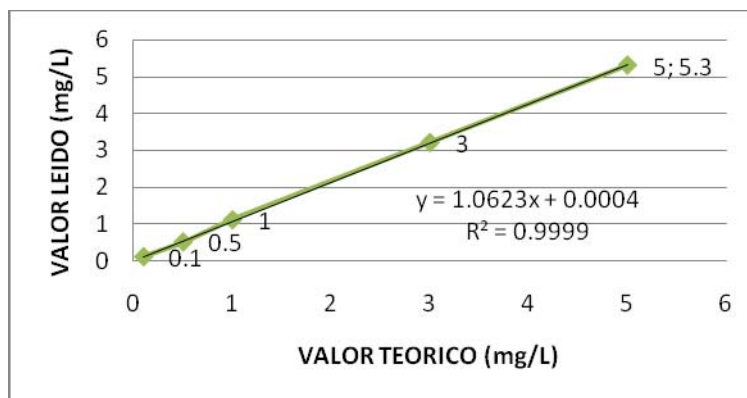
Tabla 1. Patrones leídos en el equipo

X	Y
VALOR TEORICO (mg/L)	VALOR LEIDO (mg/L)
0,1	0,1
0,5	0,5
1	1,1
3	3,2
5	5,3

Fuente: los autores, 2009

¹ IDEAM. Protocolo de estandarización de métodos analíticos. Bogotá: Ideam, 1999. 10 p.

Gráfica 1. Curva de calibración del método



Fuente: los autores, 2009

b. LINEALIDAD DEL MÉTODO:

El método de determinación de fenoles con el Kit 1-75 de NANOCOLOR®, es un método certificado y por tanto, recomienda que se usen 3 celdas de diferente tamaño (para el paso del rayo de lectura) según el rango de la concentración de fenol, con el fin de garantizar su linealidad (ver

Tabla 2), parámetro comprobado en la elaboración de la curva de calibración.

Tabla 2. Linealidad del método

CELDA	RANGO
50 mm	0.01 – 1.00
20 mm	0.05 – 3.50
10 mm	0.10 – 7.00

Fuente: Método 1-75 NANOCOLOR®²

c. LÍMITE DE DETECCIÓN DEL MÉTODO (LDM):

Como se mencionó anteriormente, al ser un método certificado, Kit de análisis especifica el LDM como 0.01 mg/L de Fenol, leído en la celda de cuarzo de 50mm de cada una de las celdas.

d. LÍMITE DE DETECCIÓN INSTRUMENTAL (LDI):

² Disponible en: <http://www.mn-Net.com/StartpageWaterAnalysisTesting/NANOCOLOR/Standardtests/Standardtestphenol/tabid/4746/language/en-US/Default.aspx>, [Citado Febrero 2009]

Debido a que por el uso del equipo por parte de diferentes usuarios en el laboratorio, diferentes muestras y métodos de análisis, calibraciones y mantenimientos hechos al equipo, es conveniente determinar si LDI corresponde al mismo LDM o es mayor a este, aspecto vital a considerar para los resultados de los monitoreos realizados. Para esto se prepararon 6 patrones en el que se incluyó el LDM, y se leyeron con la celda de cuarzo de 50 mm. Los resultados se presentan en la Tabla 3

Tabla 3. Patrones preparados para determinar el LDI

Patrón (mg/L)	Lectura Equipo
0.05	0.05
0.04	0.04
0.03	0.03
0.02	0.02
0.01	0.01
0.009	<<0.01

Fuente: los autores, 2009

A partir de la Tabla 3, puede concluirse que el LDI= 0.01, es decir que corresponde al mismo LDM, por lo que las lecturas de muestras analizadas por este método y con el equipo con el que cuenta el laboratorio, son confiables.

e. SENSIBILIDAD:

Para determinar la sensibilidad del método, se presentan a continuación ecuaciones de cuatro curvas de calibración elaboradas durante el trabajo en el laboratorio (Tabla 4), las cuales corresponden a los análisis de las muestras de aire, patrones para la validación del método de extracción de las espumas y determinación del LDI. A partir de estas, se promedia las pendientes y se reporta así junto con la desviación estándar.

Tabla 4. Curvas de calibración elaboradas durante el proyecto

Análisis de muestras 1		Análisis de muestras 2		Validación espumas		LDI	
VALOR TEORICO (mg/L)	VALOR LEIDO (mg/L)	VALOR TEORICO (mg/L)	VALOR LEIDO (mg/L)	VALOR TEORICO (mg/L)	VALOR LEIDO (mg/L)	VALOR TEORICO (mg/L)	VALOR LEIDO (mg/L)
0,1	0,1	0,05	0,05	4	4,2	0,05	0,05
0,5	0,5	0,5	0,5	4,5	4,6	0,04	0,04
1	1,1	1,5	1,5	6,5	6,5	0,03	0,03
3	3,2	3	3,2	7	7	0,02	0,02
5	5,3	6	6,4	---	---	0,01	0,01
---	---	---	---	---	---	0,009*	<<0.01*
----	Sin valor	* Valores descartados					

Fuente: los autores, 2009

Tabla 5. Datos para la determinación de la sensibilidad del método

Ecuaciones de la Curva de calibración	Pendiente	Desviación estándar
$Y = 1.0623x + 0.004$	1.0623	0.45
$Y = 1.0725x - 0.0403$	1.0725	
$Y = 0.9385x + 0.4135$	0.9385	
$Y = x$	1	
Promedio:	1.268325	

Fuente: los autores, 2009

A partir de los datos analizados en la

Tabla 5, puede determinarse que la sensibilidad del método está dada por una pendiente igual a $m=1.268325$ con $\sigma=0.45$

f. PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN:

Se determinaron dos porcentajes de recuperación: un %R con el fin de validar el método propuesto para el pre-tratamiento de las muestras de aire y lodos; y el segundo %R para la validación del método de extracción de fenoles en las espumas.

- **%R para la validación del pre-tratamiento de las muestras:** inicialmente se preparó un patrón de 5 mg/L, el cual se analizó con el Kit de Nanocolor, luego de ajustar el valor con la curva de calibración se calculó la masa contenida en 30 ml de solución, los cuales fueron sometidos al proceso de destilación, para determinar nuevamente la concentración del volumen destilado y posteriormente estimar el %R. los resultados se presentan en la Tabla 6

Tabla 6. Determinación del %R del pre-tratamiento de las muestras

Volumen de patrón:	30 ml	Volumen de destilación:	30 ml
Concentración:	5.27 mg/L	Concentración:	5.18 mg/L
Masa Agregada:	0,1581 mg	Masa recuperada:	0,1554 mg
%R=		98,29%	

Fuente: los autores, 2009

- **%R para la validación del método de extracción del fenol de las espumas:** se prepararon 3 patrones de fenol, los cuales se analizaron con el Kit de Nanocolor, luego de ajustar el valor con la curva de calibración se agregó el volumen señalado a unas espumas de poliuretano de la misma forma de las que contiene el reactor como medio de soporte, se calculó la masa contenida en el volumen agregado a cada espuma y luego se sometió al procedimiento descrito en el pre-tratamiento de las espumas. La solución de lavado de las espumas se sometió al proceso de destilación para finalmente determinar las concentraciones de las muestras destiladas. Los resultados se presentan en la Tabla 7

Tabla 7. Resultados método de validación de espumas

Espuma 1	<i>Volumen agregado a la espuma:</i>	10 ml	<i>Volumen de destilación:</i>	30 ml
	<i>Concentración:</i>	20 mg/L	<i>Concentración:</i>	5.9 mg/L
	<i>Masa Agregada:</i>	0,2	<i>Masa recuperada:</i>	0,177
	%R= 88,50%			
Espuma 2	<i>Volumen agregado a la espuma:</i>	8.25 ml	<i>Volumen de destilación:</i>	30 ml
	<i>Concentración:</i>	20 mg/L	<i>Concentración:</i>	4 mg/L
	<i>Masa Agregada:</i>	0,16	<i>Masa recuperada:</i>	0,12
	%R= 75,00%			
Espuma 3	<i>Volumen agregado a la espuma:</i>	5 ml	<i>Volumen de destilación:</i>	30 ml
	<i>Concentración:</i>	20 mg/L	<i>Concentración:</i>	2.7 mg/L
	<i>Masa Agregada:</i>	0,1	<i>Masa recuperada:</i>	0,081
	%R= 81,00%			

Fuente: los autores, 2009

g. Blanco (BK): Se prepararon tres blancos durante los análisis realizados en el proyecto:

- **Blanco de Lectura:** es la solución preparada con agua desionizada y los reactivos del método, la cual se emplea como lectura base en el equipo para el análisis de todas las muestras, ésta se preparaba diariamente junto con las muestras a analizar, pues el equipo exige la lectura del mismo antes de la lectura de las muestras.

- **Blanco de Transporte:** en un envase de vidrio similar a los que se usaron para el almacenamiento y transporte de las muestras, se agregó 30 ml de la misma solución adsorbadora empleada en los monitoreos análisis, y se preservó y transportó en las mismas condiciones de las muestras tomadas en campo. La lectura de esta muestra reportó una concentración <0.01 , por lo cual se concluye que las condiciones de manejo de las muestras no alteran la concentración real de las mismas.
- **Blanco de ambiente:** se seleccionó la entrada al edificio principal de la sede la floresta para tomar una muestra de aire ambiente considerándolo una zona retirada de la planta de tratamiento, esto con el fin de determinar si el ambiente aporta analitos que alteren o interfieran en las concentraciones reportadas en el monitoreo, los resultados se presentan en la Tabla 8 , y permiten concluir que, aunque hay una concentración de $0.165 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el ambiente, no es una concentración representativa que aporte fenol a las muestras del aire tomadas en la planta, considerando que las muestras se toman directamente de la tubería salida del biogás del reactor, y el tiempo que se expone al ambiente, no supera los 20 segundos, tiempo en el cual se vierte el contenido en el envase de transporte, se enjuaga el impinger con la solución adsorbadora y se preserva.

Tabla 8. Monitoreo para el análisis del blanco de ambiente

Fecha:	Miércoles, 10 de Junio de 2009		
Caudal de la bomba: 28 L/min			
Hora	13:00	Masa de fenol (mg)	0,00028
Tº Ambiente (°C)	17,5	Tiempo muestreo (min)	60
Concentración Leída (mg/L)	0,02	Volumen de aire (L)	1680
Concentración real (mg/L)	0,018	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	0,1647369
Volumen Destilado (L)	0,015	Carga (µg/min)	0,0046

Fuente: los autores, 2009

h. *Precisión:* indica el grado de concordancia entre los resultados obtenidos para réplicas de una misma muestra, aplicando el mismo procedimiento experimental bajo condiciones prefijadas. Usualmente se expresa en términos de la *Desviación Estándar*, *Desviación estándar relativa* o *Coeficiente De Variación (CV)*.

- **Desviación estándar (σ):** permite establecer los intervalos alrededor del promedio en los cuales se encuentran los valores de una población en

términos de probabilidad. El 68% del área bajo la curva corresponde a una desviación estándar ($\pm 1\sigma$); el 95% a ($\pm 2\sigma$) y el 99,7% a ($\pm 3\sigma$)

para una serie de pocos datos
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

- Coeficiente de variación(CV): es un indicador de precisión de los resultados obtenidos en una determinación. Se define en función de la desviación estándar y el promedio así:


$$CV = \frac{s * 100}{\bar{x}}$$

ANEXO F. PROTOCOLO DE MANEJO DEL EQUIPO NANOCOLOR 400D


Con las muestras listas para leer, luego del respectivo procedimiento de adición de reactivos siga el procedimiento que se describe a continuación:

1. Encienda el equipo, en la pantalla indicará que hará una autocalibración



2. Identifique el numero del método a analizar, éste se encuentra en el sticker ubicado en la parte frontal del kit de análisis (por ejemplo: Kit de Fenoles N° 1-75)

3. El equipo le solicitará que marque el número del método y presione 

Method: .
>> Cuvette >>


4. Presione  si la primera opción de rango de medición que aparece en la pantalla no es la que usted necesita

1671 NITRITE
0.002 - .3mg / l NO₂N


5. Aparecerá en la pantalla el tiempo de reacción para el método, éste inicia al presionar el botón , si usted desea saltar este paso y seguir con la medición oprima el botón 

1672 NITRITE
react. time 10'00

6. Verifique la celda que debe emplear para el rango de medición (para los rangos menores use la celda de 50mm)

7. Ubique en el fotómetro la celda con la solución que será el blanco del método y presione el botón 

1672 NITRITE
measure blank->Z

8. Retire la celda y ubique ahora la celda que contiene la muestra a leer, presione el botón 

1672 NITRITE
measure sample->M

Si el equipo reporta que está por fuera del rango de medición, vierta el blanco y la solución a analizar en la celda de 10 mm y repita este paso

1672 NITRITE
01 >0.25mg / l NO₂

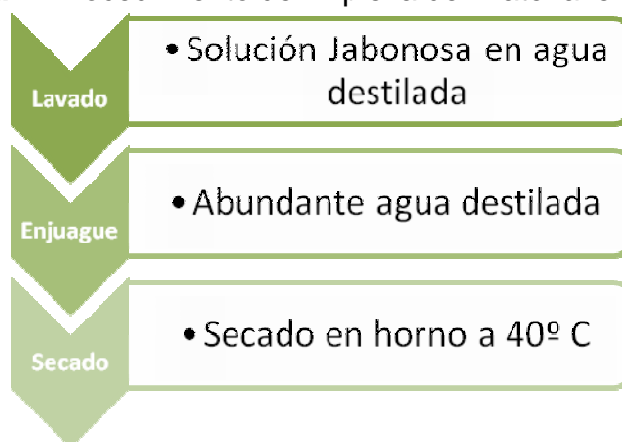
ANEXO G. PROTOCOLO DE LIMPIEZA DE MATERIAL

La limpieza correcta del material empleado tanto en los procedimientos de muestreo como los de análisis de laboratorio reviste una gran importancia debido a la participación que tiene éste en el control de calidad de las muestras para la eliminación de las posibles interferencias.

Antes de usar cualquier material es necesario asegurarse de que éste se encuentra limpio, por ello como medida de control, *todo material empleado durante muestreo y análisis en laboratorio debía lavarse antes y después de su utilización.* (ver Figura 1)

1. Lave el material con una solución jabonosa preparada en agua destilada
2. Enjuague el material con abundante agua destilada.
3. Escurra y seque el material en horno a 40° C.

Figura 1. Procedimiento de limpieza del material empleado



Fuente: los autores, 2009.

Todo material lavado debe secarse en horno a 40° C, este procedimiento facilita la volatilización de sustancias orgánicas que pudieran estar en el material, además de prevenir una contaminación del mismo durante la fase de secado.

ANEXO H. RESULTADOS DE CARACTERIZACIONES DE AIRE Y GRÁFICAS DE RESULTADOS

FECHA: Lunes, 02 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m³)	Carga (µg/min)
08:00	8.8	0.06	0.056	0.025	0.00140	40	1120	1.252336574	0.0351
09:00	10.0	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
10:00	12.0	0.20	0.188	0.028	0.00526	40	1120	4.6974	0.1315
11:00	12.8	0.20	0.188	0.030	0.00564	35	980	5.7519	0.1611
12:00	16.0	0.30	0.282	0.030	0.00846	40	1120	7.5544	0.2115
13:00	18.0	0.30	0.282	0.030	0.00846	40	1120	7.5544	0.2115
14:00	17.7	0.35	0.329	0.025	0.00823	40	1120	7.3459	0.2057
15:00	17.0	0.30	0.282	0.020	0.00564	60	1680	3.3575	0.0940
16:00	15.0	0.25	0.235	0.025	0.00587	35	980	5.9939	0.1678
17:00	15.0	0.20	0.188	0.025	0.00470	40	1120	4.1941	0.1174
18:00	14.6	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
19:00	14.3	0.20	0.188	0.025	0.00470	40	1120	4.1941	0.1174
20:00	14.0	0.20	0.188	0.020	0.00376	35	980	3.8346	0.1074
21:00	12.5	0.23	0.216	0.025	0.00540	60	1680	3.2163	0.0901
22:00	12.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
23:00	11.2	0.18	0.169	0.020	0.00338	40	1120	3.0191	0.0845
00:00	10.6	0.08	0.075	0.020	0.00150	35	980	1.5292	0.0428
01:00	10.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
02:00	9.6	0.09	0.084	0.020	0.00169	60	1680	1.0041	0.0281
03:00	7.2	0.08	0.075	0.025	0.00187	40	1120	1.6726	0.0468
04:00	7.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	60	1680	0.8920	0.0250
05:00	6.8	0.08	0.075	0.019	0.00142	40	1120	1.2712	0.0356
06:00	6.8	0.09	0.084	0.020	0.00169	60	1680	1.0041	0.0281
07:00	7.8	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375

Fecha: Miércoles, 04 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	10.2	0.08	0.075	0.025	0.00187	60	1680	1.115055831	0.0312
09:00	11.0	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
10:00	13.5	0.40	0.376	0.020	0.00752	40	1120	6.7172	0.1881
11:00	16.0	0.38	0.357	0.022	0.00786	40	1120	7.0191	0.1965
12:00	18.0	0.41	0.386	0.030	0.01157	40	1120	10.3280	0.2892
13:00	19.0	0.60	0.564	0.020	0.01129	40	1120	10.0792	0.2822
14:00	19.7	0.50	0.470	0.025	0.01176	40	1120	10.4978	0.2939
15:00	18.0	0.37	0.348	0.030	0.01044	35	980	10.6507	0.2982
16:00	16.3	0.46	0.433	0.025	0.01082	50	1400	7.7258	0.2163
17:00	14.9	0.40	0.376	0.020	0.00752	40	1120	6.7172	0.1881
18:00	14.9	0.52	0.489	0.020	0.00978	60	1680	5.8229	0.1630
19:00	14.6	0.40	0.376	0.020	0.00752	40	1120	6.7172	0.1881
20:00	14.0	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
21:00	12.7	0.21	0.197	0.020	0.00395	40	1120	3.5234	0.0987
22:00	11.0	0.21	0.197	0.022	0.00434	60	1680	2.5838	0.0723
23:00	10.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	35	980	2.8740	0.0805
00:00	9.5	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
01:00	9.5	0.10	0.094	0.025	0.00234	60	1680	1.3952	0.0391
02:00	8.8	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
03:00	8.0	0.08	0.075	0.025	0.00187	60	1680	1.1151	0.0312
04:00	7.6	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
05:00	7.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
06:00	7.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
07:00	9.6	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375

Fecha: Viernes, 06 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	12.0	0.08	0.075	0.025	0.00187	45	1260	1.48674111	0.0416
09:00	13.5	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
10:00	15.0	0.20	0.188	0.021	0.00395	50	1400	2.8184	0.0789
11:00	16.5	0.30	0.282	0.020	0.00564	40	1120	5.0362	0.1410
12:00	17.3	0.38	0.357	0.020	0.00715	40	1120	6.3810	0.1787
13:00	17.4	0.47	0.442	0.020	0.00884	60	1680	5.2626	0.1474
14:00	18.5	0.50	0.470	0.020	0.00941	40	1120	8.3982	0.2352
15:00	16.5	0.45	0.423	0.020	0.00846	40	1120	7.5577	0.2116
16:00	14.6	0.43	0.404	0.020	0.00809	60	1680	4.8144	0.1348
17:00	13.9	0.43	0.404	0.020	0.00809	40	1120	7.2215	0.2022
18:00	13.4	0.43	0.404	0.020	0.00809	40	1120	7.2215	0.2022
19:00	13.3	0.40	0.376	0.020	0.00752	50	1400	5.3738	0.1505
20:00	13.3	0.40	0.376	0.021	0.00790	40	1120	7.0531	0.1975
21:00	13.0	0.36	0.339	0.020	0.00677	60	1680	4.0299	0.1128
22:00	12.4	0.33	0.310	0.020	0.00621	40	1120	5.5405	0.1551
23:00	12.0	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
00:00	12.0	0.23	0.216	0.020	0.00432	40	1120	3.8596	0.1081
01:00	11.5	0.18	0.169	0.020	0.00338	50	1400	2.4152	0.0676
02:00	11.4	0.10	0.094	0.018	0.00169	35	980	1.7221	0.0482
03:00	11.1	0.10	0.094	0.020	0.00188	50	1400	1.3394	0.0375
04:00	10.8	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
05:00	10.6	0.10	0.094	0.020	0.00188	60	1680	1.1162	0.0313
06:00	10.6	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
07:00	11.4	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375

Fecha: Martes, 10 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	13.0	0.18	0.169	0.020	0.00338	60	1680	2.012703792	0.0564
09:00	13.4	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
10:00	13.7	0.10	0.094	0.020	0.00188	45	1260	1.4882	0.0417
11:00	13.9	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
12:00	14.0	0.20	0.188	0.025	0.00470	40	1120	4.1941	0.1174
13:00	14.2	0.10	0.094	0.025	0.00234	40	1120	2.0928	0.0586
14:00	14.2	0.20	0.188	0.020	0.00376	60	1680	2.2368	0.0626
15:00	14.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	35	980	2.8740	0.0805
16:00	13.8	0.10	0.094	0.030	0.00281	40	1120	2.5114	0.0703
17:00	13.6	0.10	0.094	0.025	0.00234	60	1680	1.3952	0.0391
18:00	13.5	0.10	0.094	0.025	0.00234	45	1260	1.8603	0.0521
19:00	13.5	0.10	0.094	0.025	0.00234	40	1120	2.0928	0.0586
20:00	12.9	0.10	0.094	0.023	0.00216	60	1680	1.2836	0.0359
21:00	12.4	0.08	0.075	0.020	0.00150	35	980	1.5292	0.0428
22:00	12.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	50	1400	1.0705	0.0300
23:00	12.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
00:00	12.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	50	1400	1.0705	0.0300
01:00	11.7	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
02:00	11.7	0.05	0.047	0.020	0.00093	50	1400	0.6670	0.0187
03:00	11.7	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
04:00	11.7	0.05	0.047	0.021	0.00098	40	1120	0.8755	0.0245
05:00	11.4	0.05	0.047	0.021	0.00098	40	1120	0.8755	0.0245
06:00	11.4	0.05	0.047	0.020	0.00093	50	1400	0.6670	0.0187
07:00	12.6	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233

Fecha: Jueves, 12 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	12.0	0.07	0.066	0.025	0.00164	60	1680	0.97497344	0.0273
09:00	13.6	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
10:00	14.0	0.15	0.141	0.021	0.00296	50	1400	2.1124	0.0591
11:00	16.5	0.21	0.197	0.020	0.00395	35	980	4.0267	0.1127
12:00	17.0	0.34	0.320	0.020	0.00639	60	1680	3.8058	0.1066
13:00	15.0	0.28	0.263	0.020	0.00526	35	980	5.3715	0.1504
14:00	15.0	0.30	0.282	0.020	0.00564	40	1120	5.0362	0.1410
15:00	14.6	0.28	0.263	0.020	0.00526	50	1400	3.7600	0.1053
16:00	14.2	0.23	0.216	0.020	0.00432	40	1120	3.8596	0.1081
17:00	14.2	0.23	0.216	0.020	0.00432	50	1400	3.0876	0.0865
18:00	14.0	0.12	0.113	0.020	0.00225	40	1120	2.0105	0.0563
19:00	13.8	0.18	0.169	0.020	0.00338	60	1680	2.0127	0.0564
20:00	13.3	0.10	0.094	0.021	0.00197	40	1120	1.7580	0.0492
21:00	13.0	0.10	0.094	0.020	0.00188	60	1680	1.1162	0.0313
22:00	12.7	0.10	0.094	0.020	0.00188	35	980	1.9134	0.0536
23:00	12.2	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
00:00	12.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
01:00	11.8	0.08	0.075	0.020	0.00150	60	1680	0.8920	0.0250
02:00	11.0	0.05	0.047	0.018	0.00084	40	1120	0.7504	0.0210
03:00	10.4	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
04:00	9.9	0.08	0.075	0.020	0.00150	60	1680	0.8920	0.0250
05:00	9.6	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
06:00	9.7	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
07:00	11.3	0.06	0.056	0.020	0.00112	40	1120	1.0019	0.0281

Fecha: Sábado, 14 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m³)	Carga (µg/min)
08:00	12.5	0.10	0.094	0.020	0.00188	60	1680	1.11617649	0.0313
09:00	14.0	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
10:00	15.3	0.23	0.216	0.020	0.00432	50	1400	3.0876	0.0865
11:00	18.0	0.37	0.348	0.020	0.00696	45	1260	5.5226	0.1546
12:00	20.0	0.40	0.376	0.025	0.00940	40	1120	8.3965	0.2351
13:00	20.2	0.40	0.376	0.025	0.00940	40	1120	8.3965	0.2351
14:00	19.7	0.47	0.442	0.025	0.01105	50	1400	7.8939	0.2210
15:00	18.0	0.33	0.310	0.025	0.00776	40	1120	6.9257	0.1939
16:00	17.6	0.30	0.282	0.025	0.00705	40	1120	6.2953	0.1763
17:00	16.0	0.31	0.291	0.025	0.00729	40	1120	6.5054	0.1822
18:00	15.3	0.28	0.263	0.021	0.00553	40	1120	4.9350	0.1382
19:00	14.4	0.35	0.329	0.020	0.00658	60	1680	3.9178	0.1097
20:00	13.0	0.20	0.188	0.023	0.00432	45	1260	3.4298	0.0960
21:00	12.7	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
22:00	11.6	0.20	0.188	0.020	0.00376	45	1260	2.9824	0.0835

Fecha: Lunes, 16 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	12.4	0.08	0.075	0.020	0.00150	60	1680	0.892044665	0.0250
09:00	13.0	0.10	0.094	0.020	0.00188	35	980	1.9134	0.0536
10:00	13.0	0.13	0.122	0.020	0.00244	40	1120	2.1786	0.0610
11:00	13.7	0.15	0.141	0.021	0.00296	45	1260	2.3471	0.0657
12:00	14.0	0.18	0.169	0.025	0.00423	40	1120	3.7738	0.1057
13:00	15.0	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
14:00	17.0	0.22	0.207	0.020	0.00413	40	1120	3.6915	0.1034
15:00	16.8	0.28	0.263	0.020	0.00526	60	1680	3.1334	0.0877
16:00	16.5	0.14	0.131	0.030	0.00394	45	1260	3.1289	0.0876
17:00	14.4	0.12	0.113	0.025	0.00281	35	980	2.8721	0.0804
18:00	13.9	0.20	0.188	0.020	0.00376	60	1680	2.2368	0.0626
19:00	13.9	0.11	0.103	0.024	0.00248	40	1120	2.2108	0.0619
20:00	13.5	0.10	0.094	0.025	0.00234	45	1260	1.8603	0.0521
21:00	13.0	0.11	0.103	0.020	0.00206	40	1120	1.8424	0.0516
22:00	12.4	0.11	0.103	0.020	0.00206	45	1260	1.6377	0.0459
23:00	12.0	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
00:00	11.5	0.11	0.103	0.020	0.00206	60	1680	1.2282	0.0344
01:00	11.5	0.10	0.094	0.020	0.00188	50	1400	1.3394	0.0375
02:00	11.1	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
03:00	10.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	60	1680	0.8920	0.0250
04:00	9.8	0.06	0.056	0.020	0.00112	40	1120	1.0019	0.0281
05:00	9.6	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
06:00	9.8	0.07	0.066	0.020	0.00131	60	1680	0.7800	0.0218
07:00	10.8	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233

Fecha: Miércoles, 18 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	12.5	0.13	0.122	0.020	0.00244	60	1680	1.45237423	0.0407
09:00	13.4	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
10:00	14.0	0.10	0.094	0.021	0.00197	45	1260	1.5626	0.0438
11:00	14.5	0.10	0.094	0.023	0.00211	40	1120	1.8835	0.0527
12:00	15.0	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
13:00	16.7	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
14:00	19.5	0.25	0.235	0.022	0.00517	40	1120	4.6153	0.1292
15:00	18.0	0.25	0.235	0.021	0.00493	40	1120	4.4055	0.1234
16:00	17.8	0.25	0.235	0.025	0.00587	45	1260	4.6619	0.1305
17:00	17.0	0.18	0.169	0.025	0.00423	40	1120	3.7738	0.1057
18:00	16.0	0.21	0.197	0.020	0.00395	60	1680	2.3489	0.0658
19:00	15.4	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
20:00	15.0	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
21:00	14.5	0.12	0.113	0.020	0.00225	60	1680	1.3403	0.0375
22:00	14.0	0.10	0.094	0.020	0.00188	45	1260	1.4882	0.0417

Fecha: Viernes, 20 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	12.6	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.67426474	0.0469
09:00	13.2	0.15	0.141	0.022	0.00310	40	1120	2.7662	0.0775
10:00	16.0	0.40	0.376	0.020	0.00752	60	1680	4.4782	0.1254
11:00	18.3	0.50	0.470	0.020	0.00941	40	1120	8.3982	0.2352
12:00	20.0	0.60	0.564	0.020	0.01129	45	1260	8.9593	0.2509
13:00	19.4	0.50	0.470	0.020	0.00941	40	1120	8.3982	0.2352
14:00	19.0	0.45	0.423	0.020	0.00846	40	1120	7.5577	0.2116
15:00	18.5	0.40	0.376	0.022	0.00828	40	1120	7.3890	0.2069
16:00	18.0	0.45	0.423	0.025	0.01058	60	1680	6.2981	0.1763
17:00	17.2	0.35	0.329	0.025	0.00823	40	1120	7.3459	0.2057
18:00	17.0	0.40	0.376	0.020	0.00752	40	1120	6.7172	0.1881
19:00	16.0	0.30	0.282	0.020	0.00564	40	1120	5.0362	0.1410
20:00	15.6	0.25	0.235	0.023	0.00540	40	1120	4.8251	0.1351
21:00	13.0	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
22:00	11.0	0.19	0.178	0.025	0.00446	40	1120	3.9839	0.1116

Fecha: Domingo, 22 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	11.8	0.10	0.094	0.025	0.00234	60	1680	1.395220613	0.0391
09:00	12.0	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
10:00	14.6	0.20	0.188	0.020	0.00376	60	1680	2.2368	0.0626
11:00	16.0	0.20	0.188	0.021	0.00395	40	1120	3.5230	0.0986
12:00	16.5	0.22	0.207	0.020	0.00413	40	1120	3.6915	0.1034
13:00	16.7	0.22	0.207	0.020	0.00413	40	1120	3.6915	0.1034
14:00	19.5	0.20	0.188	0.025	0.00470	40	1120	4.1941	0.1174
15:00	19.5	0.30	0.282	0.025	0.00705	60	1680	4.1969	0.1175
16:00	18.0	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
17:00	16.8	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
18:00	16.0	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
19:00	15.4	0.25	0.235	0.020	0.00470	60	1680	2.7972	0.0783
20:00	15.2	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
21:00	14.6	0.18	0.169	0.020	0.00338	60	1680	2.0127	0.0564
22:00	14.5	0.12	0.113	0.020	0.00225	40	1120	2.0105	0.0563

Fecha: Martes, 24 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	14.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	60	1680	1.676506054	0.0469
09:00	14.9	0.15	0.141	0.025	0.00352	50	1400	2.5148	0.0704
10:00	16.0	0.22	0.207	0.020	0.00413	40	1120	3.6915	0.1034
11:00	16.4	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
12:00	17.5	0.30	0.282	0.020	0.00564	40	1120	5.0362	0.1410
13:00	18.7	0.30	0.282	0.023	0.00649	40	1120	5.7917	0.1622
14:00	19.5	0.35	0.329	0.025	0.00823	45	1260	6.5297	0.1828
15:00	18.7	0.35	0.329	0.021	0.00691	40	1120	6.1706	0.1728
16:00	16.0	0.50	0.470	0.020	0.00941	60	1680	5.5988	0.1568
17:00	15.5	0.30	0.282	0.020	0.00564	35	980	5.7557	0.1612
18:00	14.5	0.30	0.282	0.020	0.00564	45	1260	4.4767	0.1253
19:00	14.0	0.20	0.188	0.025	0.00470	40	1120	4.1941	0.1174
20:00	14.0	0.18	0.169	0.025	0.00423	40	1120	3.7738	0.1057
21:00	13.7	0.22	0.207	0.025	0.00517	60	1680	3.0762	0.0861
22:00	13.5	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
23:00	13.0	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
00:00	13.0	0.21	0.197	0.025	0.00493	60	1680	2.9361	0.0822
01:00	12.5	0.10	0.094	0.025	0.00234	40	1120	2.0928	0.0586
02:00	12.0	0.11	0.103	0.020	0.00206	35	980	2.1056	0.0590
03:00	11.7	0.10	0.094	0.020	0.00188	60	1680	1.1162	0.0313
04:00	11.0	0.05	0.047	0.021	0.00098	40	1120	0.8755	0.0245
05:00	10.8	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
06:00	11.0	0.05	0.047	0.020	0.00093	40	1120	0.8338	0.0233
07:00	12.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375

Fecha: Jueves, 26 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	12.5	0.15	0.141	0.020	0.00282	60	1680	1.676506054	0.0469
09:00	13.0	0.12	0.113	0.020	0.00225	40	1120	2.0105	0.0563
10:00	13.3	0.15	0.141	0.022	0.00310	60	1680	1.8442	0.0516
11:00	13.5	0.13	0.122	0.025	0.00305	40	1120	2.7232	0.0762
12:00	13.5	0.15	0.141	0.025	0.00352	35	980	3.5925	0.1006
13:00	14.6	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
14:00	18.5	0.18	0.169	0.025	0.00423	40	1120	3.7738	0.1057
15:00	18.2	0.22	0.207	0.020	0.00413	40	1120	3.6915	0.1034
16:00	17.5	0.20	0.188	0.025	0.00470	40	1120	4.1941	0.1174
17:00	17.0	0.28	0.263	0.020	0.00526	60	1680	3.1334	0.0877
18:00	15.0	0.15	0.141	0.022	0.00310	35	980	3.1614	0.0885
19:00	14.2	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
20:00	14.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	60	1680	1.6765	0.0469
21:00	13.7	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
22:00	13.5	0.13	0.122	0.020	0.00244	60	1680	1.4524	0.0407

Fecha: Sábado, 28 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	T° Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	12.5	0.10	0.094	0.020	0.00188	60	1680	1.11617649	0.0313
09:00	14.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
10:00	15.6	0.25	0.235	0.020	0.00470	45	1260	3.7296	0.1044
11:00	17.0	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
12:00	18.0	0.25	0.235	0.020	0.00470	45	1260	3.7296	0.1044
13:00	18.7	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
14:00	19.5	0.28	0.263	0.025	0.00658	45	1260	5.2223	0.1462
15:00	19.5	0.25	0.235	0.025	0.00587	40	1120	5.2447	0.1469
16:00	18.8	0.30	0.282	0.025	0.00705	50	1400	5.0362	0.1410
17:00	18.0	0.25	0.235	0.025	0.00587	40	1120	5.2447	0.1469
18:00	15.6	0.25	0.235	0.020	0.00470	40	1120	4.1957	0.1175
19:00	14.0	0.30	0.282	0.020	0.00564	60	1680	3.3575	0.0940
20:00	13.7	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
21:00	13.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
22:00	12.5	0.20	0.188	0.020	0.00376	60	1680	2.2368	0.0626

Fecha: Lunes, 30 de Marzo de 2009

Caudal de la bomba: 28 L/min

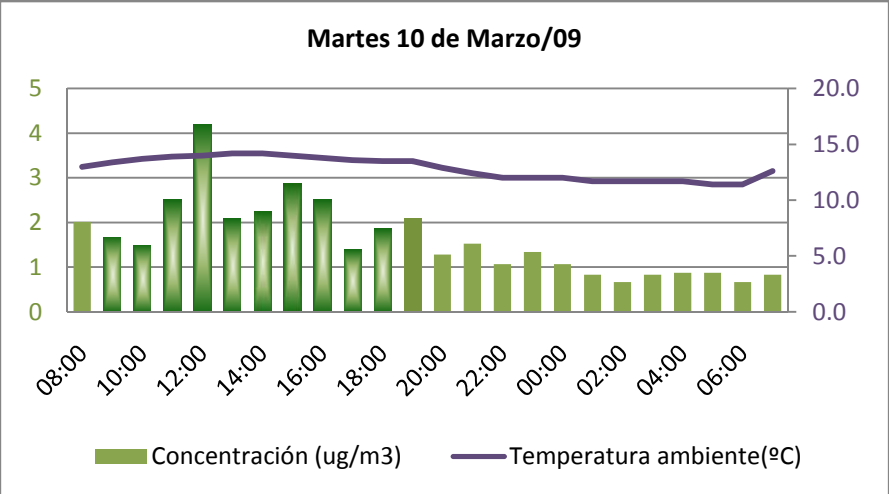
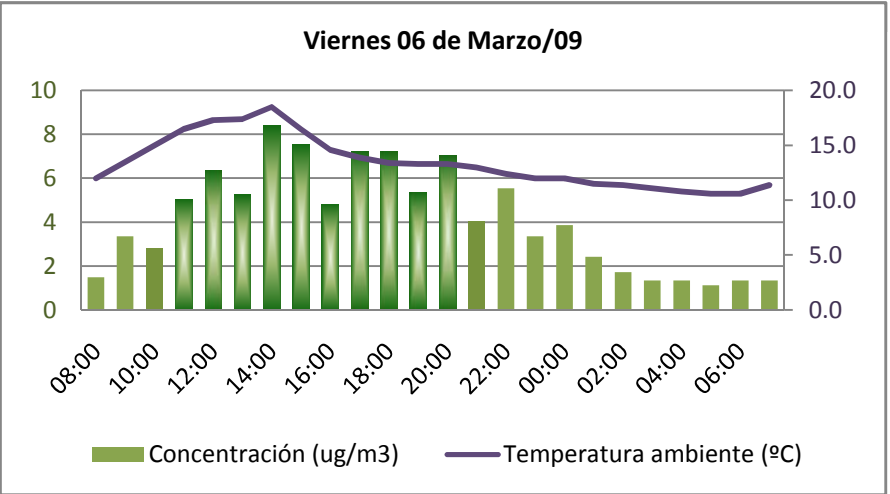
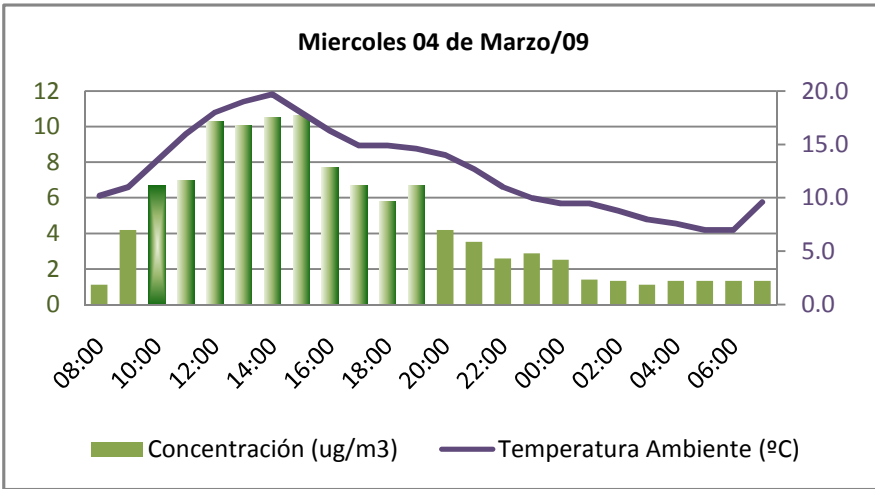
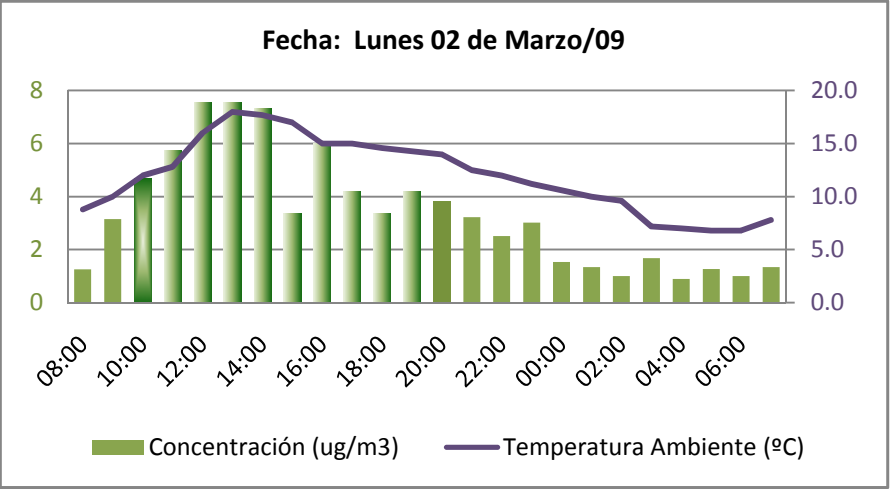
Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	10.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	60	1680	0.89204466	0.0250
09:00	12.3	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
10:00	14.0	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
11:00	16.5	0.20	0.188	0.025	0.00470	45	1260	3.7281	0.1044
12:00	18.0	0.21	0.197	0.030	0.00592	40	1120	5.2850	0.1480
13:00	19.8	0.34	0.320	0.020	0.00639	40	1120	5.7086	0.1598
14:00	20.7	0.48	0.451	0.022	0.00993	60	1680	5.9121	0.1655
15:00	18.5	0.40	0.376	0.020	0.00752	40	1120	6.7172	0.1881
16:00	17.0	0.28	0.263	0.025	0.00658	45	1260	5.2223	0.1462
17:00	15.4	0.21	0.197	0.030	0.00592	40	1120	5.2850	0.1480
18:00	14.0	0.24	0.226	0.020	0.00451	40	1120	4.0276	0.1128
19:00	13.5	0.20	0.188	0.023	0.00432	60	1680	2.5724	0.0720
20:00	12.8	0.15	0.141	0.025	0.00352	40	1120	3.1434	0.0880
21:00	11.5	0.15	0.141	0.021	0.00296	40	1120	2.6405	0.0739
22:00	10.7	0.18	0.169	0.020	0.00338	60	1680	2.0127	0.0564
23:00	10.7	0.10	0.094	0.020	0.00188	40	1120	1.6743	0.0469
00:00	10.0	0.11	0.103	0.020	0.00206	40	1120	1.8424	0.0516
01:00	9.5	0.11	0.103	0.021	0.00217	60	1680	1.2897	0.0361
02:00	8.0	0.06	0.056	0.020	0.00112	40	1120	1.0019	0.0281
03:00	7.5	0.09	0.084	0.020	0.00169	60	1680	1.0041	0.0281
04:00	7.5	0.06	0.056	0.020	0.00112	40	1120	1.0019	0.0281
05:00	7.0	0.06	0.056	0.020	0.00112	45	1260	0.8906	0.0249
06:00	8.0	0.06	0.056	0.020	0.00112	40	1120	1.0019	0.0281
07:00	9.5	0.10	0.094	0.020	0.00188	60	1680	1.1162	0.0313

Fecha: Miércoles, 01 de Abril de 2009

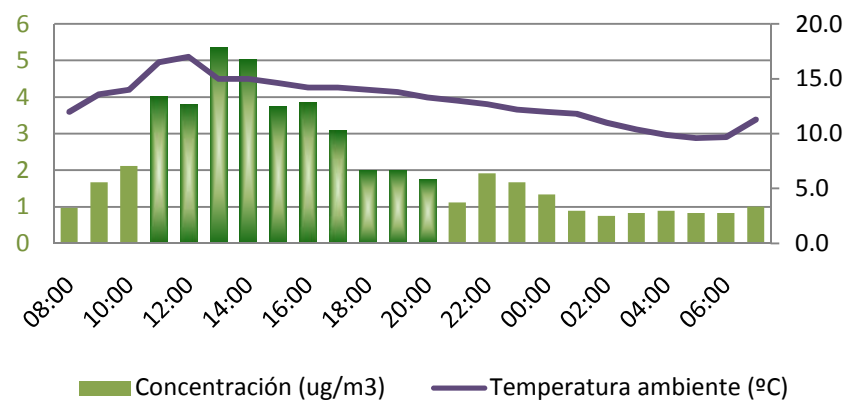
Caudal de la bomba: 28 L/min

Hora	Tº Ambiente (°C)	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Tiempo muestreo (min)	Volumen de aire (L)	Concentración de fenol en aire (µg/m3)	Carga (µg/min)
08:00	11.0	0.10	0.094	0.020	0.00188	60	1680	1.11617649	0.0313
09:00	13.5	0.20	0.188	0.020	0.00376	40	1120	3.3553	0.0939
10:00	14.0	0.20	0.188	0.020	0.00376	45	1260	2.9824	0.0835
11:00	15.5	0.22	0.207	0.025	0.00517	40	1120	4.6143	0.1292
12:00	17.0	0.25	0.235	0.025	0.00587	60	1680	3.4965	0.0979
13:00	17.4	0.25	0.235	0.025	0.00587	40	1120	5.2447	0.1469
14:00	18.5	0.32	0.301	0.025	0.00752	40	1120	6.7155	0.1880
15:00	18.0	0.45	0.423	0.025	0.01058	60	1680	6.2981	0.1763
16:00	17.6	0.27	0.254	0.025	0.00634	40	1120	5.6649	0.1586
17:00	16.0	0.23	0.216	0.025	0.00540	45	1260	4.2884	0.1201
18:00	14.2	0.20	0.188	0.025	0.00470	40	1120	4.1941	0.1174
19:00	13.3	0.25	0.235	0.025	0.00587	60	1680	3.4965	0.0979
20:00	13.0	0.18	0.169	0.020	0.00338	40	1120	3.0191	0.0845
21:00	13.0	0.20	0.188	0.025	0.00470	50	1400	3.3553	0.0939
22:00	12.6	0.15	0.141	0.020	0.00282	40	1120	2.5148	0.0704
23:00	12.0	0.15	0.141	0.020	0.00282	60	1680	1.6765	0.0469
00:00	11.5	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
01:00	11.5	0.12	0.113	0.020	0.00225	60	1680	1.3403	0.0375
02:00	11.0	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
03:00	10.8	0.08	0.075	0.020	0.00150	40	1120	1.3381	0.0375
04:00	10.7	0.12	0.113	0.020	0.00225	60	1680	1.3403	0.0375
05:00	10.7	0.07	0.066	0.020	0.00131	40	1120	1.1700	0.0328
06:00	10.6	0.07	0.066	0.020	0.00131	40	1120	1.1700	0.0328
07:00	11.4	0.09	0.084	0.020	0.00169	50	1400	1.2049	0.0337

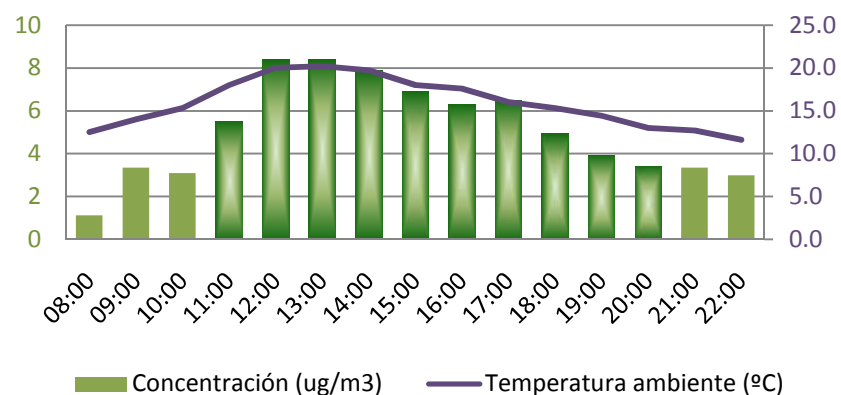
GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE FENOL EN LOS DÍAS DE MONITOREO



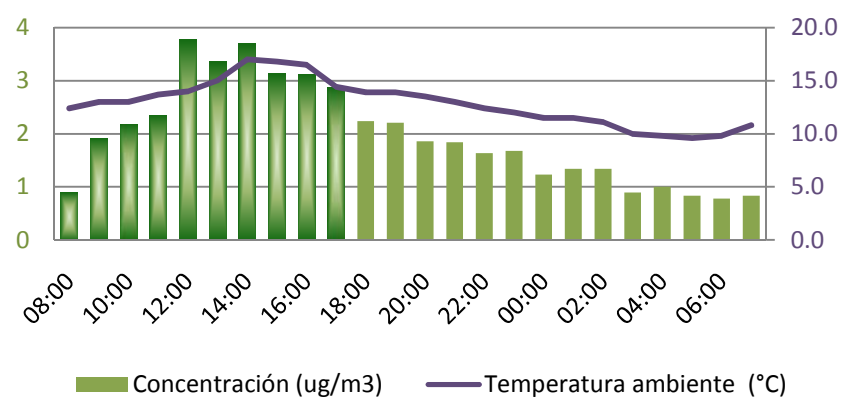
Jueves 12 de Marzo/09



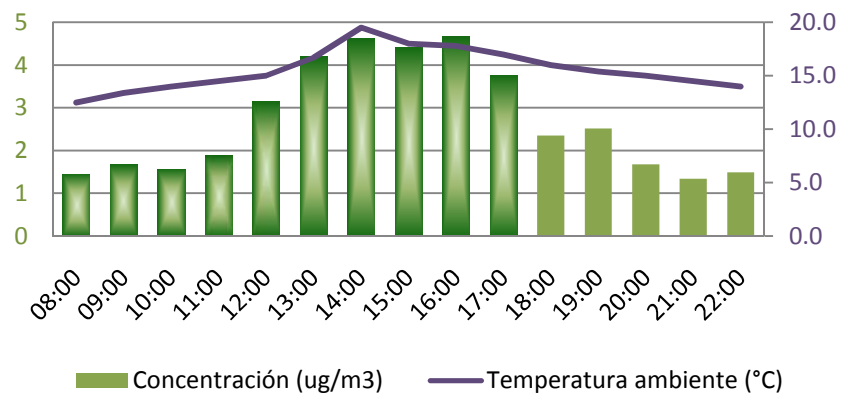
Sábado 14 de Marzo/09



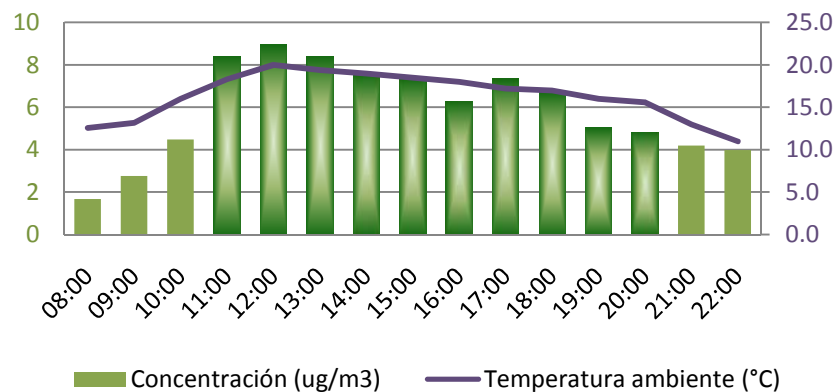
Lunes 16 de Marzo/09



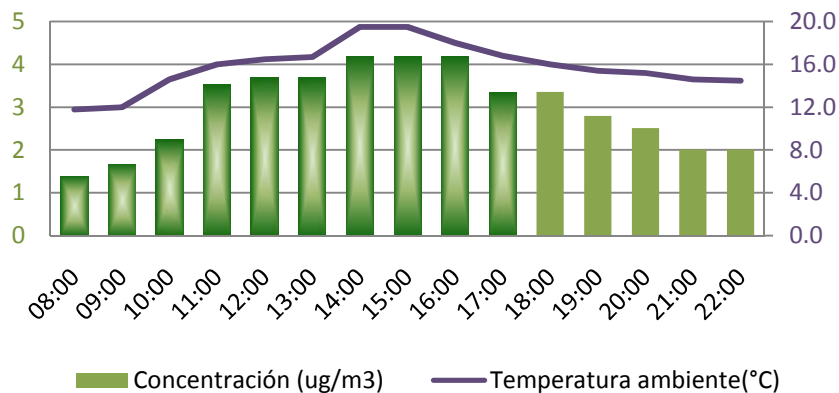
Miercoles 18 de Marzo/09



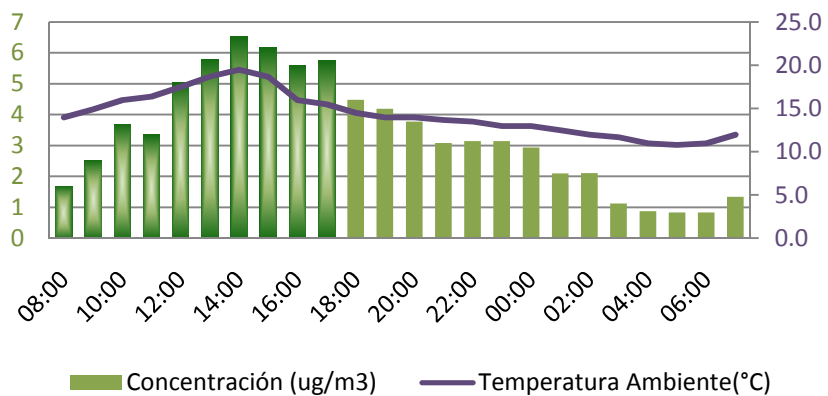
Viernes 20 de Marzo/09



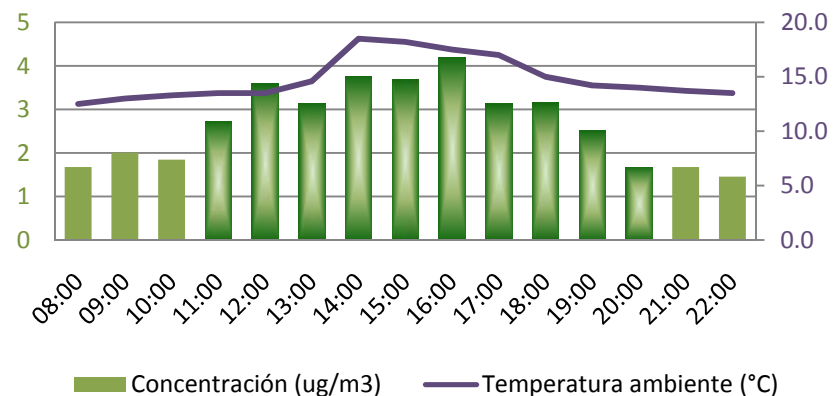
Domingo 22 de Marzo/09



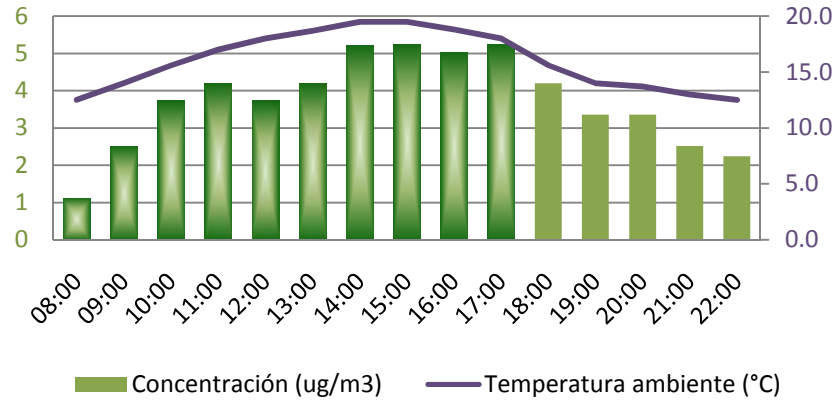
Martes 24 de Marzo/09



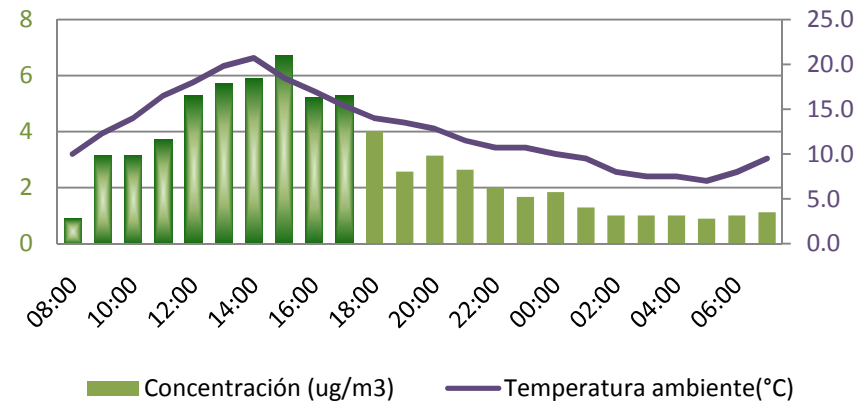
Jueves 26 de Marzo/09



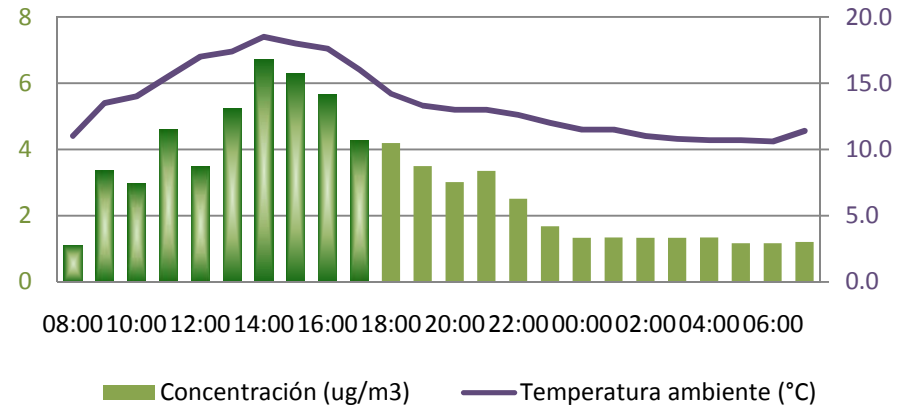
Sabado 28 de Marzo/09



Lunes 30 de Marzo/09



Miercoles 01 de Abril/09



ANEXO I. CONSOLIDADO CARACTERIZACIONES DE AGUA

FECHA:	02/03/2009		04/03/2009		06/03/2009		10/03/2009		12/03/2009	
Hora:	10:00	20:07	10:00	20:07	11:00	21:07	09:00	19:07	11:00	21:07
Punto de toma:	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Temperatura (°C)	15	16	16.2	17	16	16.5	15.3	16	15	16
Caudal (L/min)	0.25	0.23	0.27	0.25	0.25	0.24	0.26	0.25	0.25	0.24
DQO (mg/L)	676	152	720	120	3200	100	485	105	515	92
DBO (mg/L)	284	79	316	90	1100	47.7	230	60	234	39
Fenoles (mg/L)	2.6	0.8	1.9	0.4	5.31	3.6	2.3	0.3	2.9	0.61
Sólidos Totales (mg/L)	286.22	112.4	344.73	126.24	472.81	163.58	112.17	83.65	125.0533	98.64
Sólidos totales disueltos (mg/L)	92.3	90.55	98.21	92.28	94.26	91.79	75.21	74.99	85.26	82.812
AyG (mg/L)	20.6		23.36		9.36		11.37		14.51	

FECHA:	14/03/2009		16/03/2009		18/03/2009		20/03/2009		22/03/2009	
Hora:	11:00	21:07	08:00	18:07	08:00	18:07	11:00	21:07	08:00	18:07
Punto de toma:	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Temperatura (°C)	15	16	15.4	16	15.7	16	16.1	16.3	16.7	17
Caudal (L/min)	0.24	0.22	0.23	0.22	0.25	0.24	0.26	0.25	0.23	0.22
DQO (mg/L)	298	27	216	40	523	102	795	63	252	78
DBO (mg/L)	123	17	98	63	215	28	386	24	118	38
Fenoles (mg/L)	7	0.24	4	2.3	2.6	0.28	3.1	0.9	5.8	0.8
Sólidos Totales (mg/L)	79.512	58.418	85.362	63.323	118.34	85.067	382.23	135.356	77.541	62.097
Sólidos totales disueltos (mg/L)	58.37	55.876	54.629	53.186	81.223	78.351	100.051	93.418	45.134	42.283
AyG (mg/L)	8.245		7.23		12.172		25.765		7.556	

FECHA:	24/03/2009		26/03/2009		28/03/2009		30/03/2009		01/04/2009	
Hora:	08:00	18:07	11:00	21:07	08:00	18:07	08:00	18:07	08:00	18:07
Punto de toma:	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Temperatura (°C)	16	17	15.6	16.1	16.3	17	16.2	17	16.6	17
Caudal (L/min)	0.25	0.24	0.25	0.23	0.25	0.24	0.25	0.23	0.24	0.22
DQO (mg/L)	510	98	528	123	440	102	648	127	802	136
DBO (mg/L)	252	43	211	35	157	48	346	73	397	60
Fenoles (mg/L)	3.3	0.95	3.2	0.45	8.2	3.7	3.5	1.3	4.3	2
Sólidos Totales (mg/L)	105.432	96.971	126.234	24.267	93.29	31.861	272.348	121.08	396.871	153.9
Sólidos totales disueltos (mg/L)	90.16	86.23	90.3	87.13	63.221	62.15	97.281	96.853	110.671	100.21
AyG (mg/L)	11.63		14.076		8.227		18.377		27.175	

ANEXO J. ESTIMACIÓN DE FENOL EN EL REACTOR

Dimensiones de las cámaras del RAP					
Ancho (cm)	Largo (cm)	Altura (cm)	Volumen Cámara (cm ³)	Valor aproximado del medio de soporte	Volumen total de espuma ≈ (cm ³)
45	47	45	95,175		90,000

1. ESTIMACIÓN DE FENOL EN EL MEDIO SOPORTE

	Concentración Leída (mg/L)	Concentración real* (mg/L)	Volumen Destilado (L)	Masa de fenol (mg)	Volumen Espuma (cm ³)	Concentración de fenol en espuma (mg/cm ³ _{espuma})	Promedio de concentración por espuma (mg/cm ³ _{espuma})	Concentración promedio por cámara $\mu\text{g}/\text{cm}^3$	Volumen total de espuma ≈ (cm ³)	Masa de Fenol por cámara (mg)
Cámara 1										
Espuma 1	0.43	0.404	0.100	0.04044	27	0.001498				
Espuma 2	0.57	0.536	0.100	0.05362	27	0.001986	0.001742	1.7419	90,000	156.7668
Cámara 2										
Espuma 2	0.27	0.254	0.100	0.02538	27	0.000940				
Espuma 3	0.35	0.329	0.100	0.03291	27	0.001219	0.001079	1.0794	90,000	97.1477
Cámara 3										
Espuma 2	0.20	0.188	0.100	0.01879	27	0.000696				
Espuma 3	0.19	0.178	0.100	0.01785	27	0.000661	0.000678	0.6785	90,000	61.0625

* Valor Ajustado por la curva de calibración (Ecuación 11)

Masa de Fenol total en el medio de soporte [mg] (Ecuación 12)	314.9769
--	----------

2. ESTIMACIÓN DE FENOL EN EL LODO

Volumen de lodo:	50 ml
Volumen destilado:	116 ml
Concentración Leída:	4,5 mg/L
Concentración real:	4.24 mg/L
Masa de fenol:	0.4913 mg
Concentración Fenol en el lodo:	9.8269 mg/L

Asumiendo que el volumen inicial aproximado de lodos, es el 70% del espacio del falso fondo del reactor:

Dimensiones del falso fondo del reactor				
Ancho (cm)	Largo (cm)	Profundidad (cm)	Volumen por cámara (cm ³)	Volumen total (cm ³)
45	47	40	84,600	253,800

Volumen de lodos: 177,660 cm³
177.66 L

DENSIDAD DEL LODO

A partir de la prueba de sólidos totales hecha a 50 ml de muestra de lodo, se determinó que la densidad del lodo es 9.294 mg/L

Volumen muestra (ml)	50
Peso cápsula vacía (g)	26.6252
Peso cápsula con sólidos Secos (g)	27.0899
Sólidos Secos (g)	0.4647
Densidad (g/ml)	0.0093
Densidad (mg/L)	9,294.0

ANEXO K. EFICIENCIAS DEL REACTOR

1. Determinación de las eficiencias de remoción de DQO (mg/L)

Fecha	02-Mar-09	04-Mar-09	06-Mar-09	10-Mar-09	12-Mar-09	14-Mar-09	16-Mar-09	18-Mar-09	20-Mar-09	22-Mar-09
Entrada	676	720	3200	485	515	298	216	523	795	252
Salida	152	120	100	105	92	27	40	102	63	78
Eficiencia	0.7751	0.8333	0.9688	0.7835	0.8214	0.9094	0.8148	0.8050	0.9208	0.6905
	78%	83%	97%	78%	82%	91%	81%	80%	92%	69%

Fecha	24-Mar-09	26-Mar-09	28-Mar-09	30-Mar-09	01-Abr-09	
Entrada	510	528	440	648	802	
Salida	98	123	102	127	136	
Eficiencia	0.8078	0.7670	0.7682	0.8040	0.8304	Promedio
	81%	77%	77%	80%	83%	82%

2. Determinación de las eficiencias de remoción de DBO (mg/L)

Fecha	02-Mar-09	04-Mar-09	06-Mar-09	10-Mar-09	12-Mar-09	14-Mar-09	16-Mar-09	18-Mar-09	20-Mar-09	22-Mar-09
Entrada	284	316	1100	230	234	123	98	215	386	118
Salida	79	90	48	60	39	17	63	28	24	38
Eficiencia	0.7218	0.7152	0.9566	0.7391	0.8333	0.8618	0.3571	0.8698	0.9378	0.6780
	72%	72%	96%	74%	83%	86%	36%	87%	94%	68%

Fecha	24-Mar-09	26-Mar-09	28-Mar-09	30-Mar-09	01-Abr-09	
Entrada	252	211	157	346	397	
Salida	43	35	48	73	60	
Eficiencia	0.8294	0.8341	0.6943	0.7890	0.8489	Promedio
	83%	83%	69%	79%	85%	78%

3. Comparación de las eficiencias de remoción de Fenol (con y sin considerar su volatilización)

Sin considerar la volatilización

Fecha	02-Mar-09	04-Mar-09	06-Mar-09	10-Mar-09	12-Mar-09	14-Mar-09	16-Mar-09	18-Mar-09	20-Mar-09	22-Mar-09
Entrada	395	311	806	36	440	1020	558	395	489	810
Salida	121	66	546	47	93	35	321	42	142	112
Eficiencia	0.6923	0.7895	0.3220	-0.3196	0.7897	0.9657	0.4250	0.8923	0.7097	0.8621
	69%	79%	32%	-32%	79%	97%	43%	89%	71%	86%

Fecha	24-Mar-09	26-Mar-09	28-Mar-09	30-Mar-09	01-Abr-09	
Entrada	501	486	1244	531	626	
Salida	144	68	561	197	291	
Eficiencia	0.7121	0.8594	0.5488	0.6286	0.5349	Promedio
	71%	86%	55%	63%	53%	69%

Considerando la volatilización

Fecha	02-Mar-09	04-Mar-09	06-Mar-09	10-Mar-09	12-Mar-09	14-Mar-09	16-Mar-09	18-Mar-09	20-Mar-09	22-Mar-09
Masa Entrada (mg)	59873	51034	122279	5663	66781	148559	77964	59873	77212	113048
Masa Salida (mg)	18422	10744	82901	7472	14047	5093	44829	6448	22416	15593
Masa Volatil (mg)	0.090718	0.13822	0.10806	0.03837	0.05834	0.10453	0.04584	0.0527	0.11915	0.05402
Eficiencia	0.6923	0.7895	0.3220	-0.3196	0.7897	0.9657	0.4250	0.8923	0.7097	0.8621
	69%	79%	32%	-32%	79%	97%	42%	89%	71%	86%

Fecha	24-Mar-09	26-Mar-09	28-Mar-09	30-Mar-09	01-Abr-09	
Masa Entrada (mg)	75993	73690	188830	80598	91257	
Masa Salida (mg)	21877	10363	85204	29936	42445	
Masa Volatil (mg)	0.077483	0.01085	0.06759	0.07566	0.00875	
Eficiencia	0.7121	0.8594	0.5488	0.6286	0.5349	Promedio
	71%	86%	55%	63%	53%	69%

4. Determinación de la constante de remoción K (d^{-1})

Fecha	02-Mar-09	04-Mar-09	06-Mar-09	10-Mar-09	12-Mar-09	14-Mar-09	16-Mar-09	18-Mar-09	20-Mar-09	22-Mar-09
EDBO	72%	72%	96%	74%	83%	86%	36%	87%	94%	68%
K	3.0465	2.9903	7.4717	3.1994	4.2661	4.7118	1.0520	4.8534	6.6138	2.6979

Fecha	24-Mar-09	26-Mar-09	28-Mar-09	30-Mar-09	01-Abr-09	
EDBO	83%	83%	69%	79%	85%	Promedio
K	4.2101	4.2774	2.8215	3.7047	4.4990	3.70

ANEXO L. BALANCE DE MASAS

1. Sumatoria de cargas de emisión de fenol

Fecha: 2 de Marzo de 2009			Fecha: 4 de Marzo de 2009			Fecha: 6 de Marzo de 2009			Fecha: 10 de Marzo de 2009		
Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)	Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)	Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)	Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)
10:00	0.1315	7.892E-03	10:00	0.1881	1.128E-02	11:00	0.1410	8.461E-03	09:00	0.0469	2.813E-03
11:00	0.1611	9.663E-03	11:00	0.1965	1.179E-02	12:00	0.1787	1.072E-02	10:00	0.0417	2.500E-03
12:00	0.2115	1.269E-02	12:00	0.2892	1.735E-02	13:00	0.1474	8.841E-03	11:00	0.0704	4.225E-03
13:00	0.2115	1.269E-02	13:00	0.2822	1.693E-02	14:00	0.2352	1.411E-02	12:00	0.1174	7.046E-03
14:00	0.2057	1.234E-02	14:00	0.2939	1.764E-02	15:00	0.2116	1.270E-02	13:00	0.0586	3.516E-03
15:00	0.0940	5.641E-03	15:00	0.2982	1.789E-02	16:00	0.1348	8.088E-03	14:00	0.0626	3.758E-03
16:00	0.1678	1.007E-02	16:00	0.2163	1.298E-02	17:00	0.2022	1.213E-02	15:00	0.0805	4.828E-03
17:00	0.1174	7.046E-03	17:00	0.1881	1.128E-02	18:00	0.2022	1.213E-02	16:00	0.0703	4.219E-03
18:00	0.0939	5.637E-03	18:00	0.1630	9.783E-03	19:00	0.1505	9.028E-03	17:00	0.0391	2.344E-03
19:00	0.1174	7.046E-03	19:00	0.1881	1.128E-02	20:00	0.1975	1.185E-02	18:00	0.0521	3.125E-03
Σ=		9.072E-02	Σ=		1.382E-01	Σ=		1.081E-01	Σ=		3.837E-02

Fecha: 12 de Marzo de 2009			Fecha: 14 de Marzo de 2009			Fecha: 16 de Marzo de 2009			Fecha: 18 de Marzo de 2009		
Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)	Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)	Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)	Hora	Carga (µg/min)	Carga (mg/h)
11:00	0.1127	6.765E-03	11:00	0.1546	9.278E-03	08:00	0.0250	1.499E-03	08:00	0.0407	2.440E-03
12:00	0.1066	6.394E-03	12:00	0.2351	1.411E-02	09:00	0.0536	3.215E-03	09:00	0.0469	2.813E-03
13:00	0.1504	9.024E-03	13:00	0.2351	1.411E-02	10:00	0.0610	3.660E-03	10:00	0.0438	2.625E-03
14:00	0.1410	8.461E-03	14:00	0.2210	1.326E-02	11:00	0.0657	3.943E-03	11:00	0.0527	3.164E-03
15:00	0.1053	6.317E-03	15:00	0.1939	1.164E-02	12:00	0.1057	6.340E-03	12:00	0.0880	5.281E-03
16:00	0.1081	6.484E-03	16:00	0.1763	1.058E-02	13:00	0.0939	5.637E-03	13:00	0.1175	7.049E-03
17:00	0.0865	5.187E-03	17:00	0.1822	1.093E-02	14:00	0.1034	6.202E-03	14:00	0.1292	7.754E-03
18:00	0.0563	3.378E-03	18:00	0.1382	8.291E-03	15:00	0.0877	5.264E-03	15:00	0.1234	7.401E-03
19:00	0.0564	3.381E-03	19:00	0.1097	6.582E-03	16:00	0.0876	5.257E-03	16:00	0.1305	7.832E-03
20:00	0.0492	2.953E-03	20:00	0.0960	5.762E-03	17:00	0.0804	4.825E-03	17:00	0.1057	6.340E-03
Σ=		5.834E-02	Σ=		1.045E-01	Σ=		4.584E-02	Σ=		5.270E-02

Fecha: 20 de Marzo de 2009

Fecha: 22 de Marzo de 2009

Fecha: 24 de Marzo de 2009

Fecha: 26 de Marzo de 2009

Hora	Carga ($\mu\text{g}/\text{min}$)	Carga (mg/h)	Hora	Carga ($\mu\text{g}/\text{min}$)	Carga (mg/h)	Hora	Carga ($\mu\text{g}/\text{min}$)	Carga (mg/h)	Hora	Carga ($\mu\text{g}/\text{min}$)	Carga (mg/h)
11:00	0.2352	1.411E-02	08:00	0.0391	2.344E-03	08:00	0.0469	2.817E-03	11:00	0.0128	7.700E-04
12:00	0.2509	1.505E-02	09:00	0.0469	2.813E-03	09:00	0.0704	4.225E-03	12:00	0.0140	8.400E-04
13:00	0.2352	1.411E-02	10:00	0.0626	3.758E-03	10:00	0.1034	6.202E-03	13:00	0.0152	9.100E-04
14:00	0.2116	1.270E-02	11:00	0.0986	5.919E-03	11:00	0.0939	5.637E-03	14:00	0.0163	9.800E-04
15:00	0.2069	1.241E-02	12:00	0.1034	6.202E-03	12:00	0.1410	8.461E-03	15:00	0.0175	1.050E-03
16:00	0.1763	1.058E-02	13:00	0.1034	6.202E-03	13:00	0.1622	9.730E-03	16:00	0.0187	1.120E-03
17:00	0.2057	1.234E-02	14:00	0.1174	7.046E-03	14:00	0.1828	1.097E-02	17:00	0.0198	1.190E-03
18:00	0.1881	1.128E-02	15:00	0.1175	7.051E-03	15:00	0.1728	1.037E-02	18:00	0.0210	1.260E-03
19:00	0.1410	8.461E-03	16:00	0.1175	7.049E-03	16:00	0.1568	9.406E-03	19:00	0.0222	1.330E-03
20:00	0.1351	8.106E-03	17:00	0.0939	5.637E-03	17:00	0.1612	9.670E-03	20:00	0.0233	1.400E-03
$\Sigma=$		1.192E-01	$\Sigma=$		5.402E-02	$\Sigma=$		7.748E-02	$\Sigma=$		1.085E-02

Fecha: 28/03/2009

Fecha: 30/03/2009

Fecha: 01/04/2009

Hora	Carga ($\mu\text{g}/\text{min}$)	Carga (mg/h)	Hora	Carga ($\mu\text{g}/\text{min}$)	Carga (mg/h)	Hora	Carga ($\mu\text{g}/\text{min}$)	Carga (mg/h)
08:00	0.0313	1.875E-03	08:00	0.0250	1.499E-03	08:00	0.0093	5.600E-04
09:00	0.0704	4.225E-03	09:00	0.0880	5.281E-03	09:00	0.0105	6.300E-04
10:00	0.1044	6.266E-03	10:00	0.0880	5.281E-03	10:00	0.0117	7.000E-04
11:00	0.1175	7.049E-03	11:00	0.1044	6.263E-03	11:00	0.0128	7.700E-04
12:00	0.1044	6.266E-03	12:00	0.1480	8.879E-03	12:00	0.0140	8.400E-04
13:00	0.1175	7.049E-03	13:00	0.1598	9.591E-03	13:00	0.0152	9.100E-04
14:00	0.1462	8.773E-03	14:00	0.1655	9.932E-03	14:00	0.0163	9.800E-04
15:00	0.1469	8.811E-03	15:00	0.1881	1.128E-02	15:00	0.0175	1.050E-03
16:00	0.1410	8.461E-03	16:00	0.1462	8.773E-03	16:00	0.0187	1.120E-03
17:00	0.1469	8.811E-03	17:00	0.1480	8.879E-03	17:00	0.0198	1.190E-03
$\Sigma=$		6.759E-02	$\Sigma=$		7.566E-02	$\Sigma=$		8.750E-03

2. Balance de masas

BASE DE CÁLCULO	10h7min = 10.1166 h = 607 min	
Tiempo de retención		
Lodos almacenados	177.66	L
Densidad Lodos	9294	mg/L
Concentración Fenol	9.8269	mg/L

Cálculo de variables												
Fecha	Q	mFe	mFs	mFv	mFm	Prod. Lodo	Lodo _{generado}	Vol. Lodo	mF _{Lodo}	mF _R	mF _{acum.}	Z
	L/min	mg	mg	mg	mg	mg/L	L	L	mg	mg	mg	mg
02/03/2009	0.25	394.55	121.40	9.07E-02	314.98	67.6	1.104	178.764	1756.69	2071.670	2344.820	2617.880
04/03/2009	0.27	311.391	65.56	1.38E-01	560.81	72	1.270	357.693	3515.02	4075.829	4321.664	4567.361
06/03/2009	0.25	805.7925	546.3	1.08E-01	574.47	320	5.225	362.918	3566.36	4140.831	4400.324	4659.708
10/03/2009	0.26	35.88	47.346	3.84E-02	303.51	48.5	0.824	363.742	3574.45	3877.966	3866.500	3854.995
12/03/2009	0.25	440.075	92.5675	5.83E-02	662.48	51.5	0.841	364.583	3582.72	4245.202	4592.710	4940.159
14/03/2009	0.24	1019.76	34.9632	1.05E-01	1299.77	29.8	0.467	365.050	3587.31	4887.082	5871.879	6856.571
16/03/2009	0.23	558.44	321.103	4.58E-02	552.31	21.6	0.324	365.374	3590.50	4142.811	4380.148	4617.439
18/03/2009	0.25	394.55	42.49	5.27E-02	667.04	52.3	0.854	366.228	3598.89	4265.925	4617.985	4969.992
20/03/2009	0.26	489.242	142.038	1.19E-01	662.18	79.5	1.350	367.578	3612.15	4274.335	4621.539	4968.624
22/03/2009	0.23	809.738	111.688	5.40E-02	1013.03	25.2	0.379	367.957	3615.87	4628.901	5326.951	6024.947
24/03/2009	0.25	500.775	144.163	7.75E-02	671.59	51	0.766	368.723	3623.40	4294.992	4651.605	5008.140
26/03/2009	0.25	485.6	68.2875	1.09E-02	732.29	52.8	0.862	369.585	3631.87	4364.164	4781.476	5198.778
28/03/2009	0.25	1244.35	561.475	6.76E-02	997.85	44	0.718	370.303	3638.93	4636.786	5319.661	6002.469
30/03/2009	0.25	531.125	197.275	7.57E-02	648.83	64.8	1.058	371.361	3649.33	4298.158	4632.008	4965.783
01/04/2009	0.24	626.424	291.36	8.75E-03	650.04	80.2	1.257	372.619	3661.68	4311.726	4646.790	4981.845

ANEXO M. EJECUCIÓN DEL MODELO WATER9

Fecha: Marzo 2 de 2009

Ingreso de datos:

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	286.22	286.22				
oil (ppm)	20.6	20.6				
dis.sol(ppm)	92.3	92.3				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.25	0.25				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	2.6	2.6				

Respuesta del modelo:

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	1,89E-08	,00		1,	0,0000	0,0000	(5,97E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,89E-08	g/s air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	5,97E-07	Mg/yr air emissions					

Fecha: Marzo 4 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 57 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound HELP
Return from waste edit

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	344.73	344.73				
oil (ppm)	23.36	23.36				
dis.sol(ppm)	98.21	98.21				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.27	0.27				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	1.9	1.9				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7 view 0

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 16:14:01

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	1,49E-08	,00	,	1,	0,0000	0,0000	(4,71E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,49E-08	g/s air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	4,72E-07	Mg/yr air emissions					

Fecha: Marzo 6 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 51 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound
Return from waste edit

HELP

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	472.81	472.81				
oil (ppm)	9.36	9.36				
dis.sol(ppm)	94.26	94.26				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.25	0.25				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	5.3	5.3				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Unit type
closed sump, vent
toggle: draw modes
Update
view 0

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 16:23:29

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	3,86E-08 ,00 ,			1,	0,0000	0,0000	(1,22E-06 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	3,86E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,22E-06 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 10 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 51 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound HELP
Return from waste edit

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w. ▲
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	112.17	112.17				
oil (ppm)	11.37	11.37				
dis.sol(ppm)	75.21	75.21				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.26	0.26				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	2.3	2.3				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7 view 0

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Unit type
closed sump, vent
toggle: draw modes
Update

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 16:34:05

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	1,74E-08 ,00 ,			1,	0,0000	0,0000	(5,50E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,74E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	5,50E-07 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 12 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 57 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound
Return from waste edit HELP

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	125.0533	125.0533				
oil (ppm)	14.51	14.51				
dis.sol(ppm)	85.26	85.26				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.25	0.25				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	2.9	2.9				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7 view 0

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 16:39:13

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	2,11E-08 ,00			1,	0,0000	0,0000	(6,66E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	2,11E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	6,67E-07 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 14 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 55 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound
Return from waste edit

HELP

Unit type
closed sump, vent
toggle: draw modes
Update

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	ww. ▲
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	79.512	79.512				
oil (ppm)	8.245	8.245				
dis.sol(ppm)	58.37	58.37				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.24	0.24				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	7	7				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7 view 0

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 16:49:34

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	4,90E-08 ,00	,		1,	0,0000	0,0000	(1,54E-06 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	4,90E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,55E-06 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 16 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 52 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound HELP
Return from waste edit

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	85.362	85.362				
oil (ppm)	7.23	7.23				
dis.sol(ppm)	54.629	54.629				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.23	0.23				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	4	4				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7 view 0

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Unit type
closed sump, vent
toggle: draw modes
Update

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 16:57:20

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	2,68E-08 ,00	,	1,	0,0000	0,0000	(8,47E-07 Mg/yr)	
TOTAL ALL COMPOUNDS	2,68E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	8,47E-07 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 18 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 54 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound
Return from waste edit HELP

Unit type
closed sump, vent
toggle: draw modes
Update

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	118.34	118.34				
oil (ppm)	12.172	12.172				
dis.sol(ppm)	81.223	81.223				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.25	0.25				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	2.6	2.6				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7 view 0

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 17:01:59

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	1,89E-08 ,00			1,	0,0000	0,0000	(5,97E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,89E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	5,98E-07 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 20 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 49 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound HELP
Return from waste edit

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	382.23	382.23				
oil (ppm)	25.765	25.765				
dis.sol(ppm)	100.051	100.051				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.26	0.26				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	3.1	3.1				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7 view 0

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 17:06:55

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	2,35E-08 ,00 ,		1,	0,0000	0,0000		(7,40E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	2,35E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	7,41E-07 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 22 de 2009

Ingreso de datos:

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	77.541	77.541				
oil (ppm)	7.556	7.556				
dis. sol(ppm)	45.134	45.134				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.23	0.23				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	5.8	5.8				

Respuesta del modelo:

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	3,89E-08 ,00			1,	0,0000	0,0000	(1,23E-06 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	3,89E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,23E-06 Mg/yr	air emissions					

Ingreso de datos:

Respuesta del modelo:

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 17:22:28

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	2,72E-08	,00	,	1,	0,0000	0,0000	(8,57E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	2,72E-08	g/s air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	8,58E-07	Mg/yr air emissions					

Fecha: Marzo 26 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 50 edit unit 2

Shift waste Insert row
Delete the compound
Return from waste edit

HELP

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	126.234	126.234				
oil (ppm)	14.076	14.076				
dis.sol(ppm)	90.3	90.3				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.25	0.25				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	3.2	3.2				

no project
sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7

divert flow from 2 Divert 2 to waste connect unit Straighten

Unit type
closed sump, vent
toggle: draw modes
Update
view 0

Respuesta del modelo:

Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 17:27:40

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	2,64E-08	,00	,	1,	0,0000	0,0000	(8,32E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	2,64E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	8,32E-07 Mg/yr	air emissions					

Fecha: Marzo 28 de 2009

Ingreso de datos:

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	93.29	93.29				
oil (ppm)	8.227	8.227				
dis.sol(ppm)	63.221	63.221				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.25	0.25				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	8.2	8.2				

Respuesta del modelo:

COMPOUND	RATE (g/s)	Air	Fraction Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	6,75E-08 ,00 ,		1,		0,0000	0,0000	(2,13E-06 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	6,75E-08 g/s						air emissions
TOTAL ALL COMPOUNDS	2,13E-06 Mg/yr						air emissions

Fecha: Marzo 30 de 2009

Ingreso de datos:

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	272.348	272.348				
oil (ppm)	18.377	18.377				
dis.sol(ppm)	97.281	97.281				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.25	0.25				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	3.5	3.5				

Respuesta del modelo:

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	2,88E-08	,00	,	1,	0,0000	0,0000	(9,08E-07 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	2,88E-08	g/s air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	9,08E-07	Mg/yr air emissions					

Fecha: Abril 1 de 2009

Ingreso de datos:

Wastewater Collection and Treatment Units

File View Screen Display Units Waste Help notes Return

PHENOL 51

edit unit 3

Shift waste Insert row
Delete the compound
Return from waste edit

HELP

All compound concentrations in ppm	waste 1	waste 2	waste 3	waste 4	waste 5	w.
name	ENTRADA	RAP				
solids (ppm)	396.871	396.871				
oil (ppm)	27.175	27.175				
dis.sol(ppm)	110.671	110.671				
color						
temp (C)	17	17				
flow (l/s)	0.24	0.24				
code						
drop (cm)						
radius (cm)	2.54	2.54				
PHENOL	4.3	4.3				

no project

sheet 1 sheet 2 sheet 3 sheet 4 sheet 5 sheet 6 sheet 7

divert flow from 3 Divert 3 to waste

connect unit Straighten

Unit type
closed sump, vent
toggle: draw modes
Update
view 0

Respuesta del modelo:

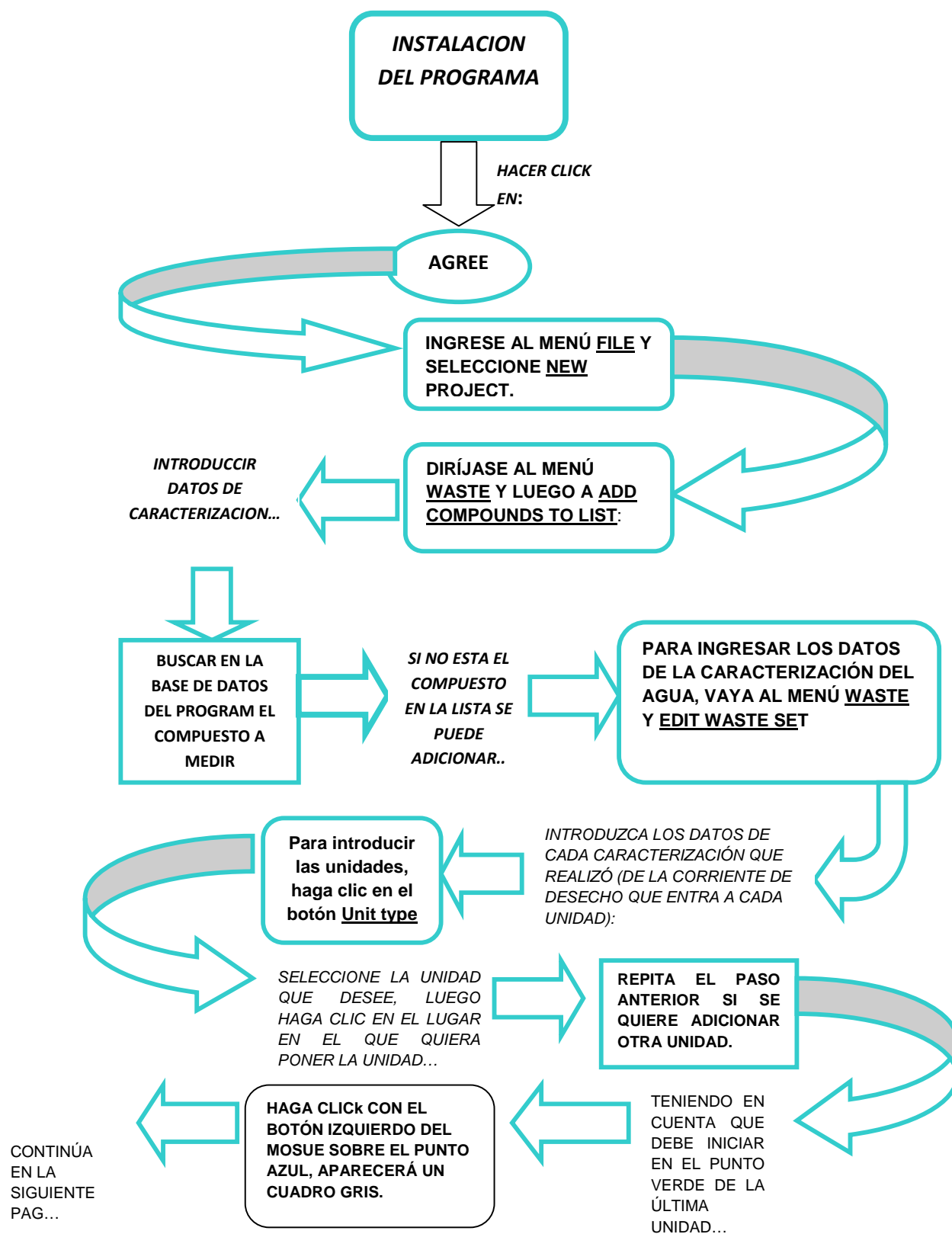
Display

WASTEWATER TREATMENT SUMMARY I 05-28-2009 17:45:25

no project

COMPOUND	RATE (g/s)	Fraction Air	Removal	Exit	Adsorb	error	emissions
PHENOL	3,40E-08 ,00 ,			1,	0,0000	0,0000	(1,07E-06 Mg/yr)
TOTAL ALL COMPOUNDS	3,40E-08 g/s	air emissions					
TOTAL ALL COMPOUNDS	1,07E-06 Mg/yr	air emissions					

ANEXO N. FLUJOGRAMA DEL MANEJO DEL MODELO WATER9



**CUADRO
GRIS**

CONTIENE...

- **Edit Properties:** Aparecerá un cuadro en el cual usted puede digitar las características de la unidad que usted desee.
- **Change Unit:** Usted puede cambiar la unidad por otra.
- **Delete line:** Usted puede borrar la unidad.
- **1, 2, 3:** En éste, usted introduce la corriente de desecho que entra a la unidad. Para esto seleccione la corriente de desecho del menú que aparece en la parte derecha de la pantalla. Haga lo mismo para cada unidad.

ARRIBA DE CADA UNIDAD APARECERÁ UN CÍRCULO CON UN NÚMERO INDICANDO LA CORRIENTE DE DESECHO QUE ENTRA A LA UNIDAD.

OPRIMA EL BOTÓN **UPDATE** EN LA PARTE DERECHA DE LA PANTALLA PARA ACTUALIZAR LOS DATOS QUE HA INTRODUCIDO.

PARA VER LOS RESULTADOS...

VAYA AL MENÚ **VIEW** Y SELECCIONE **OVERALL SUMMARY**. EN ESTA VENTANA APARECEN LOS DATOS ARROJADOS POR EL MODELO.

ANEXO O. DISEÑO DE BIOFILTRO PARA EL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO PISTÓN (RAP)

1. Determinación del volumen del biogás:

Dada la variación de las cargas de DQO en el sistema de tratamiento, para este cálculo se determinó un promedio ponderado del DQO de entrada al sistema

$$DQO_{in} = 558,7 \text{ mg/l}$$

$$Q = 0,25 \text{ l/min}$$

$$W = Q \times [DQO] = 0,25 \text{ l/min} \times 558,7 \text{ mg/l}$$

$$W = 139,7 \text{ mg/min}$$

- Dado que la generación de biogás en un sistema anaerobio es de aproximadamente el 80% de la carga de la DQO:

$$W_{80\%} = 139,7 \text{ mg/min} \times 0,8 = 111,74 \text{ mg/min}$$

$$W_{80\%} = 1,1174 \times 10^{-4} \text{ Kg/min}$$

- Cálculo del volumen de biogás generado

$$\text{Biogas} = \text{CH}_4 + \text{CO}_2$$

$$\text{Valor estándar CH}_4 = 0,35 \text{ m}^3 / \text{kg DQO}$$

$$\text{Valor estándar CO}_2 = 0,127 \text{ m}^3 / \text{kg DQO}$$

$$0,5 \text{ m}^3 / \text{kg DQO} \text{----- biogás}$$

Volumen de Biogas generado (base de cálculo = 1 min)

$$V = \frac{0,5 \text{ m}^3}{\text{Kg DQO}} \times 1,1174 \times 10^{-4} \text{ Kg} = 5,587 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Corrección del valor

$$\frac{P_o * V_o}{T_o} = \frac{P_f * V_f}{T_f}$$

$$V_f = \frac{1 \text{ atm} \times 5,587 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \times 290^\circ \text{ K}}{273^\circ \text{ K} \times 0,73 \text{ atm}} = 8,13 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Por tanto, el caudal de aire a lavar es de $8.13 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$

2. Diseño del biofiltro

$$Q = \frac{8.13 \times 10^{-5} \text{ m}^3}{\text{min}} \times 2$$

$$Q = 1.63 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$$

Se asume el doble del caudal, considerando la generación de biogás de los dos reactores que hay en la planta de tratamiento

- Se selecciona como tasa de carga superficial $2.5 \text{ ft}^3/\text{ft}^2\text{min}$
(Parámetros de diseño: $1.5 - 3 \text{ ft}^3/\text{ft}^2\text{min}$)

$$W_{\text{sup}} = \frac{2.5 \text{ ft}^3}{\text{ft}^2 \text{ min}} \times \left(\frac{0.3048 \text{ m}}{1 \text{ ft}} \right)^3 \times \left(\frac{1 \text{ ft}}{0.3048 \text{ m}} \right)^2 = 0.762 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min}$$

- Profundidad medio filtrante, $P = 0.9 \text{ m}$
(Parámetros de diseño $3 - 5 \text{ ft} = 0.9 - 1.5 \text{ m}$)
- Área y dimensiones

$$A = \frac{Q}{W_{\text{sup}}} = \frac{1.81 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}}{0.762 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min}} = 2.37 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2.37 \text{ cm}^2$$

$$A = a * b$$

$$a = 10 \text{ cm}$$

$$b = \frac{A}{a} = \frac{2.37 \text{ cm}^2}{5 \text{ cm}} = 0.47 \text{ cm} \approx 0.5 \text{ cm}$$

De acuerdo a lo anterior, es necesario asumir el valor del área y profundidad del biofiltro ya que el diseño conforme a los parámetros de diseño estos valores son muy pequeños.

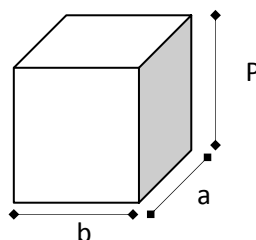
- Valores asumidos

$$\text{Área} = 150 \text{ cm}^2$$

$$a = 10 \text{ cm}$$

$$b = 15 \text{ cm}$$

$$P = 0.5 \text{ m}$$



Se asumen estas dimensiones de a y b con el fin de hacer un filtro tipo trinchera dado el espacio disponible en la planta para su construcción

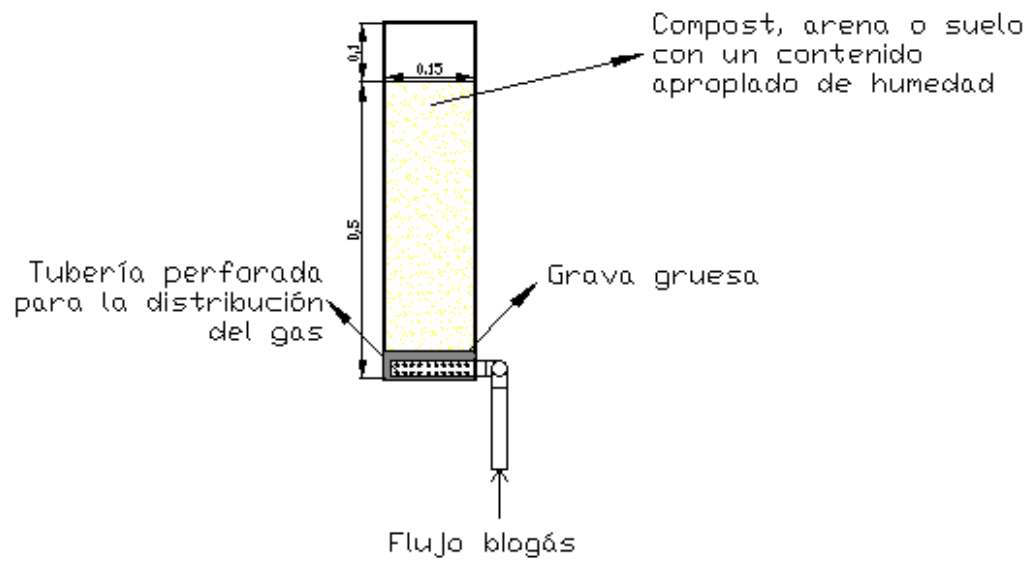
- Por tanto, el volumen del lecho filtrante

$$V_{lecho} = A * P = 1.5 * 10^{-2} m^2 \times 0.5 m = 7.5 * 10^{-3} m^3$$

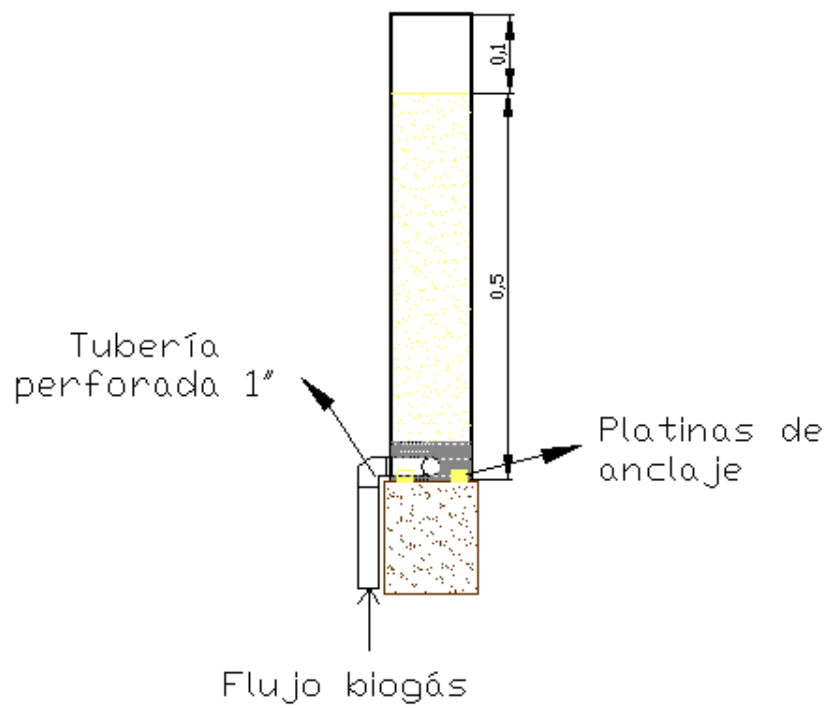
- Revisión del tiempo de retención del aire

$$t_{ret} = \frac{Vol_{lecho}}{Q_{aire}} = \frac{7.5 * 10^{-3} m^3}{1.63 * 10^{-4} m^3 / \text{min}} = 46.01 \text{ min} , \text{ mayor al recomendado de 30 seg.}$$

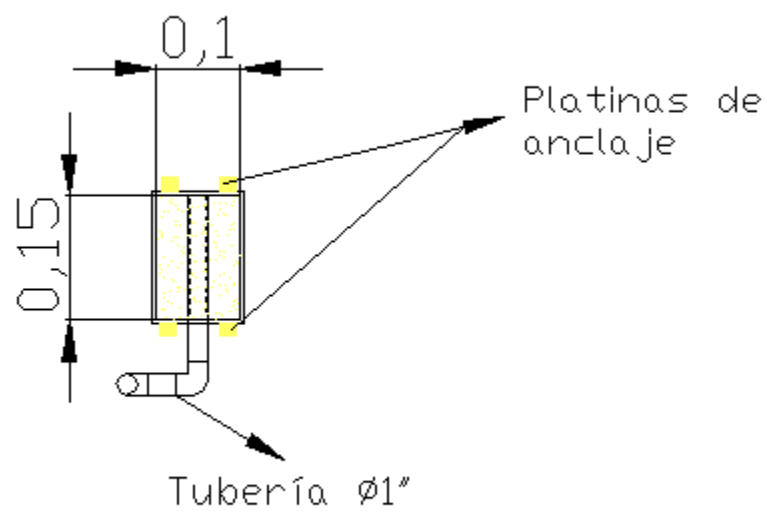
VISTA FRONTAL DEL BIOFILTRO



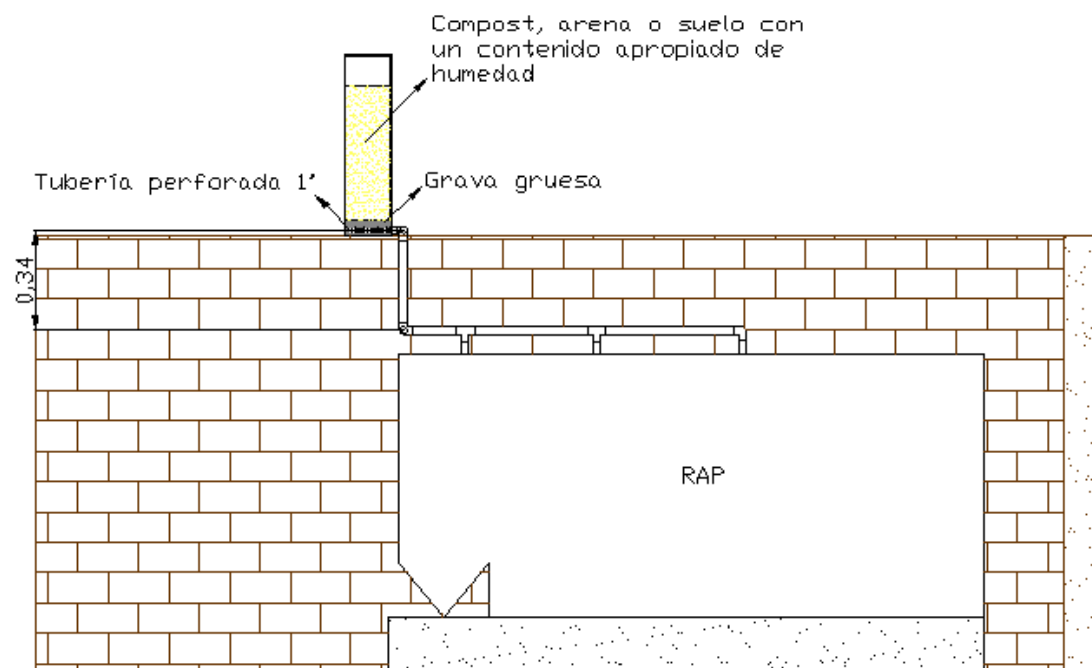
VISTA LATERAL

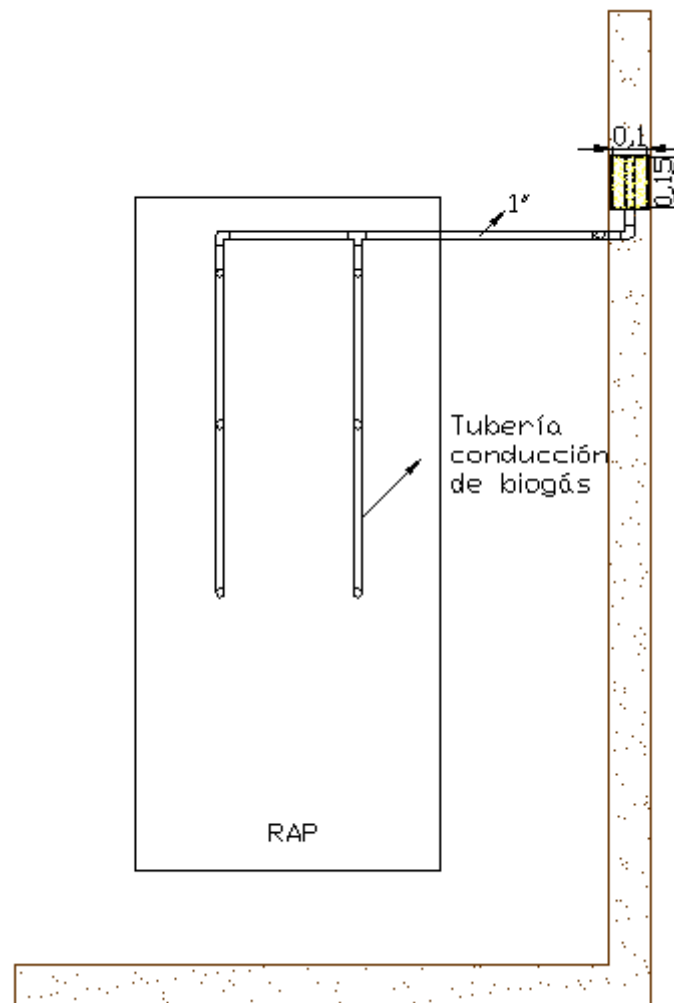


VISTA DE PLANTA



UBICACIÓN EN LA PLANTA





ANEXO P. ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES DE LAS EMISIONES DIARIAS DE FENOL

[illegible]