

**APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS COMBINADAS PARA LA REMOCIÓN DE  
FENOLES EN LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO ARAUCA  
- ECOPETROL S.A.**

**JULIETA DEL ROCÍO GONZÁLEZ GUZMÁN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
BUCARAMANGA, COLOMBIA  
2.008**

**APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS COMBINADAS PARA LA REMOCIÓN DE  
FENOLES EN LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO ARAUCA  
- ECOPETROL S.A.**

**JULIETA DEL ROCÍO GONZÁLEZ GUZMÁN**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Especialista en Química Ambiental**

**Director  
Esp. RICARDO RESTREPO  
Profesional Tecnologías Limpias – Instituto Colombiano del Petróleo –  
ECOPETROL S.A.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS, ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA, COLOMBIA  
2.008**

## Reconocimiento y Dedicatoria

En un comienzo todo parecía inalcanzable, pero la fortaleza que me diera Dios espiritualmente y a través del Amor incondicional de mi esposo Germán Alberto, el ejemplo de Esfuerzo y perseverancia de mi Mamá María Lucrecia, el apoyo de hermano Ricardo y de mis Suegros Celia Victoria y Jaime, me ayudaron a lograr esta meta, y es allí donde nos damos cuenta que solos no es posible.

En la vida las circunstancias negativas solemos llamarlas problemas, pero hay personas que nos enseñan que es mejor llamarlas oportunidades, una de esas personas es Ricardo Restrepo, Director de esta monografía.

Quiero darle un especial reconocimiento al Dr. Jairo Puente, la Dra. Yahaira, Joulvis, a los profesores y a todos mis compañeros del Grupo 12 de la Especialización de Química Ambiental, quienes me brindaron lo mejor de ellos en los momentos que los necesitaba,

Finalmente, dedico este trabajo de grado a mi familia, conformada por German y Gabrielito, con quienes he comenzado a labrar un nuevo camino en mí destino.

Dios nos Guarde y Bendiga.

*Jucita Espinosa Echeverri*

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCION.....  | 13 |
| 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....  | 15 |
| 1.1 DESCRIPCION ACERCA DEL FENOL.....  | 15 |
| 1.2 TOXICIDAD DEL FENOL:.....  | 18 |
| 1.2.1 Efectos del Fenol en la salud humana .....   | 20 |
| 1.2.2 Efectos del Fenol en el medio ambiente .....   | 20 |
| 1.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS CON FENOLES .....   | 22 |
| 1.3.1 Extracción.....  | 22 |
| 1.3.2 Adsorción. (Transferencia de masa del contaminante en fase acuosa<br>hacia una superficie sólida – adsorbente) ..... | 23 |
| 1.3.3 Intercambio iónico .....   | 23 |
| 1.3.4 Tratamiento electroquímico .....   | 24 |
| 1.3.5 Oligomerización enzimática.....  | 24 |
| 1.3.6 Biodegradación .....   | 24 |
| 1.3.7 Incineración. ....   | 25 |
| 1.3.8 Procesos de oxidación convencionales.....  | 25 |
| 1.3.9 Tecnologías avanzadas de oxidación (TAO'S).....  | 26 |
| 1.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO NATURALES .....  | 27 |
| 1.4.1 Sistemas de riego superficial.....   | 28 |
| 2. ANTECEDENTES DEL MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE CAMPO<br>ARAUCA .....  | 30 |
| 2.1 ANTECEDENTES TÉCNICOS.....   | 31 |
| 3. RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE LOS RESULTADOS HISTÓRICOS DE LAS<br>CONCENTRACIONES DE FENOLES. ....                          | 34 |
| 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO<br>DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE CAMPO ARAUCA .....      | 35 |
| 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....   | 37 |
| 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES DEL<br>ÁREA DE INFLUENCIA DIRECTA.....                            | 39 |
| 4. METODOLOGÍA.....  | 43 |
| 4.1 DEFINICIÓN DEL TIPO DE TECNOLOGÍAS A APLICAR. ....   | 43 |
| 4.1.1 Procesos de Oxidación Avanzada (POA O Advanced Oxidation<br>Processes - AOP).....                                    | 46 |
| 4.1.2 La radiación solar .....   | 52 |
| 4.1.3 Procesos fotoquímicos aplicables a la monografía .....   | 54 |
| 4.1.4 Proceso de biorremediación de Fenoles .....  | 58 |
| 4.1.5 Combinación de tecnologías: procesos de oxidación avanzada – poa<br>y biorremediación .....                          | 63 |
| 4.1.6 Vías de degradación del Fenol y sus productos de degradación.....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS COMBINADAS (FOTÓLISIS Y BIORREMEDIACIÓN) EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE CAMPO ARAUCA.....   | 68 |
| 4.2.1 Primera fase: ampliación del sistema de aireación adicional (anillo perimetral) e instalación de la red fotolítica en la piscina de aireación existente. .... | 68 |
| 4.2.2 Segunda fase: instalación de aireadores superficiales. ....   | 69 |
| 4.2.3 Tercera fase: siembra de Fenobiol (bacterias fenólicas) para la degradación de Fenoles. ....  | 71 |
| 4.2.4 Nuevo esquema del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca.....  | 75 |
| 4.3 CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE FENOLES POSTERIOR A LA APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS.....   | 76 |
| 4.4 PRUEBAS DE REMOCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS APLICADAS. ....  | 80 |
| 4.4.1 Metodología de las pruebas. ....  | 80 |
| 4.4.2 Resultados de los análisis de Fenoles realizados durante las pruebas.....   | 81 |
| 4.5 ESQUEMA RECOMENDADO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.....  | 84 |
| 5. CONCLUSIONES.....  | 85 |
| 6. RECOMENDACIONES.....   | 88 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA.....  | 90 |
| ANEXOS.....   | 96 |
| ANEXO A. REGISTRO FOTOGRÁFICO   |    |
| ANEXO B. DATOS DE SALIDA DEL MODELO PIPE PHASE - SIMSEL   |    |
| ANEXO C. CÁLCULO DEL DISEÑO DE LOS AIREADORES SUPERFICIALES.  |    |
| ANEXO D. FICHA DE SEGURIDAD DEL FENOBIOL  |    |
| ANEXO E. FICHA DE SEGURIDAD DEL TRIPLE 7  |    |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Características del Sistema de riego superficial .....   | 28 |
| Tabla 2. Coordenadas del Área de influencia directa del Campo Arauca (Origen 3Este).....  | 30 |
| Tabla 3. Evolución histórica del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca.....   | 32 |
| Tabla 4. Resultados de los Análisis Fisicoquímicos de las Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca (2.005).....   | 35 |
| Tabla 5. Resultados de los Análisis Fisicoquímicos de las Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca (2.006).....   | 36 |
| Tabla 6. Resultados de los Análisis Fisicoquímicos de los Piezómetros de la Estación Campo Arauca.....  | 38 |
| Tabla 7. Resultados de los Análisis Fisicoquímicos del Caño Quemadero.....  | 40 |
| Tabla 8. Resultados Análisis Fisicoquímicos del Caño Verde 100 m Aguas Arriba.....  | 41 |
| Tabla 9. Resultados Análisis Fisicoquímicos del Caño Verde 100 m aguas abajo.....   | 41 |
| Tabla 10. Tecnologías para la remoción de Fenoles propuestas.....   | 45 |
| Tabla 11. Procesos de Oxidación Avanzada.....   | 47 |
| Tabla 12. Resultados de las concentraciones de Fenoles y de los recuentos bacteriológicos iniciales de las aguas residuales industriales del Campo Arauca y en las aguas de los pozos Arauca 1, 2 y 3.....        | 74 |
| Tabla 13. Resultados de las concentraciones de Fenoles a la entrada y a la salida Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca, después de instaladas las tecnologías combinadas..... | 77 |
| Tabla 14. Resultados de la concentración de Fenoles en las aguas residuales industriales de Campo Arauca durante la ejecución de las pruebas.....   | 83 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Estructura del Fenol.....  | 16 |
| Figura 2. Localización del área de influencia directa del Campo Arauca.....  | 31 |
| Figura 3. Esquema definitivo del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales – Noviembre de 2.006..... | 33 |
| Figura 4. Mecanismo de Fotocatálisis Heterogénea, mediante el uso del catalizador $TiO_2$ .....                    | 48 |
| Figura 5. Esquema General de un Sistema de Fotocatálisis para el de contaminantes en agua.....                     | 50 |
| Figura 6. Ilustración de los fenómenos básicos en las biopelículas.....  | 63 |
| Figura 7. Modelo de reacción en series paralelas.....  | 66 |
| Figura 8. Compuestos formados del proceso de oxidación del Fenol.....  | 67 |
| Figura 9. Ampliación de anillo de aspersión de la piscina de aireación.....  | 69 |
| Figura 10. Partes del equipo de aireación de alta eficiencia.....  | 70 |
| Figura 11. Piscina de aspersión mejorada.....  | 71 |
| Figura 12. Nuevo esquema del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca.....          | 75 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1. Comportamiento de la remoción de Fenoles y el cumplimiento del decreto 1594 de 1.984.....  | 37 |
| Gráfico 2. Comportamiento del oxígeno disuelto durante el escalado del Fenobiol.....  | 72 |
| Gráfico 3. Remoción de Fenoles y cumplimiento del decreto 1594 de 1.984, en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca, una vez instaladas las tecnologías combinadas..... | 77 |
| Gráfico 4. Concentración y porcentaje de remoción de Fenoles durante la ejecución de las pruebas en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Campo Arauca.....                                      | 80 |

## RESUMEN

**TITULO:** APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS COMBINADAS PARA LA REMOCIÓN DE FENOLES EN LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO ARAUCA - ECOPETROL S.A.\*

**AUTOR:** JULIETA DEL ROCÍO GONZÁLEZ GUZMÁN – Ingeniera Ambiental y Sanitaria\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Vertimientos industriales, petróleo, fenoles, fotólisis, biorremediación, tecnologías combinadas.

### DESCRIPCIÓN

El Campo de Producción Arauca pertenece al Departamento de Operaciones Catatumbo – Gerencia Catatumbo Orinoquía - Vicepresidencia de Producción de ECOPETROL S.A. Actualmente cuenta con tres pozos productores de Petróleo, que generaron para el año 2.007 un promedio diario de 280 Barriles de aceite y 2.800 barriles de agua residual.

La eficiencia del Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción de Hidrocarburos es aceptable con respecto al cumplimiento de todos los parámetros requeridos en el decreto 1594 de 1.984, excepto las concentraciones de Fenoles, ya que los monitoreos trimestrales (realizados por ECOPETROL S.A. entre Julio de 2.005 y Noviembre de 2.006) reportan valores entre 8,77 a 0,274 mg/L. (Valor Decreto 1594/84: 0,2 mg/L).

Con el fin de mejorar esta situación se optimizaron los procesos que se llevaban a cabo en la piscina de aireación, implementando de forma simultánea la Fotólisis y la Biorremediación de los Fenoles; se observó que la tendencia en la reducción de la concentración de Fenoles es positiva, lográndose el cumplimiento del decreto.

Una vez normalizado el Sistema se desarrollaron pruebas preliminares, para observar el efecto en la remoción de Fenoles cuando se suspende la Fotólisis. Según los resultados se presume que la Biorremediación participa prioritariamente en la remoción de Fenoles y que la Fotólisis los degrada en una proporción significativamente menor. Sin embargo, la poca fluctuación de las concentraciones de Fenoles da lugar a una segunda discusión y es la demanda de los Fenoles no fotolizados por parte de la población bacteriana presente en la biopelícula formada en el fondo de la piscina. Es necesario realizar un estudio detallado ya que no se debe descartar la participación de la Fotólisis en la degradación de los Fenoles.

---

\* Monografía para optar al título como Especialista en Química Ambiental

\*\* Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química, Director Monografía: Esp. Ricardo Restrepo

## SUMMARY

**TITLE:** APPLICATION OF MIXED TECHNOLOGIES FOR REMOVING PHENOLS FROM INDUSTRIAL DUMPING IN CAMPO ARAUCA – ECOPETROL S.A.\*.

**AUTHOR:** JULIETA DEL ROCIO GONZÁLEZ GUZMÁN – Environmental and Sanitary Engineer\*\*

**KEY WORDS:** industrial waste, petroleum, phenols, photolysis, bioremediation, mixed technologies.

## DESCRIPTION

Campo de Producción Arauca belongs to the Operation Department Catatumbo – Catatumbo Orinoquía Management – vice-presidency of production of ECOPETROL S.A. Nowadays, it consists of three petroleum wells that generated a daily average of 280 oil barrels and 2.800 sewage water barrels in the year 2.007.

The efficiency of the treatment system for production water of hydrocarbures is accepted with regard to the performance of all parameters required en the decree 1594 of 1.984, with the exception of phenols concentrations due to the fact that quarterly monitoring (carried out by ECOPETROL S.A. between July in 2.005 and November in 2.006) reported values from 8,77 to 0,274 mg/L (Decree Value 1594/84: 0,2 mg/L).

With the purpose of improving this situation, it was optimized the processes carried out in the ventilation pool, implementing in a simultaneous way the photolysis and bioremediation of phenols. It was observed that the tendency in the reduction of phenols concentration is positive, achieving the performance of the decree.

Once the system was normalized, it was developed some preliminary proofs to observe the effect in removing phenols when the photolysis is stopped. According to the results it is assumed that the bioremediation priority participates in removing phenols; and the photolysis diminishes them in a significant smaller proportion. However, the little fluctuation of phenols concentration promotes a further discussion which is the demand of no photolyzed phenols from the part of bacterium population present in the biofilm formed at the bottom of the pool. It is needed to carry out a detailed study because it can not be ruled out the participation of photolysis in phenols diminishing.

---

\* Monograph to apply for Specialist in Environmental Chemistry

\*\* Faculty of Sciences, Chemical Engineering School. Monograph director: Esp. Ricardo Restrepo.

## INTRODUCCION

La presencia permanente en el medio ambiente de sustancias de interés sanitario como los Fenoles, es el resultado de una serie de procesos que determinan su destino (Tadeo, 1.994):

- Degradación: química, biológica y fotolítica.
- Transporte: Volatilización, escorrentía y lixiviación
- Adsorción: En el suelo; asociado a los componentes orgánicos y minerales que forman parte de éste.
- Absorción: por la planta. Es la principal fuente de bioacumulación en la cadena alimentaria y una ruta importante de exposición a los animales y humanos (Paterson y Col. 1.990).

Muchas actividades antropogénicas como la explotación y refinación de hidrocarburos, emiten Fenoles al medio ambiente, que pueden participar en la contaminación de un ecosistema o en algunos casos logran ser degradados en forma natural (Teoría Gaia). Debido a que estas actividades son básicas para suplir la mayor parte de la demanda energética mundial, es necesario tomar medidas preventivas y de control en los procesos industriales, para reducir el vertimiento de estas sustancias a la naturaleza y evitar niveles de toxicidad que afecten la salud humana y el equilibrio ecológico.

Esta monografía presenta el caso del Campo Arauca de ECOPETROL S.A., cuyo efluente industrial tenía concentraciones de Fenoles superiores al valor establecido por la Normatividad Ambiental Colombiana (Decreto 1594 de 1.984). Para mejorar el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales se desarrolló la siguiente metodología: 1. Recopilación y revisión de los resultados históricos de las concentraciones de Fenoles en el Sistema de Tratamiento de

Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca, 2. Definición acerca del tipo de tecnologías a aplicar (Revisión bibliográfica acerca de los Procesos de Oxidación Avanzada – POA, la Biorremediación y las vías de degradación de los Fenoles), 3. Implementación de la Fotólisis y la Biorremediación en el Sistema de Tratamiento, 4. Control y seguimiento de las concentraciones, 5. Pruebas de remoción de las tecnologías aplicadas y 6. Esquema recomendado del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales.

## 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las aguas residuales generadas en un campo de producción de hidrocarburos, se constituyen como la mayor corriente de residuos de esta actividad; para el Campo Arauca se tiene una producción de hidrocarburo con cortes de agua entre el 75% al 95%.

Las aguas de producción son complejas con una gran cantidad de componentes suspendidos y disueltos que incluyen: aceite, metales pesados, químicos de producción, oxígeno disuelto y compuestos orgánicos como los Fenoles.

### 1.1 DESCRIPCIÓN ACERCA DEL FENOL

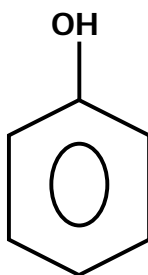
El Fenol ( $C_6H_5OH$ , ver figura 1 – siguiente página), es una sustancia incolora en la que uno o más átomos de hidrógeno del núcleo aromático se han reemplazado por el radical OH, que inicialmente se denominó ácido carboxílico y fue descubierto por Runge<sup>1</sup> en el año de 1.834, en el alquitrán de la hulla. Se diferencia de los alcoholes por tener un grupo OH unido directamente a su anillo aromático, se puede transformar fácilmente en éteres o ésteres. Por sus condiciones de aromaticidad es bastante estable, el anillo aromático del Fenol tiene una densidad electrónica superior a la del benceno, debido al efecto resonante dador del oxígeno fenólico. Los Fenoles son muy solubles en el agua, en la mayoría de solventes orgánicos, son cáusticos y muy venenosos (p.e. en presencia de cloro se transforma en cloroFenol) y en algunos casos se presentan como resultado de la polución de residuos del tratamiento de crudo extraído del

---

<sup>1</sup> Gates Anderson Dianne, D; Siegrist Robertt, Cline Steven. Comparison of potassium permanganate and hydrogen peroxide as chemical oxidants for organically contaminates soils. En: Journal of e. e. 127 (4), (2.001), 337-347.

subsuelo, se usan como disolventes para aceites lubricantes refinados, ácido salicílico, pentacloroFenol (herbicidas), pinturas, germicidas, productos farmacéuticos, reactivos de laboratorio, biocida y desinfectante en general. El Fenol podría considerarse formalmente como un alcohol vinílico o enol muy estable. Su elevada estabilidad contrasta con la inestabilidad generalizada de los enoles "normales", que se encuentran en equilibrio con la correspondiente cetona o aldehído, en general más estables. ¿Por qué el Fenol es más estable que su correspondiente cetona? La 2,4-ciclohexadienona no es aromática. El carbono sp<sup>3</sup> rompe la conjugación. El Fenol sí cumple todas las condiciones de la aromaticidad y por ello en este caso el Fenol es mucho más estable que la correspondiente cetona. El anillo aromático del Fenol tiene una densidad electrónica superior a la del benceno, debido al efecto resonante dador del oxígeno fenólico. [59]

**Figura 1. Estructura del Fenol.**



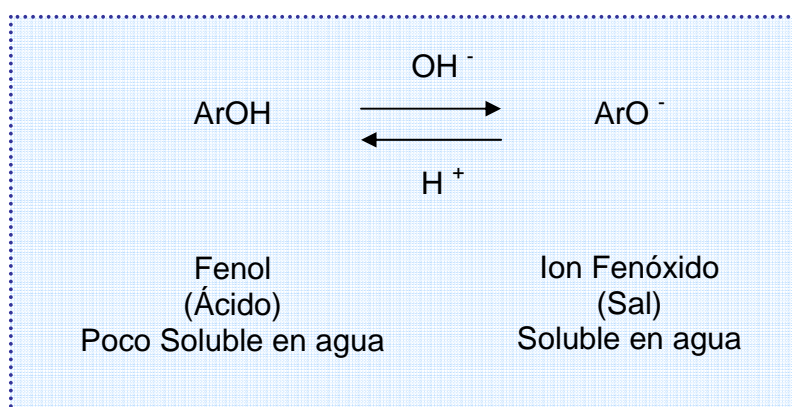
**Propiedades físicas.** Se encuentran en estado líquido o sólido de bajo punto de fusión, pero con elevados puntos de ebullición debido al puente de hidrógeno que se forma entre la molécula de agua y el grupo – OH; es más soluble en agua que los otros Fenoles, con una solubilidad de 7g en 100g de agua a 25°C, debido también a esta forma particular de interacción que es similarmente observable en los alcoholes. La solubilidad comparativamente baja de estos compuestos, aumenta a medida que se incrementa el número de grupos – OH en el anillo aromático (hidroquinona, catecol y resorcinol, solubilidad a 25°C de 8, 45 y 123 g en 100g de agua, respectivamente). El Fenol puro comúnmente son sólidos cristalinos, incoloros, pero debido a que presenta una rápida oxidación a

compuestos orgánicos, su coloración cambia a rosa o café debido a las impurezas presentes en la oxidación.

**Propiedades químicas.** Son altamente reactivos, generalmente como oxidación y formación de sales y ésteres.

*Formación de sales:* Se presenta la ruptura del enlace oxígeno-hidrógeno del grupo –OH, teniéndose en cuenta que los Fenoles poseen carácter ácido, gracias a la relativa estabilidad de los aniones, las bases conjugadas que se forman en la ionización, y en el efecto de solvatación. En la siguiente ecuación se evidencia la conversión del Fenol en su sal (Ecuación 1):

**Ecuación 1. Conversión del Fenol en su sal.**



*Formación de Esteres y Éteres:* Debido a la baja eficiencia para obtener éteres a partir de Fenoles por vía directa, es necesario obtenerlos por vía indirecta, mediante la reacción de estos con cloruros y anhídridos de ácido.

Los ésteres se forman por acción de los cloruros de ácidos con los Fenolatos alcalinos. La esterificación es muy importante, ya que muchos productos como grasas, aceites vegetales y ceras, pertenecen a este tipo de compuestos, los cuales son la base de los productos industriales plásticos y resinas.

*Oxidación:* se desarrolla mediante la deshidrogenación o por adición de un oxidante como el cloro, el permanganato de potasio o incluso el oxígeno, obteniéndose como producto, a través de una reacción reversible, la benzoquinona, compuesto de color amarillo. Las benzoquinonas sustituidas son amarillas, naranjas o rojas. Su fácil formación es la causa de la aparición de impurezas de color en la mayoría de las muestras de Fenoles.

## **1.2 TOXICIDAD DEL FENOL:**

A continuación se informa su toxicidad por todas las rutas en diferentes organismos de experimentación<sup>2</sup>:

- DL<sub>50</sub> (oral, ratas) = 317 mg/Kg.
- DL<sub>50</sub> (oral, gato) = 100 mg/Kg.
- DL<sub>50</sub> (oral, perro) = 500 mg/Kg.
- DL<sub>50</sub> (piel, conejo) = 630 mg/Kg.
- CL<sub>50</sub> (inhalación, rata) = 316 mg/Kg.
- DLo (oral, humanos) = 140 mg/Kg.

Para determinar los efectos potenciales para la salud de la fauna, flora y población que residen cerca de sitios donde se disponen residuos químicos tóxicos, se requiere de la identificación de los materiales dispuestos (número, tipo y volumen, mecanismo y período de tiempo de disposición y cantidades que aún están presentes en el medio) y de las condiciones de exposición de los asentamientos humanos (Proximidad de las comunidades y actividades humanas como pesca, agricultura y caza, geología del área, corrientes superficiales, aguas subterráneas, aire o contacto directo, fugas presentes en la zona donde se disponen los residuos

---

<sup>2</sup> Tomado de Hoja de datos de seguridad, base de datos DATAQUIM, revisión 2.003.

químicos, la persistencia biológica del medio de disposición, las condiciones meteorológicas y las fuentes de agua que proveen a los habitantes en comunidades vecinas). También es importante evaluar la exposición acumulativa y continua para seres, aún cuando la exposición ambiental ha cesado, esto se hace evaluando ciertos tejidos del organismo (concentración a nivel de tejidos). Los efectos adversos generados por el Fenol son hipopigmentación<sup>3</sup>, irritación en la piel (dermatitis), anemia (sistema alifático)<sup>4</sup> y sensibilidad de asma<sup>5</sup>. En el año 1.974, en la ciudad de Wisconsin ocurrió un derrame accidental de Fenol, que era transportado en un ferrocarril y posteriormente se registraron concentraciones de Fenol en el agua potable que consumía esta comunidad. Se revisaron las consecuencias durante los seis meses de ocurrido este evento encontrándose diarrea, salpullidos, conjuntivitis, heridas de la boca, orina oscura y ardor en la boca, sin embargo estos diagnósticos se realizaron sin prever el contacto con esta sustancia<sup>6</sup>.

Un estudio realizado en Polonia demostró que los fetos y los niños son más afectados a ciertos tóxicos presentes en el medio ambiente que la población adulta, debido a la exposición de la madre y a su inmadurez fisiológica. Realizaron un estudio en el que incluyeron a 160 madres y 160 recién nacidos expuestos a Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), material particulado y humo de cigarrillo. El aire contaminado fue asociado significativamente con las cantidades de los límites de PAH para la aducción al ADN, analizadas en los glóbulos blancos

---

<sup>3</sup> Calnan, C. D. Occupational leucoderma from alkyl phenols. En: Proc. Roy. Soc. Med. 66, (1.973), 258-260.  
Ikeda, M., Ohtsujhi, H., and Miyahara, S. Two cases of leucoderma, presumably due to nonyl or octylphenol in synthetic detergents. En: Ind. Health. 8, (1.970), 192-196.  
Kahn, G. Depigmentation caused by phenolic detergent germicides. En: Arch. Dermatol. 102, (1.970), 177-187.

<sup>4</sup> Fisher, B. The significance of Heinz bodies in anemia of obscure etiology. En: Am. J. Med. Sci. 230, (1.955), 143-146.

<sup>5</sup> Brooks, S. N. Bronchial asthma of occupational origin. En: Environmental and Occupational Medicine (W. N. Rom, Ed.). Little, Brown and Co. (1.983), pp. 223-250.

<sup>6</sup> Buffer Patricia A., Martin Crane, and Marcus M. Key. Possibilities of Detecting Health Effects by Studies of Populations Exposed to Chemicals from Waste Disposal Sites. En: E. H. Perspectives. 62, (1.985), 423-456.

de los niños y en el cordón umbilical de las madres. En los recién nacidos se observaron altas aducciones de PAH-ADN y se redujo el peso, la longitud del cuerpo y la circunferencia de la cabeza del recién nacido (correlación con el cociente intelectual bajo) significativamente.<sup>7</sup>

### **1.2.1 Efectos del Fenol en la salud humana<sup>8</sup>**

El Fenol se ha clasificado como no cancerígeno por NTP, carcinógeno grupo 3 IARC, no clasificable como carcinógeno humano, grupo A4 ACGIH. El producto es considerado teratogénico y causante de efectos reproductivos de acuerdo a ensayos de laboratorio con células y animales de laboratorio. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) y la Comunidad Económica Europea consideran al Fenol como contaminante prioritario (1, 2).

Sin embargo, el Fenol puede tener efectos beneficiosos en las personas, cuando se usa por razones médicas. El Fenol es un antiséptico (mata bacterias) cuando se aplica en pequeñas cantidades sobre la piel y puede tener propiedades antisépticas cuando se usa como enjuagadientes. El Fenol es un anestésico (alivia el dolor) y es un componente de algunas pastillas o aerosoles para el dolor de garganta. Cantidades pequeñas de Fenol en agua pueden inyectarse en nervios para aliviar el dolor asociado con ciertos trastornos de los nervios.

### **1.2.2 Efectos del Fenol en el medio ambiente**

Es altamente tóxico para la vida acuática en medias concentraciones. A continuación se presentan las concentraciones de Toxicidad Acuática<sup>9</sup>:

---

<sup>7</sup> Perera F. P., Jedrychowski W., Rauh V., and Robin M. W. Molecular Epidemiologic Research on the Effects of Environmental Pollutants on the Fetus. En: Environmental H. P. 107(3), (1.999), 114- 451.

<sup>8</sup> Tomado de Hoja de datos de seguridad, base de datos DATAQUIM, revisión 2.003.

<sup>9</sup> Tomado de Hoja de datos de seguridad, base de datos DATAQUIM, revisión 2.003.

- TLM= 10-100 ppm/96h/agua fresca.
- CL<sub>50</sub>= 46 ppm/24h/Pez dorado/agua fresca.

Cuando se emite al aire, se degrada rápidamente por la reacción con los radicales hidroxílicos producidos fotoquímicamente, es decir puede ser moderadamente degradado por Fotólisis. Cuando se emite al aire, los Fenoles tienen una vida media menor de 1 día.

Cuando se elimina en el suelo, se espera que este material se biodegrade rápidamente y más aún, en presencia de bacterias selectivas para estos compuestos. No se espera que se filtre en las aguas subterráneas cuando se elimina en el suelo. Este material puede evaporarse en grado moderado. Se estima tenga una vida media en suelo entre 1 y 10 días. Cuando se elimina en el agua, éste se biodegradará rápidamente. Los compuestos fenólicos tienen un factor de bioconcentración estimado (BCF) inferior a 100, es decir, no se bioacumula significativamente.

Se tiene que los Fenoles están presentes en el reino vegetal, ya que los tejidos de la planta pueden contener varios gramos por kilogramo. Los estímulos externos como las infecciones microbianas, radiación ultravioleta, y el stress químico inducen su síntesis. Los Fenoles están constituidos por resveratrol, flavonoides, y furanocoumarinos, cuyas funciones ecológicas son diversas, pero afectan la salud humana. Dentro de las funciones de ecológicas está la defensa contra los microbios patógenos y los animales herbívoros. Los efectos favorables en el hombre son la reducción de la densidad de las lipoproteínas (reducen el riesgo de enfermedades coronarias) y el incremento de las plaquetas. Los efectos adversos son mutagénesis, carcinogénesis y fototoxicidad. La síntesis de Fenoles en las

plantas puede variarse por la aplicación de herbicidas y, en menor grado, insecticidas y fungicidas.<sup>10</sup>

### **1.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS CON FENOLES <sup>11</sup>**

En general existen tres formas para remover la mayor cantidad de contaminantes fenólicos de las aguas residuales: La retención (adsorción) sobre un agente externo cuya reutilización o disposición final esté asegurada, el uso de agentes físicos que destruyen químicamente las moléculas hasta llevarlas a subproductos menos contaminantes y técnicas que se basan en el aprovechamiento de la capacidad de los Fenoles para reaccionar con otras sustancias dando lugar a compuestos de menor solubilidad, dentro de ellas se destaca el tratamiento biológico.

Debido a las bondades fisicoquímicas y de calidad de estas aguas con parámetros como los cloruros, temperatura y sólidos, resulta viable implementar cualquiera de estos procesos o una combinación de estos.

#### **1.3.1 Extracción**

Para la remoción del Fenol, se trabaja con un solvente y el cual se pone en contacto con el Fenol en fase acuosa, dando lugar a una transferencia de masa del contaminante desde la fase acuosa hacia el solvente, por el cual el Fenol tiene gran afinidad. Este método se argumenta cuando la concentración es superior a 1.000 mg/l, sin embargo se presentan problemas de contaminación por las

---

<sup>10</sup> Daniel Otto, Matthias Samuel Meier, A Josef Schlatter and Peter Frischknecht. Selected Phenolic Compounds in Cultivated Plants: Ecologic functions, Health Implications, and Modulation by Pesticides. En: E. H. Perspectives. 107. (1), (1.999), 109-114.

<sup>11</sup> Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatálisis heterogénea a los procesos de remoción de Fenoles en medio acuoso. Página web: Monografias.com

pérdidas de solvente y quedan Fenoles presentes en el agua en niveles hasta de cientos de mg/l.

### **1.3.2 Adsorción. (Transferencia de masa del contaminante en fase acuosa hacia una superficie sólida – adsorbente)**

La eficiencia de este método depende de tres variables: tipo de adsorbente, del contaminante y de la temperatura. Los compuestos fenólicos se pueden adsorber sobre una serie de materiales como carbón activado, resinas poliméricas sintéticas y biopolímeros. Estos materiales pueden ser reutilizados, posteriormente sea limpiado el Fenol presente en ellos, sin embargo es necesario definir la disposición final de estos residuos y en el menor tiempo posible regenerar este material, razones por las cuales incrementarían los costos de éste método. Adicionalmente se generan obstrucciones hidráulicas en las unidades de tratamiento y se crea la necesidad la necesidad de adicionar material para compensar dichas pérdidas. Existe un tipo de material adsorbente definidos como poliméricos sintéticos, que poseen una alta selectividad y mayor resistencia mecánica, sin embargo son altamente costosos.

### **1.3.3 Intercambio Iónico**

Este tipo de tratamiento se utiliza para la remoción de Fenoles en estado ionizado y cuando la concentración de Fenol es superior a 1.000mg/l. Este tratamiento se basa en el intercambio de un ion en la estructura del material de intercambio, por un ión en solución. Debido a que el material de intercambio debe regenerarse, el Fenol se obtiene a mayor concentración e igualmente si los caudales de agua a tratar son altos, el área a disponer para construir el intercambiador es extensa, los costos se incrementan considerablemente, siendo ésta su principal desventaja.

#### **1.3.4 Tratamiento electroquímico**

El tratamiento electroquímico es llevado a cabo aplicando una corriente o una diferencia de potencial entre dos metales llamados electrodos. En uno de ellos ocurre una reacción de oxidación (ánodo) mientras que en el otro tiene lugar una reacción de reducción (cátodo). Presenta como desventajas el alto costo y consumo de energía.

#### **1.3.5 Oligomerización enzimática**

Este tratamiento consiste en que ciertas sustancias (óxidos de magnesio y de hierro y manganeso, y enzimas - polimerasas) toman del medio oxígeno elemental y desarrollan una oxidación secuencial, formando enlaces C – O – C entre anillos fenólicos, generando compuestos de mayor peso molecular. La desventaja de éste método es que se debe garantizar temperaturas inferiores a 40° C, pH entre 6.5 y 7.5 y la concentración del alimento no superior a 200 ppm., para evitar una disminución en la actividad enzimática, que tiene carácter irreversible.

#### **1.3.6 Biodegradación**

Como su nombre lo indica es un proceso biológico, en el cual, microorganismos utilizan los compuestos fenólicos presentes en el agua (en este caso el contaminante) como fuente de carbono y energía y los transforman en biomasa, gas carbónico, agua y otros intermediarios.

En algunos casos, los compuestos fenólicos generan toxicidad en los microorganismos biodegradadores, aun a concentraciones bajas (< 200mg/L), afectando gravemente el proceso. Igualmente en estas aguas existen Fenoles que son recalcitrantes o no biodegradables, y otros compuestos pueden también afectar el porcentaje de remoción del proceso.

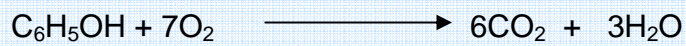
Se debe tener en cuenta que la biodegradación es muy sensible a cambios imprevistos en las concentraciones del vertimiento a tratar, pues pueden actuar

como biocidas o disminuir considerablemente la velocidad del proceso. Otras de las desventajas de este proceso son: la necesidad de contar con grandes volúmenes de almacenamiento ya que el período de residencia es de varios días, el incremento en los sólidos suspendidos y la turbiedad, el color, la salinidad y alta generación de lodo.

### 1.3.7 Incineración.

La incineración es una técnica usada para la destrucción de Fenoles y de compuestos aromáticos clorados. El Fenol se destruye transformándose en dióxido de carbono y agua (Ecuación 2):

#### Ecuación 2. Incineración del Fenol.



La EPA exige 1.600°C como temperatura de operación para este proceso, lo que convierte a esta opción una forma costosa de tratamiento, además se producen algunos subproductos por la combustión incompleta. La incineración catalítica puede llevarse a cabo a temperaturas más bajas, pero los átomos de cloro producto de la combustión envenenan o reducen la capacidad de la mayoría de los catalizadores.

### 1.3.8 Procesos de Oxidación Convencionales

Como su nombre lo indica, en estos procesos los Fenoles son transformados a través de la oxidación en productos inofensivos como agua y dióxido de carbono. Se utilizan generalmente reactivos como ozono, hipocloritos, permanganatos, peróxido, y algunas combinaciones de estos. Sus desventajas son: alta demanda

de reactivos que incrementa los costos, su posterior separación de las aguas y el control en el proceso.

### **1.3.9 Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAO's)**

Las Tecnologías Avanzadas de Oxidación (TAO's) se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios fundamentales en la estructura química de los contaminantes.

Dentro de las ventajas de las nuevas tecnologías sobre los métodos convencionales, se encuentran:

- ✓ No sólo cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre con aire o en el tratamiento con carbón activado), sino que lo transforman químicamente.
- ✓ Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- ✓ Usualmente no generan lodos que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- ✓ Son muy útiles para contaminantes refractarios (recalcitrantes) que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- ✓ Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
- ✓ No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- ✓ Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- ✓ Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- ✓ En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).

- ✓ Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos como el tratamiento biológico.
- ✓ Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.

Las TAOs son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico de pulimento o como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos de agua receptores.

Un método que ha probado ser eficiente, de fácil implementación y de costo muy racional es la Fotocatálisis combinada con reacciones de óxido-reducción, el cual dependiendo de los tiempos de residencia hidráulicos, las horas sol y la exposición, puede llegar a remover valores significativos de Fenoles en aguas de proceso. El Instituto Colombiano del Petróleo – ICP- realizó unas pruebas piloto utilizando unas boquillas de aspersion fina pero no al nivel nebulizante y obtuvo una fotólisis del 63% en 31 horas de tratamiento. Se espera que la eficiencia aumente significativamente al nebulizar más la gota de agua.

#### **1.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO NATURALES**

El medio ambiente es el resultado de la interacción del agua, suelo, plantas, microorganismos y la atmósfera. Los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar estos procesos con objeto de proporcionar tratamiento al agua residual. Además de los procesos físico - químicos (sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, oxidación y reducción química, conversión y descomposición biológicas) que intervienen en el sistema de tratamiento natural, se presenta la fotosíntesis, la foto- oxidación y la asimilación por parte de las plantas.

Estos sistemas de tratamiento naturales datan del año 1.880, en países como Estados Unidos, Alemania, Inglaterra, Australia, México, Francia, Polonia, entre

otros. Algunos ejemplos son: las granjas en las que el agua residual tratada se utilizaba para el riego de cultivos, el riego de parques y jardines o la recarga de acuíferos en zonas donde el agua residual era un recurso hídrico con ventaja adicional. Los avances más recientes del tratamiento natural son terrenos pantanosos artificiales con plantas emergentes y sistemas acuáticos con plantas flotantes.

#### 1.4.1 Sistemas de riego superficial

En este tipo de sistema de tratamiento natural, el agua residual se distribuye en la zona superior de los terrenos vegetados con pendientes cuidadosamente seleccionadas, de modo que pueda fluir en superficie hasta unas zanjas de recogida de la escorrentía superficial situada en el extremo de la pendiente. Se adapta a un amplio rango de permeabilidades ya que el terreno tiene la tendencia a impermeabilizarse con el paso del tiempo. Por lo tanto la percolación en el terreno es una vía hidráulica menor, y la mayor parte del agua aplicada se recoge en forma de escorrentía superficial. Parte del agua se pierde por evapotranspiración en un porcentaje variable que depende del clima de la región y de la estación del año. La distribución del agua residual se puede llevar a cabo mediante aspersores de alta carga, rociadores de baja presión, o métodos superficiales como tuberías provistas con orificios. (Ver características Tabla 1)

**Tabla 1. Características del Sistema de riego superficial**

| CARACTERÍSTICA                                    | DESCRIPCIÓN              |
|---|--------------------------|
| Profundidad hasta el nivel freático <sup>12</sup> | No crítica.              |
| Pendiente   | 1% – 8%                  |
| Permeabilidad Suelo                               | Baja a moderada.         |
| Técnicas de aplicación                            | Aspersión o superficial. |

<sup>12</sup> La distancia del nivel freático debe ser como mínimo de 0,3 a 0,6 m, para permitir la existencia de distancia suficiente para el tratamiento de todo percolado que pueda entrar en contacto con las aguas subterráneas y para evitar la saturación en la zona radicular.

| <b>CARACTERÍSTICA</b>                                      | <b>DESCRIPCIÓN</b>  |
|--|---|
| Carga hidráulica anual, m/año                              | 7,3 – 56,7.   |
| Superficie necesaria ha/ 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /d | 0,65 – 4,8  |
| Pretratamiento mínimo necesario                            | Desbaste.   |
| Evacuación del agua residual aplicada                      | Escorrentía superficial, evaporación, evapotranspiración con algo de percolación. |
| Necesidad de vegetación                                    | Necesaria.  |

## 2. ANTECEDENTES DEL MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE CAMPO ARAUCA

El Campo de Producción Arauca se encuentra ubicado en jurisdicción del municipio de Saravena - departamento de Arauca (ver Tabla 2 – Coordenadas del polígono del área de influencia directa). Es operado por ECOPETROL S.A. y pertenece al Departamento de Operaciones Catatumbo – Gerencia Catatumbo Orinoquía - Vicepresidencia de Producción. Actualmente cuenta con tres pozos productores (Arauca 1, 2 y 3), que generaron para el año 2.007 un promedio diario de 280 Barriles de aceite. (Anexo A - Foto 1)

El Campo Arauca genera diariamente un volumen de 2.800 barriles de agua de producción, provenientes de la separación del crudo y que una vez tratados son irrigados sobre un campo de Infiltración (zona de pastos), constituyéndose en un vertimiento no puntual.

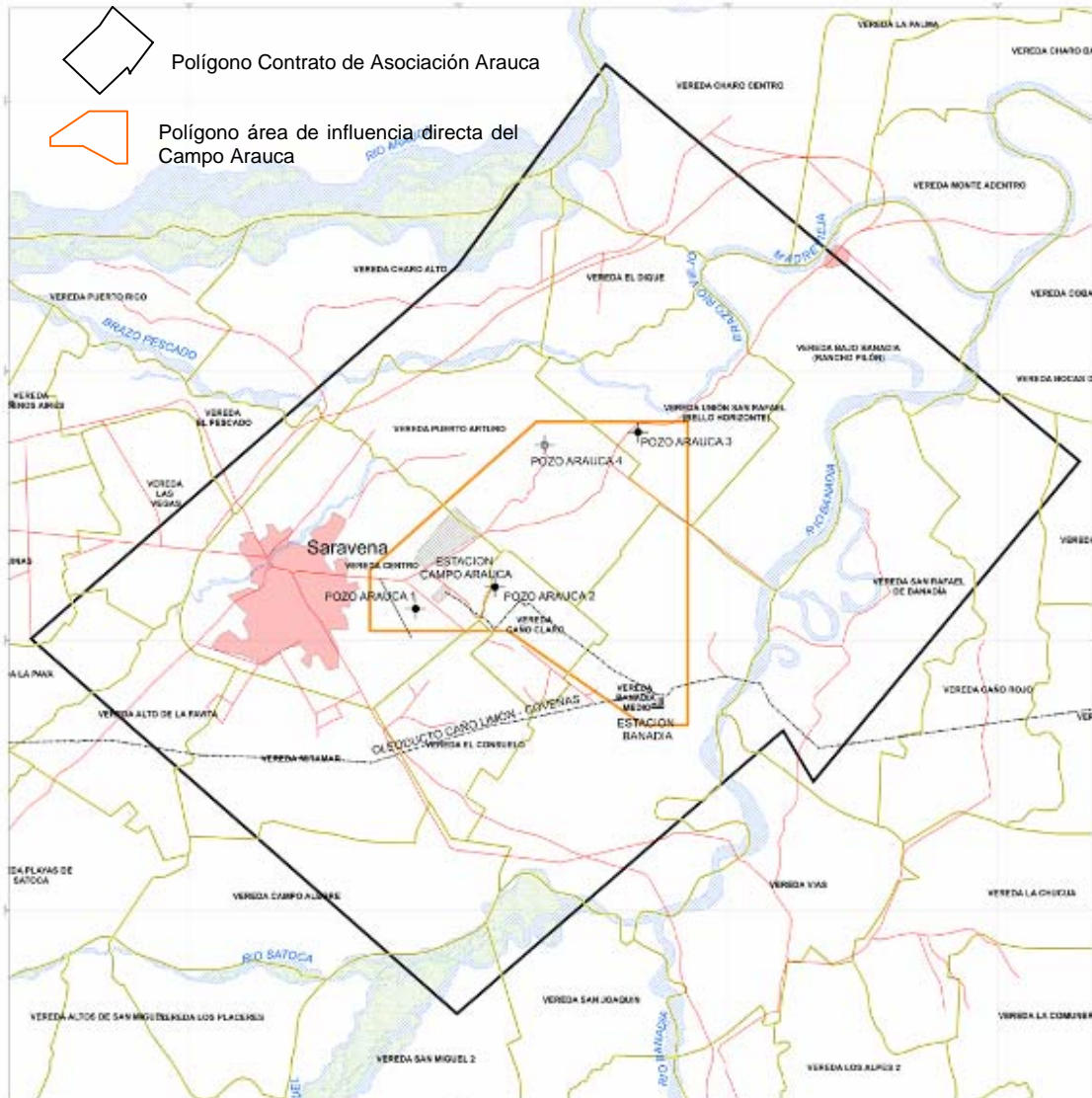
**Tabla 2. Coordenadas del Área de influencia directa del Campo Arauca (Origen 3Este)**

| VERTICE | ESTE    | NORTE     |
|---------|---------|-----------|
| 1       | 916.454 | 1'264.062 |
| 2       | 919.256 | 1'264.062 |
| 3       | 919.256 | 1'258.437 |
| 4       | 918.432 | 1'258.437 |
| 5       | 915.929 | 1'260.180 |
| 6       | 913.362 | 1'260.180 |
| 7       | 913.362 | 1'261.311 |

**Fuente:** PMA Campo Arauca GEOCOL CONSULTORES LTDA, 2.007

En la siguiente página se presenta el mapa del área de influencia directa del Campo Arauca y el polígono del contrato de Asociación (figura 2, siguiente página).

**Figura 2. Localización del área de influencia directa del Campo Arauca.**



**Fuente:** PMA Campo Arauca – GEOCOL CONSULTORES LTDA, 2.007

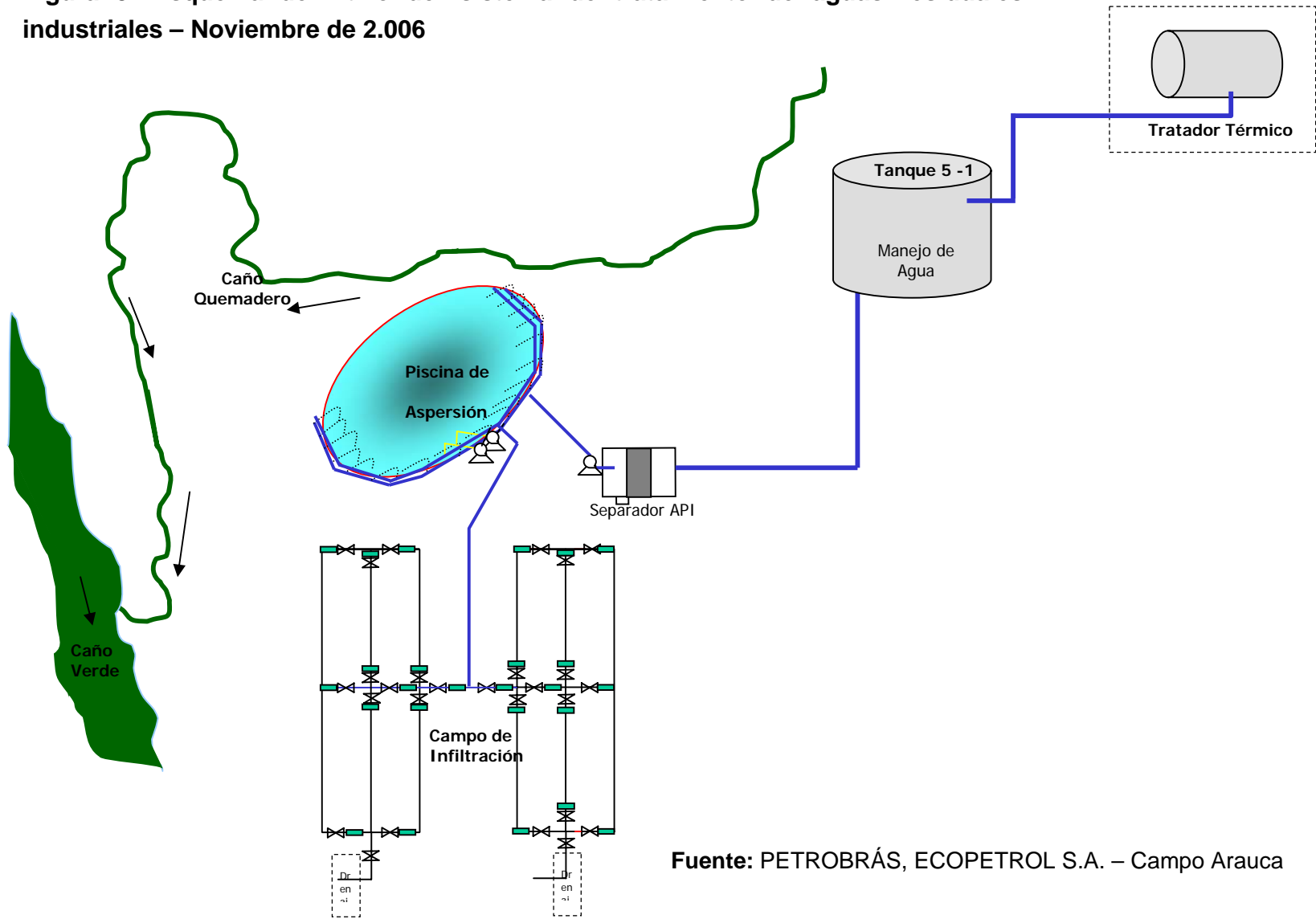
## 2.1 ANTECEDENTES TÉCNICOS.

En la tabla 3 (ver siguiente página) se describe la evolución histórica del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales y las empresas que operaron el Campo Arauca:

**Tabla 3. Evolución histórica del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca.**

| <b>AÑO</b>        | <b>EMPRESA</b> | <b>ESTADO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO</b>  |   |
|-------------------|----------------|---|---|
| 1.983 – 1.987     | INTERCOL       | El agua de proceso del campo se trataba en el tratador térmico, pasando al quemadero, donde luego vertía al Caño Quemadero y posteriormente al Caño Verde.  |   |
| Oct. – 1.987      |                | Se construye caja desnatadora con el fin de atrapar natas de aceite a la salida del quemadero. El agua pasa por ésta antes de llegar al Caño Quemadero.   |   |
| Ago. – 1.988      | ESSO           | Se construye una piscina pequeña de enfriamiento y gradas de enfriamiento luego de la caja desnatadora.   |   |
| 1.989 – 1.990     |                | Se construye una piscina grande con el objetivo de darle más tiempo de retención al agua del proceso. Se instalan flautas de enfriamiento al vertimiento de Caño Quemadero. Se construye el separador API y se instalan aspersores a la nueva piscina de enfriamiento.  |   |
| 1.991             | ESSO           | Se construye canal de enfriamiento hacia caja desnatadora.  |   |
| 1.994             |                | Se habilita Tanque 5.001 para manejo de agua de proceso, con el fin de garantizar mayor tiempo de retención.  |   |
| Ene. – 1.996      | PETROBRÁS      | Se instalan 3 piezómetros para monitoreo de aguas subterráneas y garantizar que el tratamiento del agua del Campo cumpla con los estándares y que la piscina no tenga filtraciones. Inicio de revisión quincenal de aguas para análisis de Fenoles (Laboratorio STRYCON LTDA). Cambio de sistema de aspersión y cambio de bomba para mejorar el sistema de enfriamiento de la piscina de oxidación. |   |
| Jun. – 1.999      |                | Se realizan pruebas con un equipo de Ozono para revisar reducción de Fenoles. Se obtiene la reducción de Fenoles superior al 99% con la prueba de oxidación por ozono. Se comienza adiconamiento de bacterias Cepac Polybac Fenobac para biorremediación de Fenoles.  |   |
| Sep. – 1.999      |                | Se construye un campo de infiltración provisional con mangueras. Se elimina el vertimiento al Caño Quemadero, ya que se empieza a verter al Campo de Riego ó Campo de Infiltración. En igual forma se inicia el programa de recuperación del Caño Quemadero. Se contrata personal para realizar limpieza general.   |   |
| Julio – 2.003     |                | Se cambia y se modifica el sistema de aspersión para oxigenar y enfriar el agua del proceso.  |   |
| Agosto – 2.003    |                | Se nivela terreno del Campo de Infiltración y se construye un sistema nuevo en tubería de PVC alta presión.   |   |
| Marzo – 2.004     |                | Envío semanal de muestras de agua del campo a Laboratorio Bogotá para análisis, el cual se realizaba trimestralmente.   |   |
| Noviembre – 2.004 |                | Construcción de la nueva Tea y el retiro de material contaminado de hidrocarburos y la recuperación ambiental de ésta zona.   |   |
| Noviembre – 2.004 |                | Impermeabilización de la piscina de aspersión.  |   |
| Diciembre – 2.005 |                | ECOPETROL S.A.  | Recuperación de la antigua zona del quemadero.  |
| Enero 2.006       |                |   | Esquema definitivo antes de la aplicación de las tecnologías: Fotólisis y Biorremediación (ver figura 3, siguiente página). |

**Figura 3. Esquema definitivo del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales – Noviembre de 2.006**



**Fuente:** PETROBRÁS, ECOPETROL S.A. – Campo Arauca

### **3. RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE LOS RESULTADOS HISTÓRICOS DE LAS CONCENTRACIONES DE FENOLES.**

Como se mencionó en el capítulo introductorio del presente documento, una vez tratadas las aguas residuales industriales se irrigan sobre un campo de infiltración, constituido por una zona de pastos equivalente a 1,5 hectáreas, por lo tanto, el tipo de vertimiento es no puntual, ya que no se generan descargas directamente a un cuerpo de agua superficial, sino que son infiltradas a través del suelo hasta alcanzar las aguas subterráneas presentes en la zona.

Los datos históricos que se presentan a continuación son:

- ✓ Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (entrada – separador API y salida – Campo de Infiltración)
- ✓ Aguas subterráneas – Tres Piezómetros.
- ✓ Cuerpos de aguas superficiales cercanos – Caño Verde y Caño Quemadero.

La información histórica que se recopiló, es la entregada por el Laboratorio de Aguas y Suelos del Instituto Colombiano del Petróleo -ICP, durante los años 2.005 y 2.006, en los que el Campo estaba siendo operado por ECOPETROL S.A.. Este laboratorio está acreditado por la Superintendencia de Industria y Comercio, según resoluciones 10547, 32753, 10541 del 2.000, respectivamente, y se encuentra en proceso de acreditación por el IDEAM en la Norma ISO 17.025.

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE CAMPO ARAUCA

En las tablas 4 y 5, se observa que las aguas residuales industriales del Campo Arauca, venían presentando concentraciones de Fenoles (valores desde 8,77 mg/L hasta 1,72 mg/L) superiores al valor establecido para vertimientos, por artículo 72 del decreto 1594 de 1.984 (0,2 mg/L), desde antes que el campo fuese revertido de PETROBRAS a ECOPETROL S.A. en el año 2.005 y se mantuvieron en este orden durante todo el año 2.006 y enero de 2.007.

**Tabla 4. Resultados de los Análisis Fisicoquímicos de las Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca (2.005)**

| AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES<br>CAMPO ARAUCA<br>SUBM: 44211-44212- 49488- 53119-<br>56661 | IDENTIFIC.<br>MUESTRA<br>FECHA DE<br>MUESTREO | 26-Jul-05 |           | 18-Ago-05  |            | 15-Sep-05 |            | DECRETO<br>1594/84<br>ART 72-74 |
|--|---|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|---------------------------------|
|  |   | AFLUENTE  | EFLUENTE  | AFLUENTE   | EFLUENTE   | AFLUENTE  | EFLUENTE   |                                 |
| <b>ANÁLISIS IN SITU</b>  |   |           |           |            |            |           |            |                                 |
| TEMPERATURA  | °C  | 36        | 28        | 37         | 28         | 40        | 28         | <40                             |
| pH / T   | Uni. pH                                       | 6,86/36,5 | 8,65/27,8 | 6,75/37,10 | 8,43/27,7  | 6,65/40,1 | 8,61/28,3  | 5,0-9,0                         |
| OXIGENO DISUELTTO  | mg O <sub>2</sub> /L                          | 2,3       | 6,7       | 2,7        | 5,6        | 1,8       | 6,7        | NR                              |
| CONDUCTIVIDAD / T  | micromhos/cm                                  | 623/38,1  | 589/28,1  | 601/37,1   | 543,3/27,4 | 627/38,8  | 592,5/28,2 | NR                              |
| <b>ANÁLISIS DE LABORATORIO</b>   |   |           |           |            |            |           |            |                                 |
| ALCALINIDAD TOTAL  | mg CaCO <sub>3</sub> /L                       | 226       | 240       | 231        | 239        | 247       | 258        | NR                              |
| DUREZA TOTAL   | mg CaCO <sub>3</sub> /L                       | 75,4      | 60,1      | 60,4       | 59,8       | 69,1      | 63,4       | NR                              |
| TURBIEDAD  | UNT   | NA        | NA        | NA         | NA         | NA        | NA         | NR                              |
| CLORUROS   | mg Cl-/L                                      | 37,8      | 40,7      | 36,5       | 37,3       | 37,1      | 36,4       | NR                              |
| SULFATOS   | mg SO <sub>4</sub> =/L                        | 3,93      | 3,68      | NA         | NA         | NA        | NA         | NR                              |
| NITRATOS (NO <sub>3</sub> )  | mg NO <sub>3</sub> /L                         | <0,08     | <0,08     | NA         | NA         | NA        | NA         | NR                              |
| NITRITOS (NO <sub>2</sub> )  | mg NO <sub>2</sub> /L                         | 0,11      | 0,08      | NA         | NA         | NA        | NA         | NR                              |
| SÓLIDOS TOTALES  | mg/L  | 476       | 438       | 482        | 446        | 540       | 510        | NR                              |
| SÓLIDOS DISUELTOS  | mg/L  | 460       | 434       | 468        | 467        | 488       | 443        | NR                              |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS  | mg/L  | 16,4      | 4,3       | 14,0       | 2,50       | 3,10      | 10,1       | >50%                            |
| GRASAS Y ACEITES   | mg/L  | 5,3       | <1,4      | 4,2        | <1,4       | 3,0       | 2,3        | >80%                            |
| HIDROCARBUROS TOTALES  | mg/L  | <1,4      | <1,4      | 3,7        | <1,4       | 2,0       | 1,5        | NR                              |
| DBO <sub>5</sub>   | mg O <sub>2</sub> /L                          | 156,4     | 66,1      | 119,4      | 63,0       | 109,5     | 31,6       | >20%                            |
| DQO  | mg O <sub>2</sub> /L                          | 278       | 109       | 221        | 130        | 182       | 92         | NR                              |
| FENOLES  | mg/L  | 11,6      | 6,55      | 15,1       | 8,77       | 10,3      | 5,97       | 0,2                             |
| SURFACTANTES   | mg MBAS/L                                     | NA        | NA        | NA         | NA         | NA        | NA         | NR                              |
| SULFURO  | mg/L  | <0,05     | <0,05     | 0,09       | 0,06       | <0,05     | <0,05      | NR                              |
| BARIO POR ICP-MS   | mg/L  | 1,02      | 1,13      | 1,02       | 1,02       | 1,11      | 1,13       | 5                               |
| CADMIO POR ICP-MS  | microg/L                                      | 0,20      | 0,10      | <0,02      | 0,04       | 0,12      | 0,06       | 100                             |
| COBRE POR ICP-MS   | microg/L                                      | 5,19      | 4,70      | 3,84       | 4,51       | 11,84     | 11,55      |                                 |
| CROMO POR ICP-MS   | microg/L                                      | 13,91     | 11,67     | 1,91       | 1,12       | 10,51     | 7,45       |                                 |
| PLATA POR ICP-MS   | microg/L                                      | 0,20      | <0,2      | 0,09       | 0,21       | 0,22      | <0,17      |                                 |
| PLOMO POR ICP-MS   | microg/L                                      | 2,97      | 1,24      | 0,54       | 0,70       | 2,10      | 1,96       | 500                             |
| ZINC POR ICP-MS  | microg/L                                      | 38,62     | 33,64     | 11,11      | 19,97      | 137,2     | 93,02      |                                 |
| MERCURIO   | microg/L                                      | NA        | NA        | NA         | NA         | NA        | NA         |                                 |
| ARSENICO   | microg/L                                      | NA        | NA        | NA         | NA         | NA        | NA         |                                 |
| HIDROCARBUROS ALIFATICOS   | mg/L  | 0,16      | 0,02      | 0,11       | 0,02       | 0,10      | 0,01       | NR                              |
| COMPUESTOS AROMÁTICOS VOLÁTILES  | microg/L                                      | NA        | NA        | NA         | NA         | NA        | NA         | NR                              |

NA: NO ANALIZADO

Color amarillo: Valor que excede el límite establecido

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo, ICP – PMA Campo Arauca - GEOCOL

NR: NO REGISTRA

Color gris: Parámetro no analizado

NS: NO SOLICITADO

Color azul: Valor máximo permitido

**Tabla 5. Resultados de los Análisis Físicoquímicos de las Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca (2.006)**

| AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES CAMPO ARAUCA<br>SUBM: 44211-44212-49488- 53119-56661 | IDENTIFIC. MUESTRA<br>FECHA DE MUESTREO | 05-Ene-06 |           | 25-May-06 |           | 21-Sep-06 |           | 13-Oct-06  |            | DECRETO 1594/84<br>ART 72-74 |
|--|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------------------------|
|  |   | AFLUENTE  | EFLUENTE  | AFLUENTE  | EFLUENTE  | AFLUENTE  | EFLUENTE  | AFLUENTE   | EFLUENTE   |                              |
| <b>ANÁLISIS IN SITU</b>  |   |           |           |           |           |           |           |            |            |                              |
| TEMPERATURA  | °C                                      | 31        | 27        | 28        | 27        | 42        | 30        | 38         | 30         | <40                          |
| pH / T   | Uni. pH                                 | 6,62/30,7 | 7,85/27,5 | 6,39/27,5 | 7,74/26,6 | 6,29/4,21 | 7,24/30,2 | 6,32/38,0  | 7,81/30,0  | 5,0-9,0                      |
| OXIGENO DISUELT  | mg O2/L                                 | 1,6       | 5,0       | 2,0       | 5,7       | 0,4       | 2,9       | 1,0        | 3,1        | NR                           |
| CONDUCTIVIDAD / T  | micromhos/cm                            | 538/21,6  | 559/21,4  | 527/20,4  | 537/20,3  | 538/20,7  | 512/21,0  | 617,0/22,5 | 555,0/22,5 | NR                           |
| <b>ANÁLISIS DE LABORATORIO</b>   |   |           |           |           |           |           |           |            |            |                              |
| ALCALINIDAD TOTAL  | Mg CaCO3/L                              | 218       | 251       | 219,6     | 232,0     | 226       | 239       | 231,9      | 231,5      | NR                           |
| DUREZA TOTAL   | Mg CaCO3/L                              | 64,8      | 67,5      | 66,2      | 48,6      | 65,0      | 61,7      | 64,4       | 53,3       | NR                           |
| TURBIEDAD  | UNT                                     | NA        | NA        | 37,55     | NS        |           | NS        | NA         | NA         | NR                           |
| CLORUROS   | mg Cl-/L                                | 34,2      | 36,7      | 466,2     | 39,3      | 43,0      | 39,4      | 38,2       | 35,9       | NR                           |
| SULFATOS   | Mg SO4=/L                               | NA        | NA        | 449,20    | NS        | NS        | NS        | NS         | NS         | NR                           |
| NITRATOS (NO3)   | mg NO3/L                                | NA        | NA        | 19,00     | NS        | NS        | NS        | NS         | NS         | NR                           |
| NITRITOS (NO2)   | mg NO2/L                                | NA        | NA        | <1,4      | NS        | NS        | NS        | NS         | NS         | NR                           |
| SOLIDOS TOTALES  | mg/L                                    | 562       | 554       | <1,4      | 486       | 507       | 487       | 500        | 438        | NR                           |
| SOLIDOS DISUELTOS  | mg/L                                    | 505       | 491       | 149       | 468       | 474       | 410       | 471        | 413        | NR                           |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS  | mg/L                                    | 57,0      | 20,9      | 19,0      | 8,8       | 2,0       | 8,6       | 5,2        | 7,5        | >50%                         |
| GRASAS Y ACEITES   | mg/L                                    | 9,4       | 6,8       | <1,4      | <1,4      | <1,4      | <1,4      | 7,9        | 6,3        | >80%                         |
| HIDROCARBUROS TOTALES  | mg/L                                    | 3,8       | 2,3       | <1,4      | <1,4      | <1,4      | <1,4      | 4,8        | <1,4       | NR                           |
| DBO5   | mg O2/L                                 | 135,1     | 52,3      | 148,9     | 93,3      | 107,5     | 28,3      | 183,7      | 31,0       | >20%                         |
| DQO  | mg O2/L                                 | 262       | 124       | 177       | 138       | 284       | 120       | 245        | 99         | NR                           |
| FENOLES  | mg/L                                    | 9,00      | 2,43      | 14,70     | 7,35      | 16,11     | 2,55      | 12,39      | 1,71       | 0,2                          |
| SURFACTANTES   | Mg MBAS/L                               | NA        | NA        | NS        | NS        | NS        | NS        | NS         | NS         |                              |
| SULFURO  | mg/L                                    | <0,05     | <0,05     | <0,05     | <0,05     | <0,05     | <0,05     | <0,05      | <0,05      | NR                           |
| BARIO POR ICP-MS   | mg/L                                    | 931,90    | 0,99      | 1,05      | 1,03      | 1,18      | 1,17      | 0,980      | 0,935      | 5                            |
| CADMIO POR ICP-MS  | microg/L                                | 0,05      | 0,03      | 0,03      | <0,019    | 0,04      | 0,03      | <0,028     | <0,028     | 100                          |
| COBRE POR ICP-MS   | microg/L                                | 3,38      | 4,48      | 0,18      | NS        | NS        | NS        | NS         | NS         |                              |
| CROMO POR ICP-MS   | microg/L                                | 3,51      | 15,09     | NS        | NS        | NS        | NS        | NS         | NS         |                              |
| PLATA POR ICP-MS   | microg/L                                | <0,168    | <0,168    | NS        | NS        | NS        | NS        | NS         | NS         |                              |
| PLOMO POR ICP-MS   | microg/L                                | 1,46      | 1,25      | 0,18      | 0,21      | 0,66      | 0,40      | <0,2       | <0,2       | 500                          |
| HIDROCARBUROS ALIFATICOS   | mg/L                                    | 0,78      | 0,13      | 0,22      | 0,03      | 0,11      | 0,01      | 1,12       | 0,071      | NR                           |
| COMPUESTOS AROMÁTICOS VOLÁTILES  | microg/L                                | 19052     | 363       | 14,56     | 0,31      | 23071,9   | 623,46651 | 19588,2    | 323,2      | NR                           |

NA: NO ANALIZADO

NR: NO REGISTRA

NS: NO SOLICITADO

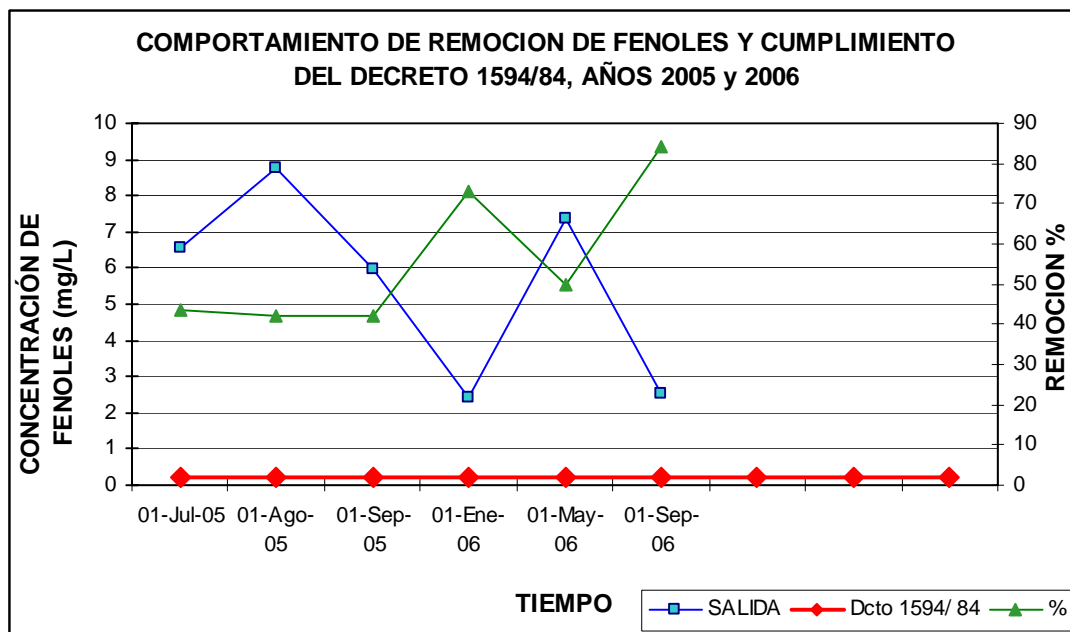
Color amarillo: Valor que excede el límite establecido

Color gris: Parámetro no analizado

Color azul: Valor máximo permitido

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo, ICP – PMA Campo Arauca - GEOCOL

**Gráfico 1. Comportamiento de la remoción de Fenoles y el cumplimiento del decreto 1594 de 1.984.**



**Conclusión acerca de los monitoreos al agua residual industrial:**

De acuerdo con los monitoreos realizados por ECOPETROL S.A. durante los años 2.005 y 2.006 (ver gráfico 1), la concentración de Fenoles a la salida del Sistema de Tratamiento supera entre 11 y 43 veces el valor estipulado por la norma. Los porcentajes de remoción son variables con valores desde 42% hasta 84%. Las altas concentraciones de Fenoles en las aguas residuales industriales de Campo Arauca se han reportado desde el año 1.996, lo cual hace evidente la necesidad de dar cumplimiento al decreto 1594 de 1.984.

**3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

La siguiente caracterización es de las muestras de agua tomadas de los tres piezómetros, que se encuentran ubicados sobre el área de influencia directa de

Campo Arauca (ver anexo A – foto 2, puntos de color rojo). El piezómetro 1 se encuentra ubicado fuera de las instalaciones de la estación principal del Campo Arauca, representando el punto “aguas arriba” del campo de infiltración; el piezómetro 2 se encuentra sobre el campo de infiltración, con el fin de observar el impacto directo que genera la irrigación de las aguas residuales industriales sobre el acuífero; y finalmente el piezómetro 3 se encuentra ubicado en la zona de recarga del Caño quemadero, es decir entre el campo de infiltración y el Caño Quemadero.

A continuación en la tabla 6, se presentan los resultados de la caracterización hecha en los tres piezómetros durante los años 2.005 y 2.006.

**Tabla 6. Resultados de los Análisis Fisicoquímicos de los Piezómetros de la Estación Campo Arauca**

| PIEZÓMETRO N° 1       |              |           |           |           |            |            |           |
|-----------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| FECHA DE MUESTREO     |              | 26-Jul-05 | 18-Ago-05 | 15-Sep-05 | 05-Ene-06  | 25-May-06  | 21-Sep-06 |
| Parámetro             | Unidad       | 200178122 | 200180367 | 200183004 | 200196551  | 200209446  | 200225659 |
| PROFUNDIDAD           | m            | 1,00      | 0,88      | 1,06      | 1,60       | 1,19       | 0,8       |
| pH / T                | Uni. pH      | 6,01/22,8 | 5,83/27,5 | 5,74/27,2 | 5,49/27,7  | 5,29/27,3  | 4,89/26,8 |
| OXIGENO DISUELTO      | mg O2/L      | 2,9       | 3,1       | 2,5       | 2,5        | 1,7        | 3,1       |
| CONDUCTIVIDAD / T     | micromhos/cm | 21,9/20,4 | 35,5/27,1 | 42,4/27,6 | 22,35/22,1 | 19,20/22,1 | 34,5/20,7 |
| ALCALINIDAD TOTAL     | mg CaCO3/L   | 8,11      |           | 9,73      |            | 5,80       | 5,59      |
| SOLIDOS DISUELTOS     | mg/L         | 59,0      | 21,0      | 34,0      | 9,0        | 48,1       | 163,2     |
| GRASAS Y ACEITES      | mg/L         | 1,4       | <1,4      | 4,2       | 6,2        | <1,4       | <1,4      |
| HIDROCARBUROS TOTALES | mg/L         | NA        | NA        | <1,4      | 3,46       |            |           |
| FENOLES               | mg/L         | <0,01     | <0,01     | <0,01     | <0,01      | <0,010     | 0,023     |
| BTEX Totales          | microg/L     | N.D.      | N.D.      | N.D.      | N.D.       | N.D.       | ND        |

| PIEZÓMETRO N° 2       |              |           |           |           |            |            |           |
|-----------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| FECHA DE MUESTREO     |              | 26-Jul-05 | 18-Ago-05 | 15-Sep-05 | 05-Ene-06  | 25-May-06  | 21-Sep-06 |
| Parámetro             | Unidad       | 200178123 | 200180368 | 200183005 | 200196552  | 200209447  | 200225660 |
| PROFUNDIDAD           | m            | 1,20      | 1,19      | 1,32      | 1,84       | 1,52       | 1,29      |
| pH / T                | Uni. pH      | 5,68/22,8 | 5,77/26,7 | 5,59/27,1 | 5,33/27,0  | 5,10/27,8  | 4,86/27,1 |
| OXIGENO DISUELTO      | mg O2/L      | 1,8       | 3,2       | 2,4       | 1,5        | 2,4        | 1,6       |
| CONDUCTIVIDAD / T     | micromhos/cm | 30,9/20,4 | 44,5/27,2 | 37,7/27,2 | 29,35/22,1 | 29,20/22,0 | 30,3/21,0 |
| ALCALINIDAD TOTAL     | mg CaCO3/L   | 12,6      |           | 13,8      |            | 11,6       | 12        |
| SOLIDOS DISUELTOS     | mg/L         | 61,6      | 70,0      | 30,0      | 18,6       | 63,2       | 103,9     |
| GRASAS Y ACEITES      | mg/L         | <1,4      | <1,4      | <1,4      | <1,4       | <1,4       | 1,89      |
| HIDROCARBUROS TOTALES | mg/L         | NA        | NA        | <1,4      | <1,4       |            |           |
| FENOLES               | mg/L         | <0,01     | 0,01      | <0,01     | <0,01      | <0,010     | 0,047     |
| BTEX Totales          | microg/L     | N.D.      | N.D.      | N.D.      | N.D.       | N.D.       | N.D.      |

| PIEZÓMETRO N° 3   |              |           |            |            |            |            |           |
|-------------------|--------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| FECHA DE MUESTREO |              | 26-Jul-05 | 18-Ago-05  | 15-Sep-05  | 05-Ene-06  | 25-May-06  | 21-Sep-06 |
| Parámetro         | Unidad       |           | 200180369  | 200183006  | 200196553  | 200209448  | 200225661 |
| PROFUNDIDAD       | m            | *         | 1,46       | 1,75       | 1,63       | 1,62       | 1,36      |
| pH / T            | Uni. pH      | *         | 6,77/26,0  | 6,59/26,9  | 6,18/26,5  | 5,77/27,0  | 5,36/26,0 |
| OXIGENO DISUELTO  | mg O2/L      | *         | 2,5        | 3,8        | 1,8        | 2,1        | 1,9       |
| CONDUCTIVIDAD / T | micromhos/cm | *         | 165,5/26,1 | 172,1/26,9 | 160,1/22,4 | 147,0/22,0 | 137/21,3  |
| ALCALINIDAD TOTAL | mg CaCO3/L   | *         |            | 79,5       |            | 70,8       | 67,93     |

| PIEZOMETRO N°3        |          |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| FECHA DE MUESTREO     |          | 26-Jul-05 | 18-Ago-05 | 15-Sep-05 | 05-Ene-06 | 25-May-06 | 21-Sep-06 |
| Parámetro             | Unidad   |           | 200180369 | 200183006 | 200196553 | 200209448 | 200225661 |
| SOLIDOS DISUELTOS     | mg/L     | *         | 142       | 128       | 138       | 160       | 116,4     |
| GRASAS Y ACEITES      | mg/L     | *         | <1,4      | <1,4      | 1,9       | <1,4      | 2,35      |
| HIDROCARBUROS TOTALES | mg/L     | *         |           | <1,4      | <1,4      |           |           |
| FENOLES               | mg/L     | *         | 0,0315    | 0,033     | <0,01     | <0,010    | 0,038     |
| BTEX Totales          | microg/L | *         | N.D.      | N.D.      | N.D.      | N.D.      | N.D.      |

NA: NO ANALIZADO

NR: NO REGISTRA

NS: NO SOLICITADO

ND: No Detectable

Color amarillo: Valor que excede el límite establecido    Color gris: Parámetro no analizado    Color azul: Valor máximo permitido

\* Este parámetro no fue muestreado

Conforme al seguimiento realizado a las aguas subterráneas durante los meses de Julio - Agosto- Septiembre de 2.005 y Enero de 2.006 y a los resultados obtenidos en los diferentes parámetros analizados, es importante resaltar:

Nota: En el muestreo realizado el día 21 de mayo de 2.006, de los piezómetros existentes en el campo Arauca, solo se monitoreó el PM-1 ya que los demás estaban secos.

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo, ICP – PMA Campo Arauca - GEOCOL

Las concentraciones de Fenoles durante todo el periodo 2.005- 2.006 (excepto septiembre de 2.006) en los piezómetros 1 y 2 son inferiores a 0,01mg/L, equivalente a la Mínima Concentración Detectable según el método usado en el Laboratorio (método Fotométrico).

Las concentraciones de Fenoles del Piezómetro 3, durante el periodo 2.005 – 2.006 oscilan entre <0,01 y 0,038 mg/L, sin embargo estas concentraciones son muy bajas, teniendo en cuenta la toxicidad del Fenol (ver numeral 1.2) tanto para seres humanos como para las personas como para los animales y la vegetación.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES DEL ÁREA DE INFLUENCIA DIRECTA.

En las tablas 7, 8 y 9 (Siguiendo página) están los resultados de la caracterización fisicoquímica de los cuerpos de agua del área de influencia directa; en el anexo A. Fotografía 3, está la ubicación de los puntos de muestreo (Caño Quemadero – aguas abajo del campo de infiltración, Caño Verde – 100 m aguas arriba y aguas debajo de la confluencia del Caño Quemadero.). Debido a la ubicación del Caño Quemadero respecto al campo de infiltración, no ha sido necesario realizar monitoreo de aguas superficiales de este caño aguas arriba del Campo Arauca, únicamente se realizan monitoreos aguas abajo del punto de vertimiento.





| CAÑO QUEMADERO          |           |           |           |           |           |           |           | DECRETO 1594/84      |                      |         |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|---------|
| FECHA DE MUESTREO       |           | 26-Jul-05 | 18-Ago-05 | 15-Sep-05 | 05-Ene-06 | 25-May-06 | 22-Sep-06 | ART. 38              | ART. 39              | ART. 40 |
| <b>ANÁLISIS IN SITU</b> |           |           |           |           |           |           |           |                      |                      |         |
| SULFATOS                | mg SO4=L  | <1,50     | <1,50     | <1,50     | 2,49      | <1        | <1,5      | 400                  | 400                  | NR      |
| NITRATOS (NO3)          | mg NO3/L  | 0,557     | 0,661     | 0,914     | <0,629    | <0,629    | 0,762     | 10                   | 10                   | NR      |
| NITRITOS (NO2)          | mg NO2/L  | <0,02     | <0,02     | <0,02     | <0,069    | <0,069    | <0,02     | 1,0                  | 1,0                  | NR      |
| SOLIDOS TOTALES         | mg/L      | NA        | NA        | NA        | NA        | NS        | NS        | NR                   | NR                   | NR      |
| SOLIDOS DISUELTOS       | mg/L      | NA        | NA        | NA        | NA        | NS        | NS        | NR                   | NR                   | NR      |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS     | mg/L      | 3,2       | 1,0       | 3,3       | 6,0       | 3,4       | 3,35      | NR                   | NR                   | NR      |
| GRASAS ACEITES          | mg/L      | <1,4      | <1,4      | <1,4      | 3,6       | <1,4      | 3,8       | Sin película visible | Sin película visible | NR      |
| HIDROCARBUROS TOTALES   | mg/L      | <1,4      | <1,4      | <1,4      | 1,5       | <1,4      | 1,92      | NR                   | NR                   | NR      |
| DBO5                    | mg O2/L   | <2,0      | <2,0      | <2,0      | <2,0      | <2,0      | <2,0      | NR                   | NR                   | NR      |
| DQO                     | mg O2/L   | <20       | <20       | <20       | <20       | 6,63      | 35,98     | NR                   | NR                   | NR      |
| FENOLES                 | mg/L      | <0,01     | <0,01     | <0,01     | <0,01     | <0,010    | <0,010    | 0,002                | 0,002                | NR      |
| SURFACTANTES            | mg MBAS/L | <0,10     | <0,10     | <0,10     | <0,10     | <0,10     | <0,10     | 0,5                  | 0,5                  | NR      |
| SULFURO                 | mg/L      | <0,05     | <0,05     | NA        | NA        | NS        | NS        | NR                   | NR                   | NR      |
| BARIO                   | mg/L      | 18,9      | 0,02      | 0,03      | 0,02      | 0,02      | <0,2      | 1000                 | 1000                 | N.E.    |
| CADMIO                  | microg/L  | 0,10      | 0,10      | 0,11      | 0,06      | 0,06      | <28       | 10                   | 10                   | 10      |
| COBRE                   | microg/L  | 2,81      | 3,66      | 9,40      | 0,38      | 0,25      | <200      | 1000                 | 1000                 | 2000    |
| CROMO HEXAVALENTE       | microg/L  | 1,81      | 0,41      | 2,64      | 2,23      | 0,68      | <200      | 50                   | 50                   | 50      |
| PLATA                   | microg/L  | <0,2      | 0,119     | <0,17     | <0,168    | <0,168    | <54       | 50                   | 50                   | NR      |
| PLOMO                   | microg/L  | 2,27      | 0,68      | 2,51      | 0,24      | 0,20      | <200      | 50                   | 50                   | 5000    |
| ZINC                    | microg/L  | 31,38     | 29,66     | 63,95     | 15,11     | 18,60     | <200      | NR                   | NR                   | NR      |
| MERCURIO                | microg/L  | <0,6      | <0,6      | <0,60     | NS        | NS        | NS        | NS                   | 2,0                  | 2,0     |
| ARSENICO                | microg/L  | <0,1      | <0,1      | <0,1      | <0,1      | NS        | NS        | NS                   | NS                   | 50      |

NA: NO ANALIZADO

NR: NO REGISTRA

NS: NO SOLICITADO

Color amarillo: Valor que excede el límite establecido

Color gris: Parámetro no analizado

Color azul: Valor máximo permitido

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo, ICP – PMA Campo Arauca - GEOCOL

Como se observa en las tablas 8 y 9, al igual que el Caño Quemadero, el Caño Verde registró concentraciones inferiores a 0,01 mg/L (límite mínimo detectable - método Fotométrico), tanto aguas arriba del punto de entrega del Caño Quemadero como aguas abajo del mismo.

### Conclusión acerca de los monitoreos a los cuerpos de agua:

Los monitoreos realizados en los cuerpos de aguas tanto superficiales como subterráneos del área de influencia directa, evidencian que éstos **no** estaban siendo contaminados por la irrigación de las aguas residuales industriales sobre el campo de infiltración, aun cuando las concentraciones de Fenoles en este vertimiento no puntual eran superiores al valor establecido por el decreto 1594 de 1.984. Sin embargo es necesario dar cumplimiento al artículo 85, numeral 1 de la ley 99 de 1.993, el cual consagra el tipo de sanciones a imponer por infringir la normatividad ambiental, independientemente de haber generado un daño o perjuicio al medio ambiente.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 DEFINICIÓN DEL TIPO DE TECNOLOGÍAS A APLICAR.

Como se describe en la revisión bibliográfica (numeral 1.3), los tipos de tratamientos para la remoción de Fenoles son variados, tales como: extracción, adsorción, intercambio iónico, tratamiento electroquímico, biodegradación, incineración, procesos de oxidación convencionales y las tecnologías avanzadas de oxidación (TAO's).

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para definir la alternativa de tratamiento más viable fueron:

- ✓ Bajos costos en su fase constructiva (adquisición de materiales y equipos - importación y operativa (día a día – demanda de materiales y mantenimiento preventivo y correctivo),
- ✓ tecnología en lo posible Colombiana,
- ✓ fácil de adaptación al actual Sistema de Tratamiento,
- ✓ operación sencilla (no requiere condiciones estrictas de operación, evitar altos consumos de energía adicional y de productos),
- ✓ mínima generación de subproductos o residuos,
- ✓ nula generación de subproductos tóxicos o residuos de difícil tratamiento,
- ✓ áreas pequeñas para la adaptación o construcción de las unidades de tratamiento,
- ✓ mínima alteración las concentraciones de otros parámetros en las aguas residuales,
- ✓ y lo más importante, reducción de la concentración de Fenoles hasta llegar a un valor inferior a la norma (0,2 mg/L).

Conjuntamente con un equipo de profesionales del ICP<sup>13</sup>, se indagaron las ventajas y desventajas de los diferentes procesos para la remoción de compuestos orgánicos, especialmente de los Fenoles, de los cuales se describen los más aplicables al Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Campo Arauca en la tabla 10 (ver siguiente página).

---

<sup>13</sup> Ricardo Restrepo - Profesional Tecnologías Limpias – [ricardo.restrepo@ecopetrol.com.co](mailto:ricardo.restrepo@ecopetrol.com.co) , Mauricio Cardeñosa - Profesional Tecnologías Limpias – [Mauricio.cardeñosa@ecopetrol.com.co](mailto:Mauricio.cardeñosa@ecopetrol.com.co) , Jorge Forero - Profesional de Proyectos – [jorge.forero@ecopetrol.com.co](mailto:jorge.forero@ecopetrol.com.co) .

**Tabla 10. Tecnologías para la remoción de Fenoles propuestas.**

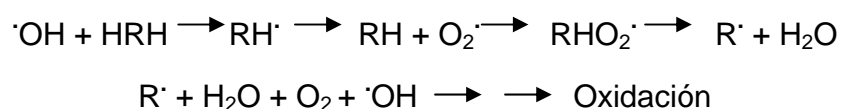
| TECNOLOGIA  | DESCRIPCIÓN   | VENTAJAS   | DESVENTAJAS   |
|---|---|--|---|
| <p>TRATAMIENTO ELECTRO QUÍMICO</p>  | <p>Consiste en una oxidación coagulante que actúa como secuestrante de los Fenoles desintegrándolos por completo debido a la alta oxidación. Esto se obtiene a través de una reacción electrolítica la cual es controlada y monitoreada por equipos de alta tecnología. Los productos químicos utilizados son el ácido hipocloroso y el cloruro férrico, con los cuales se forma una malla molecular que sedimenta cualquier elemento que contenga el agua, incluidos los Fenoles. Este sistema fue propuesto por WUR Ambiental Ltda. – Ing. Alfonso Riaño.</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Altas eficiencias de remoción.</li> <li>✓ Una vez instalado es Sencillo y fácil de operar.</li> <li>✓ pueden manejar grandes volúmenes.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tecnología importada.</li> <li>✓ Altos consumos de energía.</li> <li>✓ Mantenimiento frecuente – asesoría técnica internacional.</li> <li>✓ Formación de lodos y la disposición final de estos (residuos especiales – modificación de la autorización para el manejo de residuos sólidos).</li> <li>✓ Adecuación de un área para la construcción de la unidad de tratamiento (coagulación - sedimentación).</li> <li>✓ Incremento en los costos de la operación del sistema de tratamiento, debido a la compra de los productos químicos.</li> </ul> |
| <p>TRATAMIENTO QUIMICO Y ADSORCION</p>  | <p>El sistema consiste en tomar el agua que viene del tanque de almacenamiento previo, hacerla circular por una torre de enfriamiento que baja la temperatura hasta un valor cercano a la temperatura ambiente lo que permite mayor oxigenación e inicio del proceso de oxidación de los Fenoles y mayor solubilidad del cloro. Paso seguido se dosifica el Hipoclorito de Sodio para la oxidación total de los Fenoles llevándolos del estado soluble al estado insoluble lo que permite su remoción al pasar por una columna empacada en carbón activado especial a una tasa de filtración lenta.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alta eficiencia de remoción.</li> <li>✓ No se requiere la modificación sustancial del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, ni la construcción de nuevas unidades de tratamiento.</li> <li>✓ reutilización</li> <li>✓ sencillo y fácil de operar.</li> <li>✓ no generación alta de lodos</li> <li>✓ se pueden eliminar otras sustancias contaminantes.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Disposición final de los residuos, producto de la limpieza del carbón activado. (Residuos Especiales - Modificación de la autorización para el manejo de residuos sólidos)</li> <li>✓ Reposición constante del carbón activado – incremento de los costos.</li> <li>✓ Mantenimiento constante del carbón activado, debido a la generación de lodos.</li> <li>✓ Incremento en los costos de la operación del sistema de tratamiento, debido a la compra de los productos químicos.</li> </ul>   |
| <p>TECNOLOGÍAS COMBINADAS: PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA – POA (Fotólisis) Y BIORREMEDIACIÓN</p> | <p>A partir del uso de agentes físicos (Aireación y Fotólisis) que destruyen químicamente las moléculas hasta llevarlas a subproductos menos contaminantes y con el aporte de procesos biológicos para la Biorremediación Producto Fenobiol Este producto ha sido desarrollado por el Instituto Colombiano del Petróleo - ICP y viene siendo aplicado en procesos de tratamiento de Fenoles, incrementando su eficiencia.</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No se requiere la modificación sustancial del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, ni la construcción de nuevas unidades de tratamiento.</li> <li>✓ Económicamente viable ya que se requiere únicamente se requiere la adquisición del Fenobiol y la compra del nutriente para las bacterias.</li> <li>✓ Alta eficiencia de remoción.</li> <li>✓ Ver ventajas de las Tecnologías Avanzadas de Oxidación – numeral 1.3.9.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Incremento de los Sólidos suspendidos totales.- SST</li> <li>✓ Generación de lodos – mantenimiento de la piscina de aireación.</li> <li>✓ Mantenimiento de equipos.</li> </ul>   |

Con base en el siguiente análisis y en el estudio de las experiencias desarrolladas por el ICP en áreas de ECOPETROL S.A. como la Refinería de Barrancabermeja y la Vicepresidencia de Transporte - Estación Pozos Colorados, se definió que la combinación de las tecnologías: Fotólisis (Proceso de oxidación avanzada – POA – fotoquímico) y Biorremediación (Producto Fenobiol – Patentado y producido por el ICP), era la mejor alternativa para remover las concentraciones de Fenoles, hasta llegar a un valor inferior al establecido por la norma. Estas tecnologías se implementaron en la Piscina de aireación del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca.

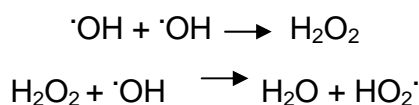
#### **4.1.1 Procesos de Oxidación Avanzada (POA o Advanced Oxidation Processes - AOP)**

Son definidos como la generación de radicales altamente reactivos, especialmente radicales OH (Potencial Redox,  $E^0 = 2,80$ , [33]), a temperatura ambiente y a presiones normales de un sistema de tratamiento, en suficiente cantidad como para purificar el agua contaminada por compuestos orgánicos. (Glaze y co. 1.987). El radical hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) tiene 3 mecanismos de acción [58]:

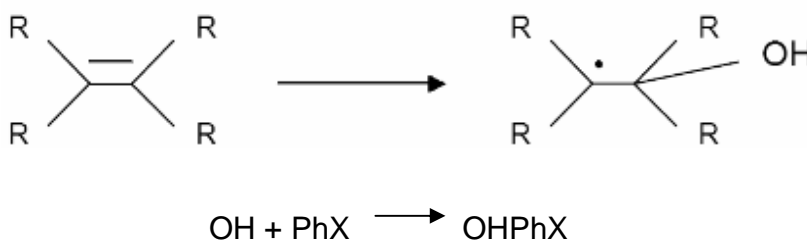
1. Abstracción de oxígeno: es la interacción de los radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) con los compuestos orgánicos (HRH), produciendo el radical ( $\text{RH}\cdot$ ) al eliminarle el hidrógeno, que reacciona con el oxígeno disuelto y forma un peroxoradical orgánico ( $\text{RHO}_2\cdot$ ), altamente inestable. Posteriormente se inician reacciones de oxidación térmica que liberan el radical  $\text{R}\cdot$ ; este reacciona con el oxígeno y radicales  $\cdot\text{OH}$  libres en disolución, oxidándose así el radical orgánico.



2. Reacción radical – radical: es cuando se produce por alta concentración de radicales hidroxilo en la disolución, y se dimerizan en  $H_2O_2$ . Si se utiliza un exceso de  $H_2O_2$ , los radicales OH producirán el radical  $HO_2^{\cdot}$ , que es mucho menos reactivo y no contribuye a la oxidación de la materia orgánica en disolución. Su presencia puede ser controlada mediante el ajuste del pH de la disolución.



3. Adición electrofílica: es la adición de radicales  $\cdot OH$  a las moléculas orgánicas con enlaces pi, liberando el radical orgánico:



**Tipos de Procesos de Oxidación Avanzada**, clasificados en fotoquímicos y no fotoquímicos:

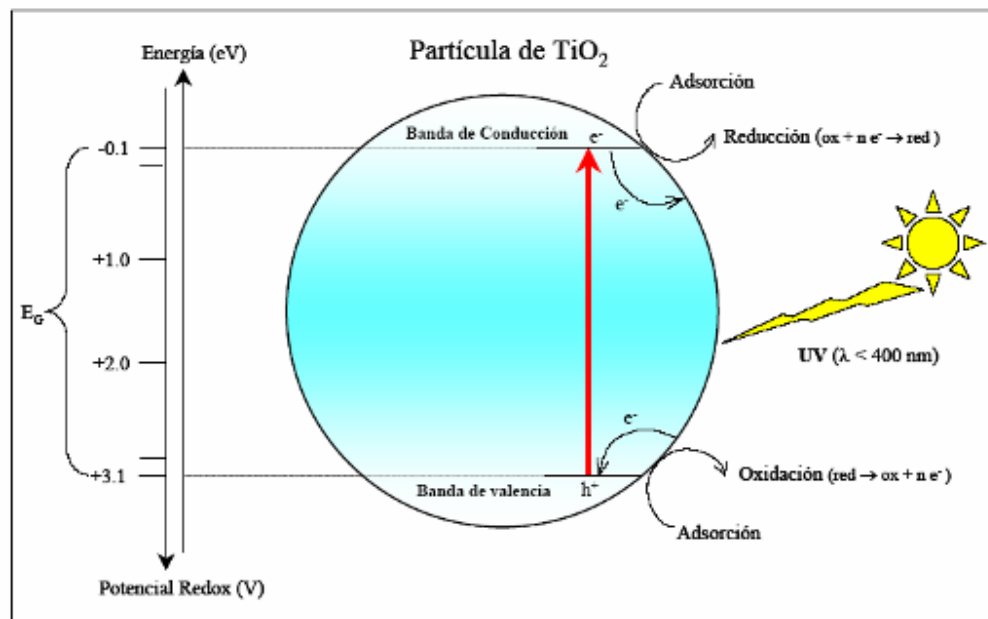
**Tabla 11. Procesos de Oxidación Avanzada**

| PROCESOS FOTOQUÍMICOS  | PROCESOS NO FOTOQUÍMICOS  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotocatálisis heterogénea.</li> <li>• Ozonización y radiación ultravioleta (<math>O_3/UV</math>).</li> <li>• Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (<math>H_2O_2/UV</math>).</li> <li>• Foto - fenton (<math>Fe^{2+}/H_2O_2/UV</math>).</li> <li>• Fotólisis directa e indirecta.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ozonización en medio alcalino (<math>O_3/OH</math>).</li> <li>• Ozonización con peróxido de hidrógeno (<math>O_3/H_2O_2</math>).</li> <li>• Peróxido de hidrógeno y catalizador (<math>H_2O_2 / Fe^{2+}</math>).</li> <li>• Electro - Fenton</li> <li>• Ozonización catalítica (<math>O_3/Cat</math>).</li> <li>• Ozonización y ultrasonidos (<math>O_3/US</math>).</li> <li>• Oxidación electroquímica.</li> <li>• Oxidación anódica</li> </ul> |

Los dos Procesos de Oxidación Avanzada basados en la luz solar más investigados son la Fotocatálisis Heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y homogénea con reactivo fenton.

La **Fotocatálisis Heterogénea** utiliza la radiación ultravioleta y un material sólido inorgánico semiconductor o catalizador, para generar una reacción química. Consiste en que la radiación incidente (longitud de onda de la región visible del espectro o ultravioleta de bajas energías) será absorbida por el semiconductor, el cual una vez activado genera reacciones que pueden modificar químicamente los contaminantes. En la siguiente figura se representa este mecanismo:

**Figura 4. Mecanismo de Fotocatálisis Heterogénea, mediante el uso del catalizador  $\text{TiO}_2$ .**



**Fuente:** EVALUACIÓN ANALÍTICA Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA EN PLANTA PILOTO SOLAR. Autor Julia Cáceres. Almería España. Octubre de 2.002. UNIVERSIDAD DE ALMERÍA, P.S.A., Ministerio de Ciencia y Tecnología, CIEMAT

Se han realizado estudios para evaluar la aplicación de la Fotocatálisis Heterogénea en la remoción de patógenos de aguas residuales domésticas, crudas y tratadas [16], degradación de la materia orgánica, remoción de

agroquímicos [13] presentes aguas residuales en la industria bananera [4]. Igualmente en el año 2.000 la Universidad de las Palmas de Gran Canaria – España, el departamento de Química investigó [58] sobre el tratamiento de los siguientes residuos líquidos del laboratorio de química: solución de Permanganato de Potasio, residuos de la determinación de: Amonio en agua de mar y nitritos en agua de mar y residuos de la absorción de p-nitroFenol en carbono activado; encontrándose que se produjeron eficiencias similares utilizando lámparas comerciales o luz solar, que estas técnicas de oxidación avanzada no lograron la completa mineralización del amonio y nitritos.

La aplicación de la Fotocatálisis Heterogénea se ha llevado a un nivel preindustrial debido a sus altos costos, por lo tanto es necesario investigar acerca del aprovechamiento de la energía solar. En la siguiente foto se observa la planta piloto solar de Almería – España, la cual es utilizada para la Fotocatálisis de aguas contaminadas con pesticidas:

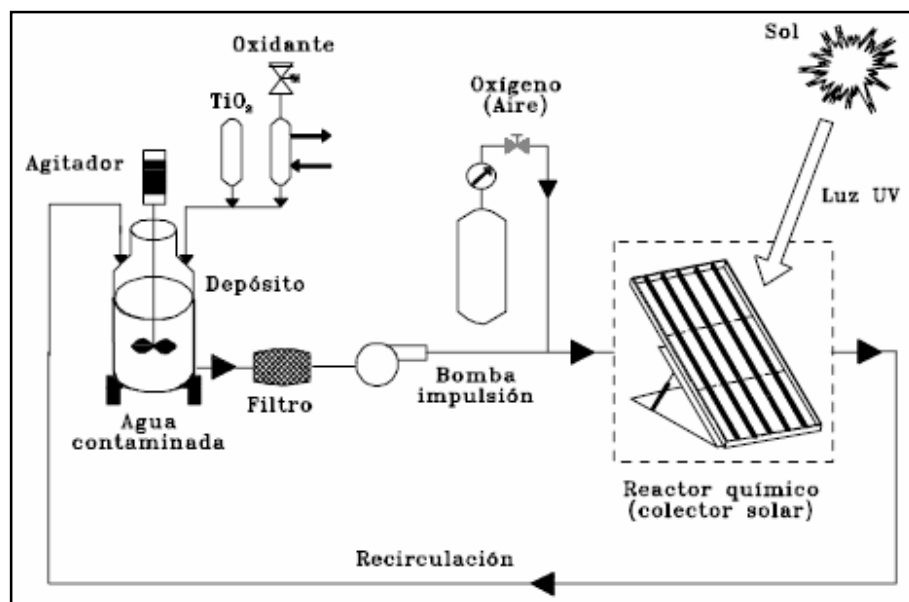
**Foto 1. Colector Cilindro Parabólico Compuesto (CPC)**



**Fuente:** EVALUACIÓN ANALÍTICA Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA EN PLANTA PILOTO SOLAR. Autor Julia Cáceres. Almería España. Octubre de 2.002. UNIVERSIDAD DE ALMERÍA, P.S.A., Ministerio de Ciencia y Tecnología, CIEMAT.

El esquema típico (ver figura 5) de un Sistema de Tratamiento Fotocatalítico consta de: un filtro para eliminar cualquier partícula que se pueda acumular en la superficie del catalizador o en las paredes del reactor, un contactor gas – líquido de flujo continuo que asegura la presencia de oxígeno disuelto en agua y un concentrador solar o reactor en el cual se da el proceso fotocatalítico.

**Figura 5. Esquema general de un Sistema de Fotocatálisis para el tratamiento de contaminantes en agua.**



**Fuente:** Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de Fenoles en medio acuoso. Claudia Pubiano, William Laguna – UNAL DE MEDELLIN. 2.004

En la **Fotocatálisis Homogénea** el catalizador está disuelto en el agua problema, encontrándose en la misma fase de los contaminantes. El reactivo fenton es una disolución acuosa del peróxido de hidrógeno e iones ferrosos que generan suficientes radicales Hidroxilo. Las velocidades de degradación se incrementan al introducirle al proceso la radiación UV Visible (Bauer y Col., 1.999; Hoifn'w y col., 1.976; Huston y col. 1.999; Parra y col., 2.000; Pignatello, 1.992; Ruppert y col., 1.994) denominándose a este proceso: foto – fenton. Este proceso tiene mayor sensibilidad a la radiación UV de hasta una longitud de onda de 580 nm, por lo

tanto se puede asumir que tendría un mayor aprovechamiento de la energía solar que el proceso con  $\text{TiO}_2$ . Adicionalmente al estar diluido el catalizador en la solución permite una mayor profundidad de penetración de la luz, situación un tanto contraria en el caso del  $\text{TiO}_2$  [13]. Las principales desventajas de éste proceso es el bajo pH requerido y la separación del hierro una vez se de lugar la reacción. El foto- fenton se ha empleado para la destrucción de Fenoles, Fenoles clorados y plaguicidas en medio acuoso, y para la reducción de DQO. La aplicación de este tipo de tratamiento se ha hecho en aguas residuales contaminadas con compuestos fenólicos (Barbeni y col., 1.987; Bauer y Fallmann, 1.997; Brillas y col., 1.998; Engwall y col., 1.999; Kuo y col., 1.998; Krutzler y col., 1.999), colorantes (Bandara y col., 1.996; Liao y col., 1.999), ácidos carboxílicos (Centi y col., 2.000), compuestos orgánicos nitrogenados (Dillert y col., 1.999; Kiwi y col., 1.994; Maleezky y col., 1.998; Wang y col., 1.999) y para la degradación de plaguicidas disueltos en agua (Andreotti y col., 2.000; Balmer y col., 1.999; Doong y col., 1.998, Huston y col., 1.999; Pignatello y col., 1.993 y 1.995; Sun y col., 1.993).

El proceso **peróxido / UV**, se basa en la generación fotoquímica de radicales mediante la fotodescomposición del peróxido de hidrógeno o de su base conjugada para formar radicales. Se absorben longitudes de onda de 200 a 300 nm. Es importante que las soluciones no tengan un pH alcalino, con el fin de reducir el efecto inhibitor de carbonatos y bicarbonatos. El Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Sur de California, desarrolló un modelo de simulación elaborado mediante datos experimentales, que facilita entender la influencia de los parámetros de la calidad del agua (Carbono total,  $\text{CO}_3$  y materia orgánica natural) y los parámetros del proceso (peróxido, intensidad UV y pH) en la cinética de descomposición de la materia orgánica natural y el alachlor, mediante su tratamiento con luz UV y el peróxido de hidrógeno [57]. Los hallazgos de este modelo fueron los siguientes: 1. La descomposición de la materia orgánica natural debida al ataque de radicales hidroxilo y a la Fotólisis con luz UV fue bastante satisfactoria, 2. Predice satisfactoriamente la cinética de descomposición de la materia orgánica natural como una oxidación progresiva en el tiempo y 3. Los efectos de la intensidad de la lámpara ultravioleta sobre las cinéticas de

oxidación fue la alta producción de radicales hidroxilo (descomposición del peróxido de hidrógeno), al irradiar grandes niveles de radiación.

El sistema  $O_3 / UV$  y  $O_3 / H_2O_2 / UV$ . Para el  $O_3 / UV$ , el ozono da lugar a la formación de peróxido de hidrógeno, que se descompone para originar radicales hidroxilo, incluso con la radiación UVB (280 a 315 nm). Para longitudes de onda menores a 310 nm predomina la Fotólisis directa. Para el sistema  $O_3 / H_2O_2 / UV$ , el proceso se basa en la Fotólisis de ozono; el peróxido de hidrógeno se limita a generar radicales hidroxilo por reacción directa con el ozono.

La oxidación combinada  $O_3 / H_2O_2$  consta de la utilización del peróxido de hidrógeno que tiene gran facilidad para descomponerse por fotólisis, u ozonólisis dando lugar a intermedios reactivos, entre los que se encuentran los radicales hidroxilo ( $OH\bullet$ ) [49]. Estos radicales son agentes oxidantes muy energéticos, capaces de oxidar compuestos orgánicos generándose radicales orgánicos ( $R\bullet$ ) que tienen reacciones de propagación que dan lugar a la destrucción de los compuestos orgánicos (Jansson, 1.992).

#### **4.1.2 La radiación solar**

La radiación solar que alcanza la superficie terrestre de forma directa se denomina Radiación directa, la que alcanza la superficie de la tierra pero es desviada por partículas, sustancias o nubes se llama radiación difusa y al sumar ambas radiaciones tenemos la radiación global. Por lo tanto cuando hay días con alta nubosidad, la radiación directa es menor y la difusa es máxima; y sucede la situación contraria en días sin nubosidad. Gracias a la presencia de sustancias en la atmósfera, la proporción del espectro solar que puede utilizarse es mínima, por tal motivo es necesario optimizar la radiación que alcanza la superficie terrestre. La fracción de radiación UV global (directa + difusa), frente a la global total, tiende a incrementarse al disminuir la transmisividad de la atmósfera, a causa de las nubes, aerosoles y polvo (Mehos M.S. y col., 1.992). Igualmente la relación porcentual media entre la radiación UV y total en días nublados es un poco mayor que los valores en días claros, lo que podría demostrar que la Fotocatálisis tenga un rendimiento aceptable en días nublados [13].

Existen tres tipos de radiación UV:

1. Tipo A: 400 a 315 nm
2. Tipo B: 315 a 290 nm
3. Tipo C: menor a 290 nm

En la estratosfera la radiación solar es absorbida por el ozono, Oxígeno atómico y molecular y nitrógeno atómico y molecular, entre otras sustancias, la parte restante tiene una longitud de onda aproximada de 200 nm y llega a la atmósfera terrestre y es absorbida completamente. La atmósfera absorbe la mayor parte de la radiación entre 200 y 300 nm y en una proporción menor radiaciones entre 300 y 335 nm. La radiación UV presente en la superficie terrestre es de tipo A, con una pequeña proporción tipo B y muy poca tipo C.

La luz ultravioleta se puede obtener de manera artificial o a través de la radiación solar, esta primera genera altos costos por el consumo de energía eléctrica y la segunda es tan solo aprovechada un 10% de su totalidad por algunas sustancias presentes en el agua. La Fotólisis del agua solo ocurre con radiaciones por debajo de los 400 nm, las radiaciones que pueden ser absorbidas directamente por el agua son de longitud de onda menores de 200 nm, lo cual corresponde a una fracción casi despreciable de las radiaciones que llegan a la tierra, el espectro visible (400 – 700 nm) abarca aproximadamente el 45% de los rayos que inciden en la superficie terrestre.

Para conocer la disponibilidad de luz ultravioleta para los procesos fotolíticos, se han desarrollado herramientas para estimar estos valores, a partir de datos experimentales como la radiación global y del análisis del comportamiento de la radiación UV durante su recorrido por la atmósfera. Se han realizado comparaciones de los modelos más utilizados [8], se ha establecido que todos calculan la radiación solar UV en días despejados con una certeza del 95% al mediodía solar [6]. Uno de los modelos más utilizados es el TUV (Total Ultraviolet), diseñado por Madronich del National Center for Atmospheric Research.

### 4.1.3 Procesos fotoquímicos aplicables a la monografía

Los procesos fotoquímicos son aquellos en los que los fotones llevan a cabo el aporte energético para el desarrollo de la reacción química, al ser absorbidos por un catalizador o directamente por los reactivos, dando lugar a la reacción o reacciones [46].

Cuando una molécula absorbe radiación incidente, hay dos consecuencias: activación o disociación. Las dos posibilidades dependen de la cantidad de energía absorbida, y esta a su vez depende de la frecuencia de la luz. Para obtener información acerca de los cambios que puedan ocurrir, es necesario medir las velocidades de desaparición de las sustancias y las de formación de los productos de degradación, la intensidad de la luz y su frecuencia.

Las reacciones fotoquímicas que se dan en fase líquida pueden iniciarse por absorción de luz directa o de sustancias que son fotosensibilizadas. La eficiencia cuántica (relación entre el número de moléculas que entran en una reacción y el de cuantos absorbidos) de un proceso fotoquímico será menor en la fase líquida que para la misma reacción en la fase gaseosa, ya que en la fase líquida un átomo o molécula activa puede desactivarse por frecuentes colisiones con otras moléculas o por reacción con un solvente; también a la pronta recombinación que se da por parte de los átomos o radicales libres formados fotoquímicamente, por el muy corto camino libre medio de la fase líquida que no les permite distanciarse [25].

La fotodisociación es el corazón de la fotoquímica (Turro 1.965, 1.978; Calvert and Pitts 1.996; Ben – Sahul, Haas, Kompa, and Levine 1.981; von Büнау and Wolf 1.987; Wayne 1.988; Klessinger and Michl 1.989). En muchos casos los fotofragmentos son radicales que rápidamente presentan reacciones secundarias y terciarias. La fotodisociación es el motor de muchas reacciones importantes que determinan la compleja química de la atmósfera. La radiación UV proporcionada por el sol genera el arranque de motores y el ciclo del ozono en la estratosfera, entre otras aplicaciones.

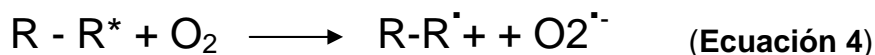
La **Fotólisis directa** es la absorción directa de la luz solar (fotón) por el contaminante seguido de la reacción química correspondiente, sin ninguna colaboración de otras sustancias químicas. Se debe tener presente que la Fotólisis directa es un ejemplo del principio de activación fotoquímica: “Solo la luz que es absorbida por una sustancia logra producir un cambio fotoquímico” (Grotthuss y Draper 1.818). Posteriormente Stark en 1.908 y Einstein en 1.912 aplicaron el concepto de cuanto de energía y reacciones fotoquímicas de las moléculas, y enunciaron el principio de activación cuántica “En la etapa primaria de un proceso fotoquímico, una molécula es activada por un cuanto absorbido de radiación”, sin embargo para que esta pueda ser activada necesita de un cuanto de energía radiante lo suficientemente grande para la ruptura de una molécula, así mismo para que la velocidad de reacción se incremente, es necesario incrementar la intensidad de luz usada en la irradiación, sin ser necesario el incremento de la temperatura de la solución. La activación fotoquímica no depende de la temperatura, ya que la velocidad de activación es independiente de ella, sin embargo si se da un incremento en la velocidad de reacción con la temperatura, se debe a las reacciones térmicas que siguen el proceso de activación. La Fotólisis directa está constituida de variables como la radiación solar que cae sobre la superficie del agua o su transmisión a través del agua, y las características del contaminante como la velocidad de absorción de la luz y el rendimiento cuántico [4, Stumm W., Morgan J.j., Aquatic Chemistry, Wiley Interscience, New Cork, 1.976]. Es importante calcular el rendimiento cuántico de las sustancias para conocer la importancia de la Fotólisis directa bajo condiciones ambientales determinadas, donde otros procesos como la hidrólisis pueden competir.

La Fotólisis directa de una molécula se puede representar en la siguiente ecuación [34]:



Estos radicales presentan ecuaciones en cadena y generan productos finales de menos peso molecular. En presencia de oxígeno es posible que se den reacciones

adicionales de generación de radical superóxido (ecuación 4), que puede degradar compuestos aromáticos con alta absorción en el rango UV [34].



Las aplicaciones de la Fotólisis directa son la destrucción de compuestos orgánicos clorados tales como trihalometanos (THM), clorometanos, cloroetanos, aromáticos y Fenoles mediante el uso de irradiación de 254 nm [43, 12], destrucción de: DDT, lindano, PCP, TNT y antracitas [29], decoloración de colorantes textiles a bajas concentraciones [10] y desinfección [19].

Las limitaciones de la Fotólisis directa son: 1. Baja eficiencia, 2. Aplicable solo a compuestos que absorben entre 200 y 300 nm y 3. Se puede tratar con resultados razonablemente buenos un único compuesto. [34]

La **Fotólisis indirecta** es cuando otros constituyentes del agua (ácidos húmicos y fúlvicos, nitratos y nitritos, materia orgánica, entre otros) absorben la energía solar y la transmiten al contaminante o permiten la formación de especies reactivas como hidroxilos, que reaccionan con el contaminante y lo transforman. Este tipo de Fotólisis participa notablemente en la mineralización total del compuesto (5 Leifer A., The Kinetics of environmental aquatic photochemistry. American Chemical Society, Washington, 1.988.). Igualmente se ha observado un efecto opuesto es decir una desaceleración de la degradación de los contaminantes, en aguas saladas o con determinados compuestos inorgánicos (10, 11. Durand G., Barceló D., Albaigés J., Manssur M., Chromatographia 29 (1.990), 120 -- Choudry G.G., The handbook of environmental chemistry, O. Hutzinger ed. (1.982), Berlín, Vol. 2, pag. 103).

En general, la velocidad de la Fotólisis depende de la intensidad y la distribución de la longitud de onda, igualmente se observa que los contaminantes deben absorber longitudes de onda mayores a 290 nm. Para determinar la velocidad de la Fotólisis de una sustancia problema, es necesario realizar los ensayos en agua desionizada, ya que la presencia de sustancias sensibilizadoras (nitratos, ácidos

húmicos, etc.) aceleran la mineralización del compuesto. Para esta determinación se debe tener en cuenta que el tiempo de vida media de las sustancias varía de la estación del año, la hora, la latitud, etc.

Aunque no fue necesario utilizar colectores solares para la fotodegradación de los Fenoles en las Aguas residuales industriales de Campo Arauca gracias a la ubicación geográfica sobre la zona tropical, es importante mencionar que la mayor parte de los procesos fotolíticos y fotocatalíticos requieren un aprovechamiento mayor de la radiación UV, por lo tanto se han diseñado sistemas para la optimización de la eficiencia óptica en la captación de la radiación solar UV, estos colectores se clasifican en tres tipos (Ciemat, 2.001 y 2.002): sin concentración o baja temperatura (hasta 150 °C), concentración media o media temperatura (150 a 400 °C) y alta concentración o temperatura (> 400 °C). Algunos ejemplos de colectores solares son:

- Colectores solares sin concentración: es una placa plana que se inclina hacia el sol, es simple y de bajo costo. Es usada para desarrollar Fotocatálisis.
- Colectores solares de concentración media: Tienen foco lineal, concentran la luz solar entre 5 y 50 veces, a este grupo pertenecen los colectores solares cilindro – parabólicos y los colectores holográficos. Es usada para desarrollar Fotocatálisis.
- Colectores solares de alta concentración: tiene un foco puntual y son de forma paraboloide. Concentran la radiación solar entre 100 y 10000 veces. Ejemplos: discos parabólicos y hornos solares.

Los procesos fotolíticos varían de una sustancia a otra, ya que algunos son más eficientes sin o con la presencia de sustancias fotosensibilizadoras como la materia orgánica disuelta [13] (los reactivos que se producen al irradiar la materia orgánica son: oxígeno singlete [61], especies radicales [5] y estados tripletes excitados [52]). Tal es el caso de 1- naftol, cuya Fotólisis directa es una reacción bastante eficiente y la degradación en agua pura es rápida (dos horas), sin embargo en agua de mar con lodo este tiempo es de 5 días. La Mesotona y Metabenzotiazuro MBTU, son lentamente fotolizados en agua pura, sin embargo para la Mesotona la materia orgánica disuelta incrementa significativamente su tasa de degradación. [14]

Muchas reacciones fotoquímicas se dan en la capa superior de las aguas superficiales expuestas a la luz solar, dándose lugar a la formación de especies reactivas que pueden degradar contaminantes orgánicos.

En la Fotocatálisis, el oxígeno mejora la eficiencia y la velocidad de fotodegradación de los contaminantes debido a que disminuye la recombinación entre los electrones de la banda de conducción y los huecos dejados en la banda de valencia del  $\text{TiO}_2$ , pero para optimizar este proceso es importante la inyección de oxígeno o aire [27]. Otra técnica de oxidación avanzada que involucra la inyección de aire es la Oxidación en agua sub/ supercrítica, que con presiones (10 – 220 bar) y temperaturas (150-370 °C) altas logran la degradación parcial de los contaminantes, sin embargo para alcanzar la totalidad de su mineralización se ha introducido al proceso el uso de catalizadores como sales de cobre, Cobre y carbón activado, cobre soportado en alúmina, compuestos de Mn y de Cromo activado, entre otras, sin embargo la dificultad de este sistema es la separación final del catalizador [21].

#### **4.1.4 Proceso de Biorremediación de Fenoles**

La Biorremediación es el uso de microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio, que mediante procesos de digestión, asimilación y metabolización degradan o mineralizan sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana.

La Biorremediación es la tecnología que tiene como objetivo acelerar la biodegradación natural de los compuestos orgánicos mediante la optimización de las condiciones limitantes del proceso.

Los Fenoles como todos los compuestos hidrocarburoados actúan como dadores de electrones para las células de los microorganismos, iniciándose la actividad metabólica de la célula y que culmina con la degradación y el consumo de Fenoles.

Los aceptores comúnmente utilizados por los microorganismos son: en condiciones aeróbicas: el oxígeno y en condiciones anaerobias: los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. El proceso de Biorremediación aplicado en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Campo Arauca es de tipo aerobio, por lo tanto el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones y la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, (Ver ecuación).

#### **Degradación aerobia:**



Para llevar a cabo un proceso de biodegradación satisfactorio (Concentración y composición de la comunidad microbiana y la tasa de transformación de contaminantes) se deben tener en cuenta los siguientes factores [49]:

1. **Requerimiento de nutrientes:** El metabolismo microbiano está orientado a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los constituyentes químicos se encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los nutrientes principalmente requeridos son el fósforo y el nitrógeno y que en algunos casos están presentes en el agua o se requiere agregarlos. El rango normal de C:N:P depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1. Para el caso del uso del producto Fenobiol, se utilizó el fertilizante Triple 7 en una relación de 3g/ litro.
2. **pH del agua:** afecta significativamente en la actividad microbiana. El crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de

un intervalo de pH situado entre 6 y 8. Las pseudomonas sp son las bacterias que constituyen el Fenobiol y requieren un pH neutro para su desarrollo.

3. **Temperatura:** generalmente las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 15 y 45 °C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose a inferiores a 0 °C. Para el uso del Fenobiol, la temperatura del agua debe estar entre los 25 – 37°C.
4. **Estructura química del hidrocarburo:** la inherente biodegradabilidad de un hidrocarburo depende, en gran medida, de su estructura molecular. Siendo los parámetros que más van a afectar la halogenación, la existencia de ramificaciones, la baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica. El Fenol tiene una estructura aromática sencilla, ya que no posee cadenas o ramificaciones y está constituida por seis átomos de carbono.

Una de las vías de biodegradación del Fenol se da mediante la ruptura del anillo aromático del Fenol por el enlace meta, sin embargo dependiendo de la concentración inicial del Fenol, se da la acumulación de un metabolito intermediario – semialdehído ácido 2- hidroximucónico (2-HMAS), que inhibe la Biorremediación del Fenol (Wang y Loh, 1.999)

Uno de los casos de Biorremediación de Fenoles consultados fue la participación de microorganismos perifíticos asociados a la raíz de la bora (EICHHORNIA CRASSIPES) en la remoción de Fenol a escala de laboratorio [37]. En esta investigación se plantea la idea de la raíz como un sustrato biológico activo, al cual se asocia una comunidad perifítica integrada por algas, hongos y bacterias, que serían los responsables de la remoción del Fenol. Las conclusiones fueron: 1. la remoción del Fenol se lleva a cabo por microorganismos perifíticos (Bacterias y hongos) que se adaptan a condiciones extremas y tienen la capacidad de catabolizarlo, 2. El pool bacteriano y el fúngico actuando aislados o conjuntamente tenían participación en el proceso ya que la remoción drástica del Fenol ocurría en

períodos de tiempo muy cortos, 3. El ensamblaje de hongos – bacterias le da a la planta una ventaja en la degradación del Fenol y 4. Se evidenció la coexistencia y mantenimiento entre los microorganismos.

Se realizó una investigación en la parte occidental de Venezuela [20], donde se generan mas de 305 mil barriles diarios de aguas residuales con concentraciones de Fenoles superiores ( $1,40 \pm 0,27$  y  $19,36 \pm 2,02$  mg/L) a los límites permisibles de descarga por las normas de ese país. Dicha investigación evaluó la biodegradación aeróbica y anaeróbica de los Fenoles totales de las aguas de producción petrolera. Sus resultados indican que: 1. La biodegradación de Fenoles totales y la remoción de materia orgánica es más eficiente en el medio aerobio que en el anaerobio, 2. La eficiencia de la remoción de Fenoles totales en los reactores UASB fue la siguiente: APPP (Crudo pesado) >APPM (Crudo Mediano) >APPL (Crudo Liviano), mientras que en los reactores SBR fue: APPL>APPM>APPP y 3. Este comportamiento supone la presencia de compuestos fenólicos diferentes en los distintos tipos de aguas de producción, con variada resistencia a la degradación y metabolismo microbianos (aeróbico/anaeróbico).

En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR de la Refinería de Barrancabermeja (Complejo Industrial) [63], que recibe los efluentes de las diferentes plantas de refinación y de los procesos industriales de recuperación de ciénagas aceitosas, se realiza la Biorremediación de Fenoles utilizando el producto Fenobiol. Este proceso se realiza en tres biorreactores aireados, una vez se homogeniza, neutraliza, coagula y clarifican las aguas residuales. La eficiencia de la Biorremediación es de un 95%, tratando diariamente 700 a 1.000 kilogramos de Fenoles, con un caudal promedio de 200.000 barriles por día.

Cultivos puros de *Pseudomonas* han mostrado crecimiento sobre Fenol, durante la reducción de nitratos (desnitrificación) [11, 45, 60]. También ha sido varias veces reportada la transformación de Fenol bajo condiciones de reducción de sulfatos. *Desulfobacterium phenolicum*, por ejemplo, oxida el Fenol a  $\text{CO}_2$  usando  $\text{SO}_4^{2-}$  como aceptor final de electrones [22, 60] Karlsson *et al.* [2], trabajando con medios de cultivos enriquecidos y condiciones meso y termofílicas, encontraron que las rutas de biodegradación de Fenol pueden diferir con respecto a la temperatura a la cual se realice el proceso. La degradación aeróbica microbiana

de pentacloroFenol, por ejemplo, ha sido identificada en una amplia variedad de ambientes que incluyen aguas residuales industriales, lodos activados, suelos y sedimentos acuáticos [31].

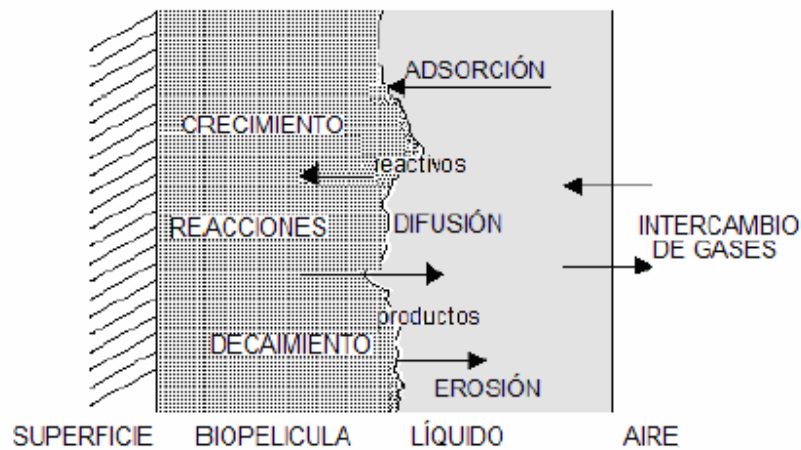
Entre las bacterias que tienen la habilidad de degradar compuestos fenólicos bajo condiciones aeróbicas, se encuentran: *Flavobacterium* sp., *Rhodococcus chlorophenolicus*, *Rhodococcus* sp., *Arthrobacter* sp., *Mycobacterium* sp., *Sphingomonas* sp. y *Pseudomonas* sp. [31]. Banerjee [7] encontró que las especies mayormente responsables de la biodegradación de Fenoles fueron *Pseudomonas stutzeri* y *Pseudomonas putida*, durante el tratamiento de aguas residuales sintéticas en reactores biológicos rotatorios de contacto (RBC). Lovley *et al.* (41) describieron la oxidación de Fenol a CO<sub>2</sub> por *Geobacter metallireducens* mediante la reducción desasimilatoria de hierro. Esta bacteria utiliza Fenol como fuente de carbono y Fe (III) como aceptor terminal de electrones.

Las pseudomonas son bacterias gram negativas, comunes en napas freáticas, son bacilos psicrófilos, presentan flagelos periféricos, producen pigmentos de colores verde, azul verdoso, rojo y marrón y no forman esporas. Las pseudomonas sp. son biosurfactantes que pueden reducir la tensión superficial, estabilizar emulsiones y promover la formación de espumas que no son tóxicas ni peligrosas y son biodegradables. Las ventajas de las pseudomonas son: importante diversidad, inocuidad para el medio ambiente, posibilidad de producción a gran escala, selectividad y efectividad bajo condiciones extremas en pequeñas cantidades. Su importante papel en la Biorremediación de hidrocarburos se debe a que facilitan la emulsión de hidrocarburos y tienen la facultad de solubilizar contaminantes hidrocarbonatos y aumentar su disponibilidad para la degradación microbológica.

Generalmente en los procesos de Biorremediación se forma la biopelícula bacteriana, que consiste en que una célula individual se une a una superficie, en este caso la geomembrana que recubre la piscina de aireación. Una vez adherida la célula comienza a crecer y a esparcirse sobre la superficie en una monocapa e igualmente forma microcolonias, que crecen hasta estabilizarse. En esta biopelícula, las bacterias viven de la energía que adquieren de las transformaciones del sustrato, la fuente de carbono disponible en los Fenoles, el fertilizante triple 7 y las sustancias que se encuentran en el agua (Wik, 1.999). Los

sustratos involucrados en las reacciones son transportados principalmente por difusión dentro y fuera de la biopelícula, donde las reacciones tienen lugar. La mayor parte del oxígeno requerido para las reacciones es introducido en la interfase aire-agua, a partir de la cual también se difunden productos gaseosos, tales como el dióxido de carbono (**Figura 6**). El espesor de la biopelícula depende del crecimiento y decaimiento de las bacterias, así como por la erosión de la biopelícula y la adsorción de material presente en el agua (Arvin y Harremoës, 1.990).

**Figura 6. Ilustración de los fenómenos básicos en las biopelículas.**



Fuente: **CINÉTICA DE BIODEGRADACIÓN DE FENOL POR GRÁNULOS AEROBIOS** Claudia CALVARIO, Violeta VALERA, Julio WASSMAN y Gabriela VÁZQUEZ

#### **4.1.5 Combinación de tecnologías: Procesos de Oxidación Avanzada – POA y Biorremediación**

La mayor parte de la bibliografía consultada menciona la combinación de los Procesos de Oxidación Avanzada y la Biorremediación, como un procedimiento en el que inicialmente participan los POA para reducir la toxicidad del agua residual en la población microbiana, transformando sustancias no biodegradables en

biodegradables y luego se completa con la mineralización de los contaminantes orgánicos en el proceso de Biorremediación.

Un estudio realizado por Ksibi et al. (2003) analizó la relación entre la estructura y la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos haciendo posible la evaluación de un tratamiento biológico después de la degradación catalítica. Las proporciones  $DBO_5/DQO$  indican el grado de biodegradabilidad del agua residual; si esta relación es superior a 0,4 indica que esta solución es rápidamente biodegradable, pero si se encuentra por debajo de 0,4 es lentamente biodegradable [50]. Durante la fotodegradación del Fenol la  $DBO_5$  aumenta con la disminución de la  $DQO$ , indicando la ruptura de las cadenas moleculares o la reestructuración de estructuras moleculares, de compuestos complejos a compuestos más simples [32].

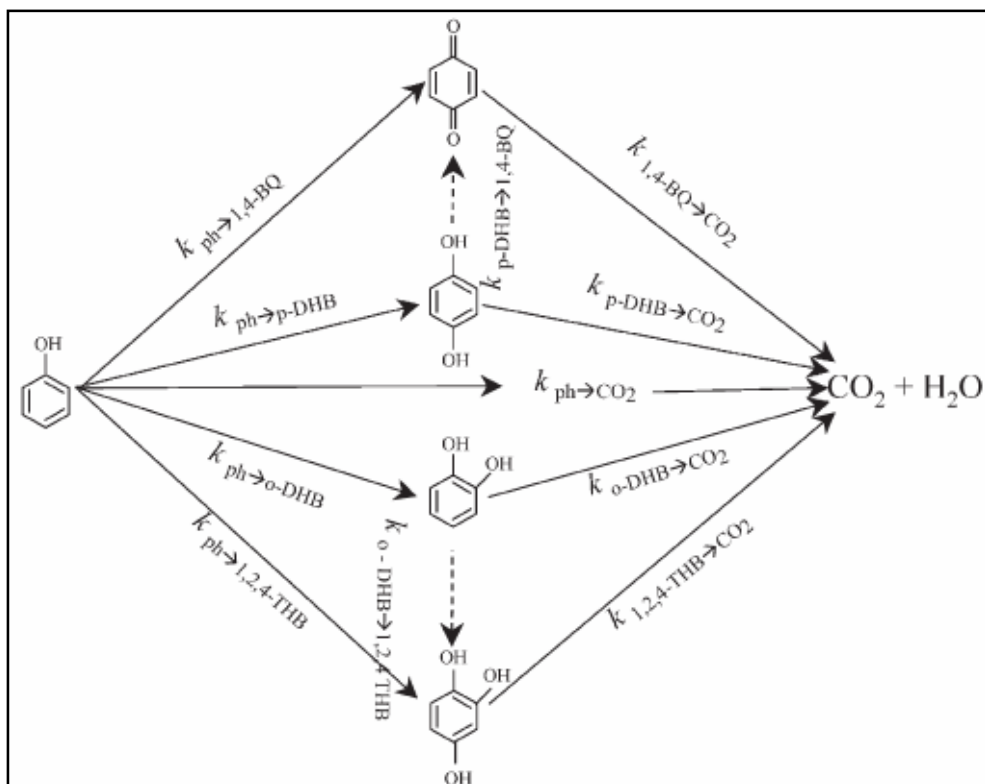
García M. estudió la decoloración completa del Cibacron Rojo FN –R (simulando el agua residual de textiles), sustancia no biodegradable, mediante la secuencia de un tratamiento: Digestión anaerobia – Fotofenton/ Ozono [24]. El porcentaje de mineralización logrado por el acoplamiento de ambos procesos fue del 80%.

Joseph J. et al, experimentaron la biodegradación y la Fotólisis del pentacloroFenol - PCP en corrientes de agua dulce artificiales [46] y concluyeron que la Fotólisis de PCP en las aguas corrientes es el primer mecanismo para su remoción, después de un período de dos semanas la microflora acuática comienza a adaptarse a la mineralización de PCP y sustituye la Fotólisis como el mejor proceso de remoción de PCP, ya que las bacterias presentes en el agua no se ven significativamente afectadas. Es importante tener en cuenta que ríos con concentraciones mayores o iguales a 400 ppb de PCP presentan mortalidad de peces, hasta en un período de semanas, es probable que la población microbiana reduzca estas concentraciones hasta niveles no tóxicos para animales superiores como los peces. Para que se lleve a cabo la Fotólisis es importante tener en cuenta el promedio de profundidad de la corriente, ya que de este depende la difusión de la luz; por otro lado para lograr tasas de biodegradación satisfactorias, los lechos de las corrientes deben tener superficies disponibles para la fijación microbial (rocas, macrófitas o sedimentos).

#### **4.1.6 Vías de Degradación del Fenol y sus Productos de Degradación**

Un estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín [50], acerca de las posibilidades de aplicación de Fotocatálisis Heterogénea a los procesos de remoción de Fenoles en medio acuoso, concluyó que: 1. La concentración del Fenol se degrada de forma consistente con una relación de primer orden, alcanzando la concentración cero al final del experimento, 2. Las especies intermedias perceptibles en la fase líquida aparecen inicialmente y luego disminuyen hasta que desaparecen totalmente, 3. La completa desaparición de las especies intermedias ocurre a veces cerca del punto de desaparición completa del Fenol y 4. El Carbono Orgánico Total cae de manera monótona desarrollando esencialmente una cinética de orden-cero, indicando un muy corto tiempo para la oxidación completa. [53] En la figura 7 (siguiente página) se presentan las vías de degradación en series paralelas del Fenol propuestas por Rubiano H. y Laguna C.

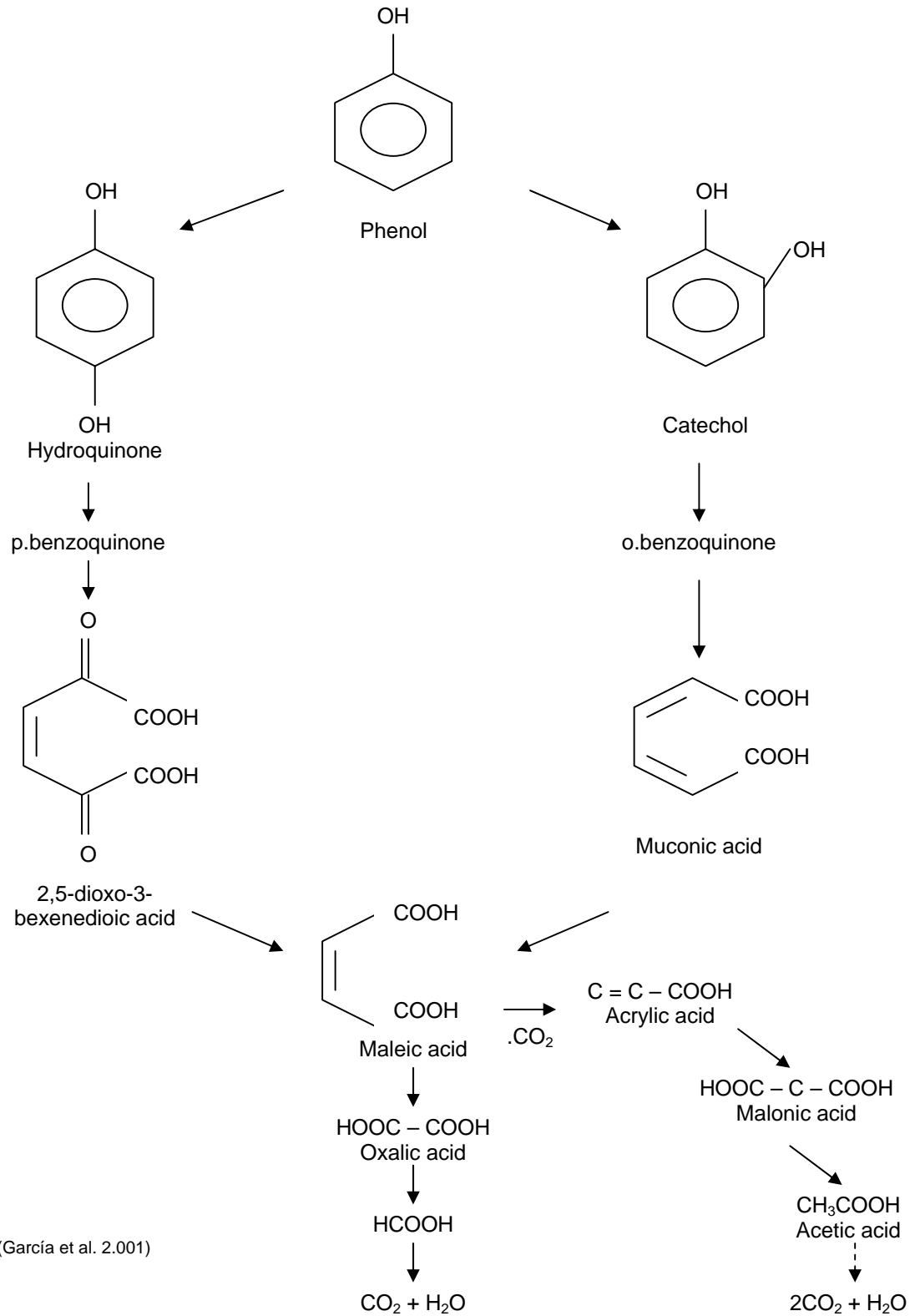
**Figura 7. Modelo de reacción en series paralelas**



Fuente: Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de Fenoles en medio acuoso. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBINA – SEDE MEDELLÍN.

Se encontró otra vía de degradación del Fenol [26], en el cual se plantea que los Fenoles presentan reacciones de sustitución electrófila aromática, donde los electrones del anillo aromático reaccionan con especies deficientes de electrones. Los compuestos intermedios que se forman de la oxidación del Fenol, generalmente son catecol, hidroquinona, benzoquinona, ácidos como el oxálico, acético y maleico, como se muestra en la figura 8 (siguiente página). Los intermedios como la quinona y el bencenodiol se transforman en compuestos de bajo peso molecular, lo cual los hace más refractarios a la oxidación total.

Figura 8. Compuestos formados del proceso de oxidación del Fenol.



Fuente: (García et al. 2.001)

## **4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS COMBINADAS (FOTÓLISIS Y BIORREMEDIACIÓN) EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE CAMPO ARAUCA.**

En el presente numeral, se hace la descripción de la implementación de las tecnologías Fotólisis y Biorremediación, en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca, que se desarrolló en tres fases:

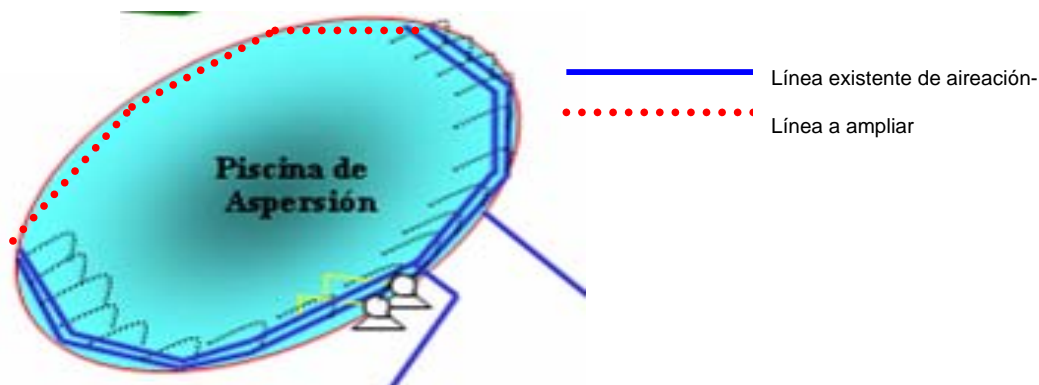
- *Primera Fase:* Ampliación del sistema de aireación adicional (anillo perimetral) e instalación de la red fotolítica en la piscina de aireación existente.
- *Segunda Fase:* Instalación de aireadores superficiales.
- *Tercera Fase:* Siembra de Fenobiol.

### **4.2.1 Primera Fase: Ampliación del sistema de aireación adicional (anillo perimetral) e instalación de la red fotolítica en la piscina de aireación existente.**

#### **✓ *Ampliación del anillo perimetral***

Anteriormente el sistema de aireación manejaba un caudal de 10 litros por segundo, distribuido perimetralmente en la piscina a través de 31 orificios. Con el fin de incrementar el caudal de recirculación, se completó el anillo de aspersión (ver figura 9 siguiente página) en una longitud adicional de 111 metros de tubería galvanizada de 2 pulgadas de diámetro, con 28 orificios de un diámetro de 1/32 pulgadas. La alimentación de agua se hizo a través de una motobomba de 25 HP y un flujo de 320 gpm. En la foto 4 del Anexo A, se ilustra la piscina de aireación con el anillo perimetral ampliado.

**Figura 9. Ampliación de anillo de aspersión de la piscina de aireación**



✓ **Instalación de la red fotolítica.**

Posteriormente se instaló la red fotolítica, alimentada con una motobomba de 25 HP y con un flujo de agua de 320 galones por minuto.

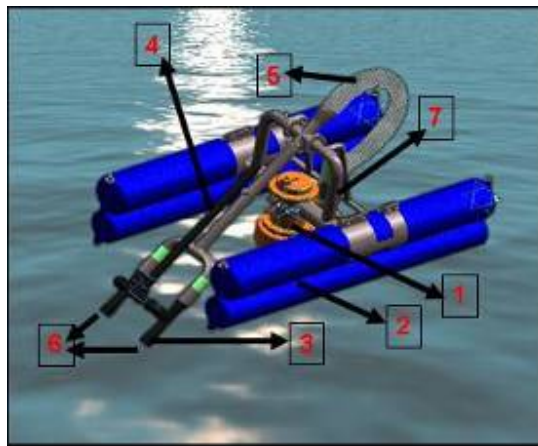
El Sistema fotolítico fue diseñado por profesionales del Instituto Colombiano del Petróleo<sup>14</sup>, mediante la aplicación del modelo PIPE PHASE de SIMSEL (ver los Datos de salida del modelo en el Anexo B). La red se construyó con 270 metros lineales de tubería de PVC de 3, 1 ½ y 1 pulgadas de diámetro y se ancló a los cuatro extremos equidistantes de la piscina, para permitir que esta se mantuviera sobre la superficie de la lámina de agua. Las boquillas de una pulgada de diámetro (referencia: 1HH-PVC8), fueron importadas de Estados Unidos de América, y se instalaron para nebulizar el chorro de agua (altura máxima alcanzada: 4 metros), optimizando el contacto del agua con la luz ultravioleta, y así se da lugar a la Fotólisis de los Fenoles. (Foto 5, Anexo A). Este Sistema fotolítico funcionaba las 24 horas.

#### **4.2.2 Segunda Fase: Instalación de aireadores superficiales.**

<sup>14</sup> Profesional ICP – Proyectos: Jorge Forero – [jorge.forero@ecopetrol.com.co](mailto:jorge.forero@ecopetrol.com.co)

Se instalaron seis (6) aireadores comerciales Tipo Venturi<sup>15</sup> de 5 HP (ver figura 10) descripción de partes del equipo) de alta eficiencia como complemento de la oxidorreducción de los Fenoles presentes en la piscina y para favorecer los procesos de Biorremediación aeróbica. En el anexo C, se presentan los cálculos de transferencia de oxígeno que genera cada aireador.

**Figura 10. Partes del equipo de aireación de alta eficiencia**



- 1) Bomba
- 2) Sistema de flotación del equipo
- 3) Jet pumps (efecto venturi)
- 4) Succión de oxígeno de la atmósfera
- 5) Manguera para descarga de la bomba
- 6) Descarga de agua con oxígeno
- 7) estructura del equipo

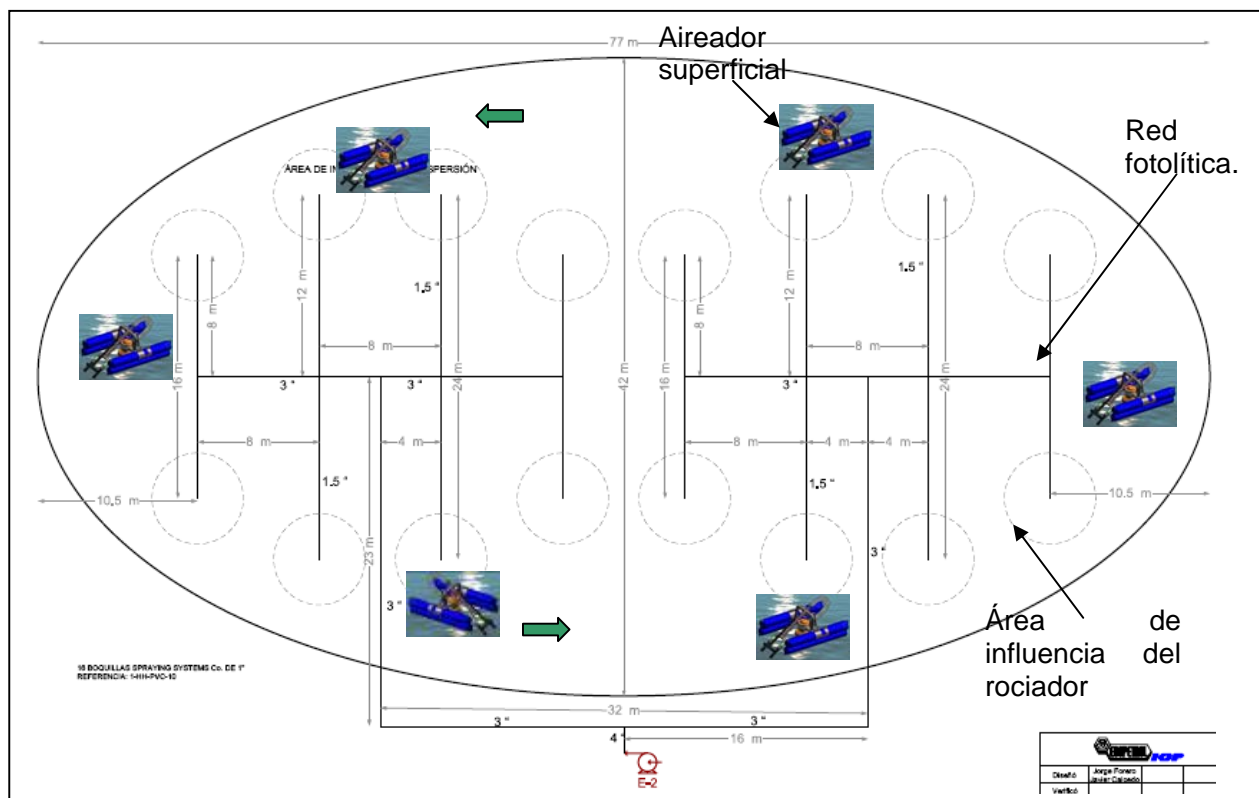
Fuente: NEW GAS AND OIL LTDA. Ing. Zamir Quizena Espinosa

En la figura 11 (ver siguiente página) se presenta un esquema de la piscina de aireación con la red fotolítica y la ubicación de los aireadores superficiales.

---

<sup>15</sup> Diseño: NEW GAS AND OIL LTDA - OPERACIÓN, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ASESORIAS EN GAS, AGUA Y PETRÓLEO - [newgas@epm.net.co](mailto:newgas@epm.net.co), Ing. Zamir Quizena Espinosa - Gerente

**Figura 11. Piscina de aspersión mejorada**



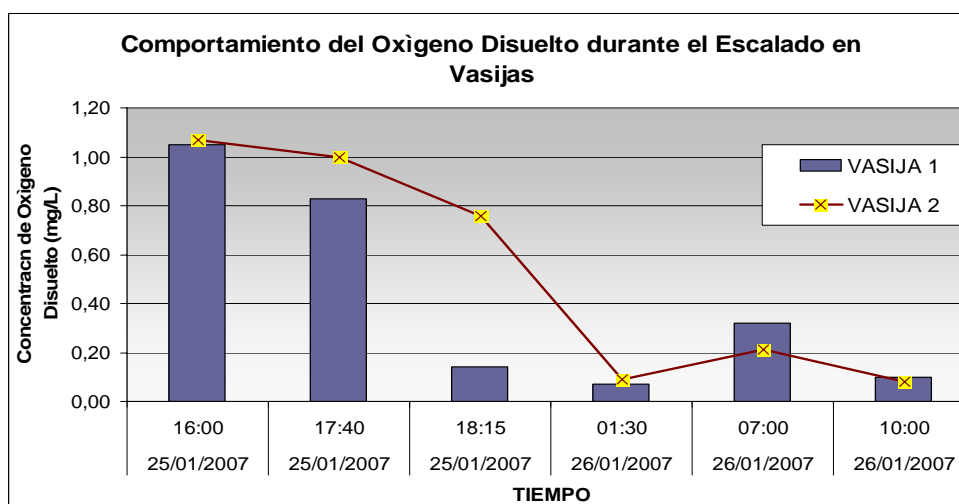
**4.2.3 Tercera fase: Siembra de Fenobiol (bacterias fenólicas) para la degradación de Fenoles.**

Las condiciones físicas y biológicas de la piscina de aireación, son satisfactorias para el desarrollo de poblaciones bacterianas, gracias a la acumulación de lodos en el fondo; situación que brindó la posibilidad de siembra del Fenobiol. Este producto ha sido desarrollado y patentado por el Instituto Colombiano del Petróleo - ICP y viene siendo aplicado en procesos de tratamiento de Fenoles, incrementando su eficiencia.

A continuación se presenta la descripción del tratamiento realizado a través de la siembra e inyección del Fenobiol:

El primer día se inició el escalado del Fenobiol (Anexo D: ficha técnica del producto), con agua residual industrial tomada del API (Unidad del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Campo Arauca), en dos vasijas pequeñas (capacidad de 100 Litros cada una), con suministro de nutrientes (fertilizante Triple 7) y con inyección de oxígeno (aireador tipo pecera). Se monitorearon in situ (cada 12 horas) el Oxígeno Disuelto y la Temperatura, para observar el crecimiento bacteriano, ya que no se contó con laboratorio bacteriológico cercano para realizar el conteo de microorganismos. Ver foto 7 – Anexo A).

**Gráfico 2. Comportamiento del oxígeno disuelto durante el escalado del Fenobiol.**



En el gráfico 2 se observa que la concentración de oxígeno disuelto disminuyó a las dos (2) horas de haberse inoculado las bacterias fenólicas (*pseudomonas sp.*), ya que ellas iniciaron el consumo de oxígeno para la biodegradación de los Fenoles.

Al tercer día se instalaron dos biorreactores (ver foto 8 – Anexo A) de 2 metros cúbicos cada uno, frente a la última sección del separador API. Se preparó el caldo de cultivo y se realizó el seguimiento al crecimiento microbiano en cada uno

de los biorreactores (ver foto 9 – Anexo A), una vez se alcanzó un escalado superior o igual a  $10^6$ , se inició la inyección del Caldo de cultivo de los dos biorreactores a la piscina de aireación, en la última sección del API (ver foto 8 – Anexo A), de donde el agua residual es bombeada a la piscina. Las cantidades de sustrato o triple 7 se fueron reduciendo con el tiempo, ya que la demanda de nutrientes por parte de las bacterias fue menor.

En la tabla 12 se presentan los resultados de los muestreos iniciales que se realizaron momentos antes de inyectarse el caldo de Fenobiol al Sistema de Tratamiento de Aguas. Se realizó análisis de Fenoles y bacteriológico en el laboratorio de Aguas y Suelos del Instituto Colombiano del Petróleo - ICP.

**Tabla 12. Resultados de las concentraciones de Fenoles y de los recuentos bacteriológicos iniciales de las aguas residuales industriales del Campo Arauca y en las aguas de los pozos Arauca 1, 2 y 3.**

| PUNTO                                     | ENTRADA API            | SALIDA API                 | POZO ARAUCA #1             | POZO ARAUCA #2             | POZO ARAUCA #3             | SALIDA SISTEMA             | BR 1                       | BR 2                       | BR 2                       | ENTRADA SISTEMA 04*        | SALIDA API                 | SALIDA EFLUENTE            | FONDO DE LA PISCINA        |
|---|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| FECHA Y HORA                              | 30/01/2007<br>08:00:00 | 31/01/2007<br>06:30:00 a.m | 30/01/2007<br>08:00:00 a.m | 30/01/2007<br>08:00:00 a.m | 30/01/2007<br>08:00:00 a.m | 30/01/2007<br>08:30:00 a.m | 30/01/2007<br>09:00:00 a.m | 30/01/2007<br>11:00:00 a.m | 31/01/2007<br>06:00:00 a.m | 31/01/2007<br>06:00:00 a.m | 31/01/2007<br>06:00:00 a.m | 31/01/2007<br>06:30:00 a.m | 31/01/2007<br>08:00:00 a.m |
| FENOLES (mg/L)<br>MÉTODO<br>COLORIMÉTRICO | 10,9                   | -                          | 17,86                      | 11,3                       | 2,81                       | 0,795                      | 9,43                       | 9,89                       | 9,44                       | 10,36                      | 10,9                       | 0,274                      | -                          |
| FECHA Y HORA                              | 30/01/2007<br>08:00:00 | 30/01/2007<br>08:00:00 a.m | 30/01/2007<br>08:00:00 a.m | 30/01/2007<br>08:00:00 a.m | 30/01/2007<br>08:00:00 a.m | 30/01/2007<br>09:00:00 a.m | 30/01/2007<br>09:00:00 a.m | 30/01/2007<br>11:00:00 a.m | 31/01/2007<br>06:30:00 a.m | 31/01/2007<br>06:00:00 a.m | 31/01/2007<br>06:00:00 a.m | 31/01/2007<br>06:30:00 a.m | 31/01/2007<br>08:00:00 a.m |
| AGAR<br>NUTRITIVO                         | 1,00E+02               | 2,30E+05                   | -                          | -                          | -                          | 8,70E+04                   | 8,80E+07                   | 1,10E+08                   | 1,10E+08                   | -                          | -                          | -                          | 1,20E+06                   |
| AGAR<br>CETRIMIDE                         | Negativo               | 8,50E+02                   | -                          | -                          | -                          | 5,00E+02                   | 3,80E+04                   | 1,70E+05                   | 2,50E+05                   | -                          | -                          | -                          | 5,00E+03                   |
| AGAR<br>MBS+FENOL                         | 83                     | 3,50E+05                   | -                          | -                          | -                          | 7,50E+04                   | 9,50E+07                   | 1,20E+08                   | 1,30E+08                   | -                          | -                          | -                          | 8,30E+06                   |

#### **Análisis de resultados de Fenoles:**

- ✓ Las concentraciones a la entrada del API se mantuvieron constantes, es decir con valores de 10,9 y 10,36 mg/L de Fenoles (valor promedio 10,63 mg/L).

- ✓ Se hizo necesario caracterizar la concentración de Fenoles en cada uno de los tres pozos de producción que constituyen el Campo Arauca, evidenciándose que el pozo Arauca 1 es el mayor aportante con una concentración de 17,86 mg/L, seguido del Arauca 2 con 11,3 mg/L y del Arauca 3 con 2,81 mg/L.
- ✓ Las concentraciones de Fenoles en los biorreactores son constantes, necesarias para mantener la fuente de carbono para las bacterias fenólicas.
- ✓ Teniendo en cuenta un valor promedio de Fenoles a la entrada del separador API igual a 10,63 mg/L, se evidenció una remoción de Fenoles igual a 97,4%. Este resultado se obtuvo mediante la Biorremediación de las bacterias fenólicas y el Sistema fotolítico instalado en la piscina de aspersion.

#### **Análisis de resultados Bacteriológicos:**

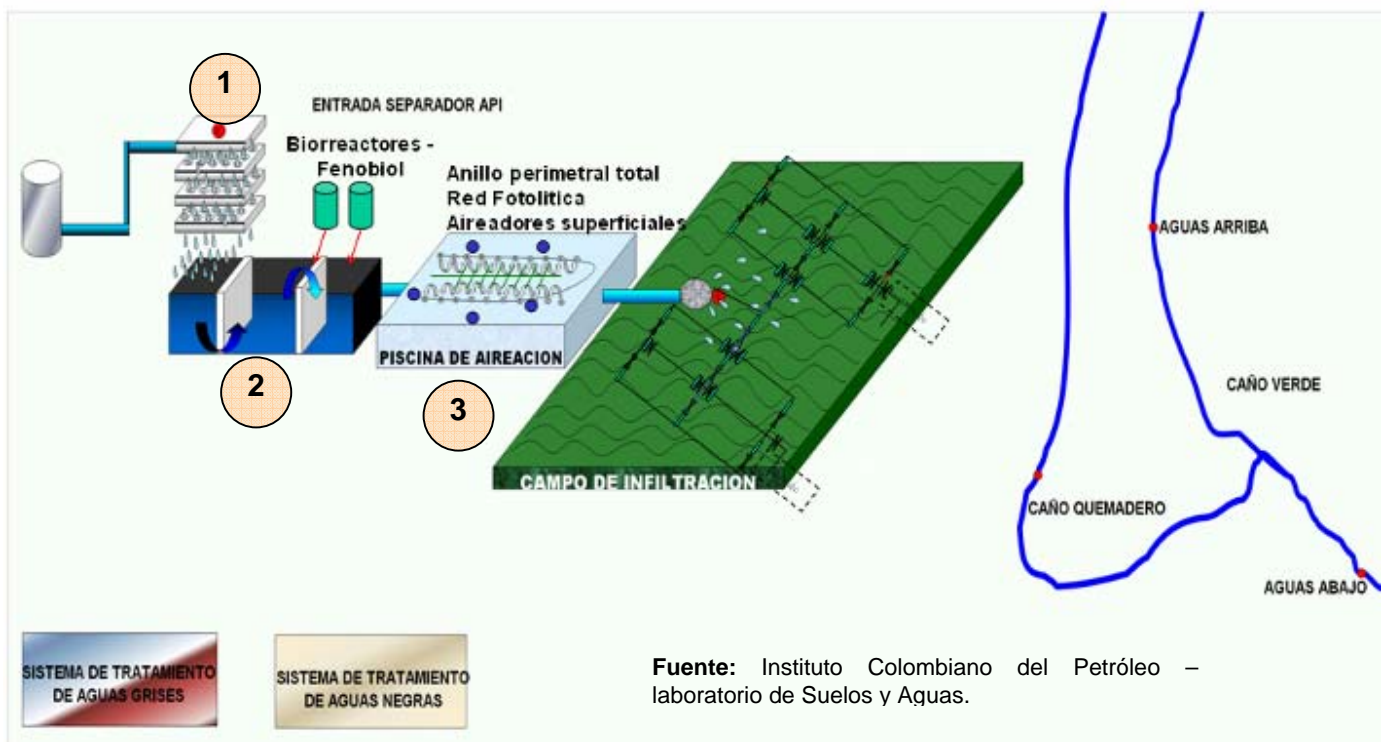
- ✓ Se inició el escalado de los caldos microbianos, en los biorreactores, con una población igual a  $1,00E+02$ , y como se observa en la tabla 12, se incrementó en un orden de  $1,30E+08$  (BR 2), en un período de 24 horas. Lo anterior indica que se pueden realizar adiciones de los caldos al Sistema de Tratamiento 24 horas de haberse preparado.
- ✓ El proceso de adición de caldo microbiano a través de los BR1 y BR2 fue favorable, ya que había un medio adecuado para la adaptación del nuevo pool que se adicionaba.
- ✓ El monitoreo de la población microbiana en los lodos del fondo de la piscina antes de la inyección del Fenobiol, indica que habían bacterias nativas degradadoras de fenoles.
- ✓ Se encontraron individuos en el recuento bacteriológico realizado a las aguas residuales industriales a la entrada del Sistema de Tratamiento, confirmándose la presencia de bacterias degradadoras de Fenoles nativas.

#### 4.2.4 Nuevo esquema del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca.

Una vez implementadas las mejoras para la remoción de Fenoles, el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca continúa con las mismas unidades (ver figura 12), pero realizando las modificaciones mencionadas en los numerales 4.2.1 y 4.2.2:

1. *Torre de Enfriamiento*: Ubicada sobre la primera cámara del API, cuya función es reducir la temperatura del agua e incrementar el Oxígeno Disuelto del agua.
2. *Unidad API*: La función de esta unidad es remover los aceites y grasas, mediante el flujo laminar y la separación por gravedad. En la última cámara del separador, el agua tratada es bombeada hacia la piscina de aireación; en esta cámara se realiza la inyección de Fenobiol (un biorreactor cada 12 horas).
3. *Piscina de aireación*: En esta piscina se realizan tres procesos: aireación, Fotólisis y Biorremediación.

Figura 12. Nuevo esquema del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca



#### **4.3 CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES DE FENOLES POSTERIOR A LA APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS.**

Los monitoreos y análisis de laboratorio se realizaron según los procedimientos establecidos en el Standard Methods edición 20 de 1.998, y fueron ejecutados por el laboratorio de Aguas y Suelos del Instituto Colombiano del Petróleo –ICP. Se utilizó el método fotométrico para el análisis de Fenoles.

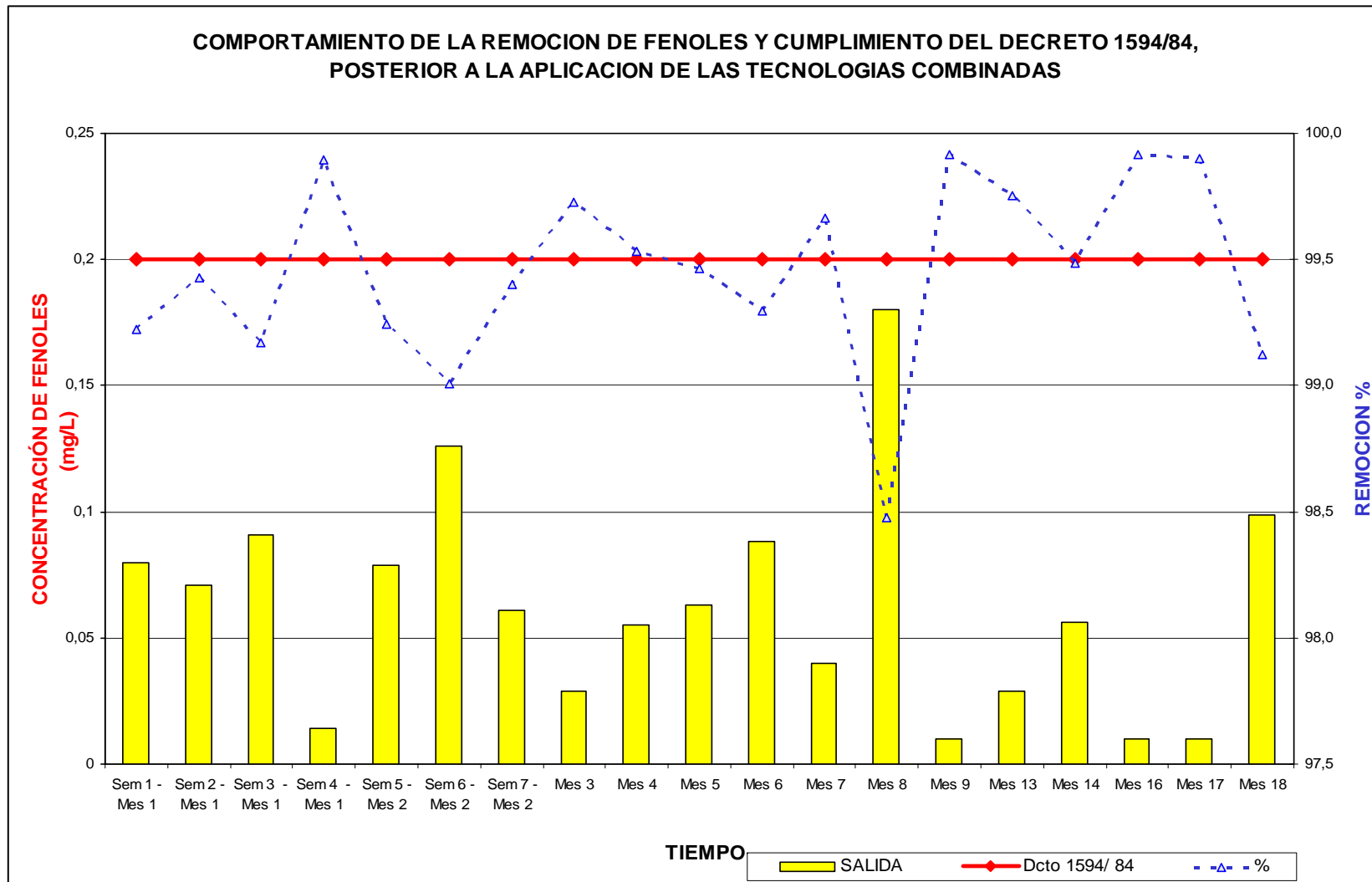
Una vez instaladas las tecnologías combinadas (Fotólisis y Biorremediación), durante los dos primeros meses se realizaron muestreos semanales de Fenoles a la entrada y a la salida del Sistema de Tratamiento de Aguas, y posteriormente se continuó con muestreos mensuales.

A continuación en la tabla 13 se presentan los resultados de los monitoreos hechos al Sistema de Tratamiento en un período de 18 meses.

**Tabla 13. Resultados de las concentraciones de Fenoles a la entrada y a la salida Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca, después de instaladas las tecnologías combinadas.**

| <b>TIEMPO DE MUESTREO</b> | <b>ENTRADA API (mg/L)</b> | <b>CAMPO DE INFILTRACIÓN (mg/L)</b> | <b>% REMOCIÓN</b> |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Semana 1 - Mes 1          | 10,31                     | 0,08                                | 99,2              |
| Semana 2 - Mes 1          | 12,45                     | 0,07                                | 99,4              |
| Semana 3 - Mes 1          | 10,94                     | 0,09                                | 99,2              |
| Semana 4 - Mes 1          | 13,34                     | 0,01                                | 99,9              |
| Semana 5 - Mes 2          | 10,47                     | 0,08                                | 99,2              |
| Semana 6 - Mes 2          | 12,68                     | 0,13                                | 99,0              |
| Semana 7 - Mes 2          | 10,2                      | 0,06                                | 99,4              |
| Mes 3                     | 10,69                     | 0,03                                | 99,7              |
| Mes 4                     | 11,81                     | 0,06                                | 99,5              |
| Mes 5                     | 11,77                     | 0,06                                | 99,5              |
| Mes 6                     | 12,5                      | 0,09                                | 99,3              |
| Mes 7                     | 11,86                     | 0,04                                | 99,7              |
| Mes 8                     | 11,80                     | 0,18                                | 98,5              |
| Mes 9                     | 11,80                     | 0,01                                | 99,9              |
| Mes 13                    | 11,8                      | 0,029                               | 99,8              |
| Mes 14                    | 10,91                     | 0,06                                | 99,5              |
| Mes 16                    | 11,9                      | 0,01                                | 99,9              |
| Mes 17                    | 9,99                      | 0,01                                | 99,9              |
| Mes 18                    | 11,3                      | 0,099                               | 99,1              |

**Gráfico 3. Remoción de Fenoles y cumplimiento del decreto 1594 de 1.984, en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca, una vez instaladas las tecnologías combinadas.**



De acuerdo con los resultados obtenidos (ver tabla 13 – pag. 77 y gráfico 3 – pag. 78), la aplicación de las tecnologías combinadas fue una opción acertada en la remoción de los Fenoles, ya que las concentraciones a la salida del Sistema de Tratamiento (Eje principal X) estuvieron por debajo del valor de la norma (*Dcto 1594 de 1.984: 0,2 mg/L*). El valor promedio del porcentaje de remoción (Eje secundario X) de los Fenoles en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca, es del 99,5% durante el período de tiempo observado.

Es posible que la fotodegradación de los Fenoles en las aguas residuales industriales de Campo Arauca, se deba a la Fotólisis directa sobre dicho contaminante o a la acción oxidativa de sustancias presentes en el agua que fueron activadas por la radiación solar. Se sospecha que la materia orgánica [13] - *representada por la DBO<sub>5</sub> de las aguas de la formación (Ver numeral 3.1 Caracterización de las aguas del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca)-* y las sustancias húmicas-*generadas en el proceso de preparación y fermentación del Fenobiol por su base de fijación* - presentes en la piscina de aireación, influyen en la rápida fotodegradación de los Fenoles. A diferencia de países como España y Estados Unidos, en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de Campo Arauca no fue necesario utilizar colectores solares, gracias a la ubicación geográfica sobre la zona tropical que permite una mayor incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre durante gran parte del año (siete meses), y al efecto nebulizador generado por los rociadores del Sistema fotolítico (entre menor sea el tamaño de la partícula, mayor la acción fotolítica de la radiación ultravioleta).

La adecuación de la piscina de aireación como un Sistema de Tratamiento Biológico Aeróbico tuvo un resultado complementario y exitoso, ya que durante

los 18 meses observados, se mantuvo constante la concentración de Fenoles a la salida del Sistema de Tratamiento (Vertimiento). Del consorcio de bacterias que conforman el Fenobiol, se conoce la presencia de *Pseudomonas sp.*, quienes han sido reconocidas mundialmente en la degradación de Fenoles. [20, 31]

#### **4.4 PRUEBAS DE REMOCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS APLICADAS.**

En el numeral anterior, se presentaron los excelentes resultados obtenidos para la remoción de los Fenoles presentes en el agua residual industrial del Campo Arauca, gracias a la combinación simultánea de la Fotólisis y la Biorremediación en la piscina de aireación del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales. En la presente monografía se realizó una prueba para observar el efecto que se genera en la remoción de Fenoles, cuando se suspende la Fotólisis del esquema del Sistema Tratamiento.

Durante la ejecución de estas pruebas se realizaron muestreos semanales de aguas residuales industriales, tanto a la entrada como a la salida del Sistema de Tratamiento. Las muestras fueron tomadas teniendo en cuenta los procedimientos establecidos en el Standard Methods edición 20 de 1.998. Los análisis de Fenoles presentes en las muestras fueron realizados por el Laboratorio de Aguas y Suelos del ICP, mediante el método fotométrico.

##### **4.4.1 Metodología de las pruebas.**

**Semana 1:** A las 00:00 horas se tomó una muestra de agua para análisis de Fenoles a la entrada y a la salida del Sistema, posteriormente se apaga Sistema fotolítico (red fotolítica). El último día de la semana (a las 168:00 horas de experimentación) se tomó una muestra de agua a la entrada y a la salida del Sistema de Tratamiento.

**Semana 2:** se mantuvo apagado el Sistema fotolítico y adicionalmente el primer día de la semana se apagaron todos los aireadores superficiales. El último día de la semana, es decir a las 336:00 horas de haberse iniciado las pruebas, se tomó una muestra de agua a la entrada y a la salida del Sistema de Tratamiento.

**Semana 3:** El primer día se prendió únicamente la Fotólisis (red fotolítica) y se mantuvieron apagados los aireadores. A las 504 horas, se finalizaron las pruebas tomando una muestra de agua a la entrada y a la salida del Sistema de Tratamiento y se normalizó todo el Sistema encendiendo los aireadores superficiales.

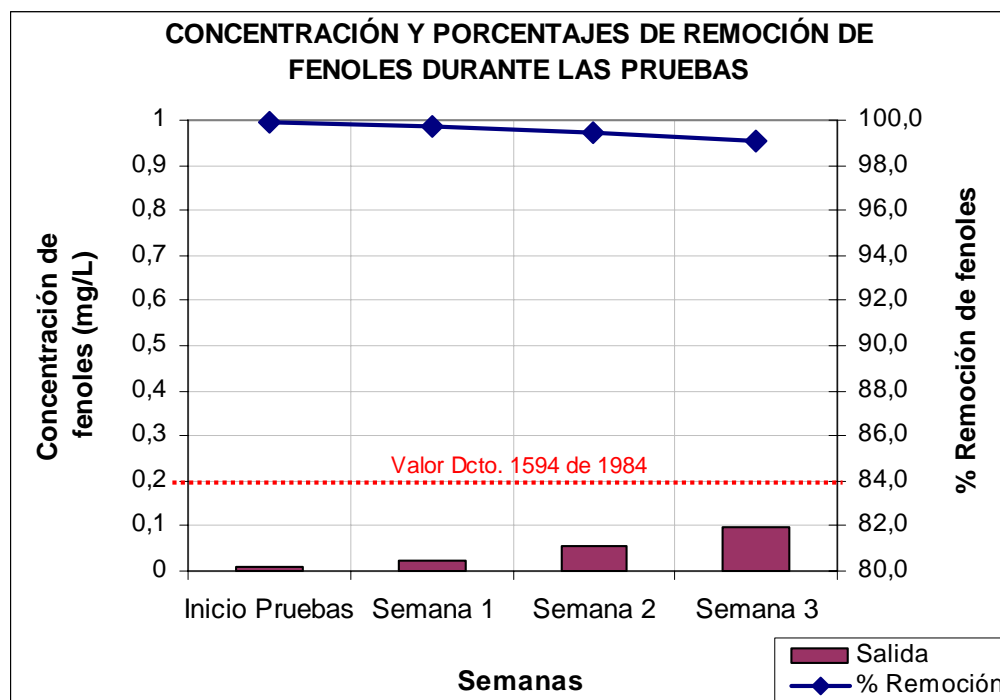
#### 4.4.2 Resultados de los análisis de Fenoles realizados durante las pruebas.

En la tabla 14 se presentan los resultados de las concentraciones de Fenoles durante la ejecución de las pruebas.

**Tabla 14. Resultados de la concentración de Fenoles en las aguas residuales industriales de Campo Arauca durante la ejecución de las pruebas.**

| Concentración de Fenoles (mg/L) |              |          |                       |              |          |                      |              |          |                       |              |          |
|---------------------------------|--------------|----------|-----------------------|--------------|----------|----------------------|--------------|----------|-----------------------|--------------|----------|
| Inicio de las pruebas           |              |          | Fin de la 1era semana |              |          | Fin de la 2da semana |              |          | Fin de la 3era semana |              |          |
| Entrada STARI                   | Salida STARI | % Remocn | Entrada STARI         | Salida STARI | % Remocn | Entrada STARI        | Salida STARI | % Remocn | Entrada STARI         | Salida STARI | % Remocn |
| 9,99                            | <0.010       | 100,0    | 9,34                  | 0,022        | 99,8     | 9,95                 | 0,054        | 99,5     | 10,2                  | 0,096        | 99,1     |

**Gráfico 4. Concentración y porcentaje de remoción de Fenoles durante la ejecución de las pruebas en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Campo Arauca**



**Análisis de resultados:**

- La concentración de Fenoles a la salida del Sistema de Tratamiento al comenzar las pruebas, fue inferior al nivel mínimo de detección a través del método fotométrico y el porcentaje de remoción de Fenoles del Sistema de Tratamiento fue muy cercano al 100%.
- Durante las tres semanas de ejecución de las pruebas, en las que el proceso de Biorremediación fue constante, se mantuvo el cumplimiento del Decreto 1594 de 1.984, ya que las concentraciones de Fenoles (Eje principal X) estuvieron por debajo de 0,2 mg/L. Por lo tanto se presume que la Biorremediación participa prioritariamente en la remoción de Fenoles, con

porcentajes de remoción del 99%, y que la Fotólisis los degrada una proporción significativamente menor.

- Se observa (ver tabla 14 y gráfico 4) un cambio poco significativo en la concentración de Fenoles (eje principal X) y por ende del porcentaje de remoción de Fenoles (eje secundario X), durante la ejecución semanal de las modificaciones realizadas al Sistema de Tratamiento. Lo anterior se debe a que la biopelícula de bacterias degradadoras de Fenol, formada en el fondo de la piscina durante los 18 meses de operación, aprovecha o demanda como fuente de carbono los Fenoles que no son fotolizados o degradados por acción de la red fotolítica, mineralizándolos en agua y dióxido de carbono. Se recomienda para próximos ensayos e implementaciones en otros sistemas de tratamiento de aguas de producción: 1. Iniciar la instalación de la red fotolítica y observar su eficiencia en la remoción de Fenoles, posteriormente inyectar en el Sistema de Tratamiento las bacterias degradadoras de fenoles y evaluar su eficiencia de remoción; y 2. realizar las pruebas en períodos de tiempo mayores a una semana para observar cambios sustanciales en las concentraciones de Fenoles.
- Se evidenció que la unidad denominada piscina de aireación se transformó en un biodigestor aerobio, gracias a la contundente participación de los microorganismos, que con el paso del tiempo conformaron su hábitat en esta piscina. La reducción de la inyección de oxígeno semana a semana, demostró que las bacterias aeróbicas pueden desarrollar sus funciones, utilizando el oxígeno que entra a través de la lámina de agua de la piscina, cuya profundidad máxima es de 1,7 metros, y que permite adicionalmente el paso de la luz solar.
- En la combinación Fotólisis - Biorremediación, la primera es complemento de la segunda, ya que las bacterias en el proceso de degradación del Fenol generan metabolitos o productos de degradación (probablemente más tóxicos que el Fenol), que también son degradados mediante la Fotólisis.

- Se consideró la posible volatilización del Fenol durante la aspersión del agua residual industrial, sin embargo se encontró que el Fenol en fase líquida (río) tiene una volatilización lenta igual a 107 días [40, 55, 59].
- La degradación de los Fenoles, por las vías fotolítica y biodegradativa, evidencia que los Fenoles presentes en las aguas de formación del Campo Arauca no son recalcitrantes.

#### **4.5 ESQUEMA RECOMENDADO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.**

Con base en los resultados de las pruebas, se recomienda:

1. Reducir el número de aireadores superficiales a cuatro, alternando dos de día y dos de noche.
2. Encender la red fotolítica únicamente durante el día, es decir de 6 de la mañana a 6 de la tarde.
3. Mantener el anillo perimetral encendido durante las 24 horas.
4. Reducir progresivamente las cantidades de Fenobiol y nutrientes utilizados para preparar el caldo de cultivo e inyectar en el API un biorreactor por semana.

## 5. CONCLUSIONES

- El mejoramiento del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, a partir del uso de agentes físicos (Aireación y Fotólisis) que destruyen químicamente las moléculas hasta llevarlas a subproductos menos contaminantes y de su Biorremediación con un consorcio de bacterias específicas para la degradación de Fenoles, permite la mineralización completa de los Fenoles, es decir su destrucción como agente contaminante.
- Igualmente se evidenció que la implementación de las tecnologías Fotólisis y Biorremediación en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales del Campo Arauca, permitió a ECOPETROL S.A. el cumplimiento de la norma colombiana de vertimientos (decreto 1594 de 1.984) durante todo su tiempo de operación, con valores muy por debajo de este límite. Por lo tanto esta experiencia se convierte en una patente de la Empresa, especialmente del Instituto Colombiano del Petróleo, y será implementada inicialmente en otras áreas de la Vicepresidencia de Producción.
- La adecuación de la piscina de aireación como un Sistema de Tratamiento Biológico aeróbico tuvo un resultado exitoso, ya que durante los 18 meses observados, se logró mantener la concentración de Fenoles a la salida del Sistema de Tratamiento en un valor constante. Del consorcio de bacterias que conforman el Fenobiol, se conoce la presencia de Pseudomonas sp., quienes han sido reconocidas mundialmente en la degradación de Fenoles. [20, 31]
- Se presume que la fotodegradación de Fenoles en las aguas residuales industriales de Campo Arauca, se deba a la Fotólisis directa sobre dicho contaminante o a la acción oxidativa de sustancias presentes en el agua que fueron activadas por la radiación solar. Igualmente en el proceso de Biorremediación, se destaca la participación activa del consorcio de bacterias que conforman el Fenobiol.

- En el proceso de Biorremediación se tiene que los Fenoles, como todos los compuestos hidrocarburoados, actuaron como dadores de electrones para las células de los microorganismos, iniciándose la actividad metabólica de la célula y que culmina con su degradación y su consumo.
  
- Gracias a las pruebas preliminares realizadas, se presume que la Biorremediación participa prioritariamente en la remoción de Fenoles y que la Fotólisis los degrada en una proporción significativamente menor. Sin embargo la poca fluctuación de los resultados obtenidos en la concentración de Fenoles (eje principal X) y en los porcentajes de remoción de Fenoles (eje secundario X), durante la ejecución semanal de las modificaciones realizadas al Sistema de Tratamiento, dan lugar a otra afirmación, en la que la biopelícula de bacterias degradadoras de Fenol, formada en el fondo de la piscina durante los 18 meses de operación, aprovecha o demanda como fuente de carbono los Fenoles que no son fotolizados o degradados por acción de la red fotolítica, mineralizándolos en agua y dióxido de carbono. Para observar el proceso de una forma más objetiva en próximos ensayos e implementaciones en otros sistemas de tratamiento de aguas de producción, se recomienda: 1. Iniciar la implementación de las tecnologías con la instalación de la red fotolítica y observar su eficiencia en la remoción de Fenoles, posteriormente inyectar en el sistema de tratamiento las bacterias fenólicas y evaluar su eficiencia de remoción; y 2. realizar las pruebas en períodos de tiempo mayores a una semana para observar cambios sustanciales en las concentraciones de Fenoles.
  
- Se evidenció que la unidad denominada piscina de aireación se transformó en un biodigestor aerobio, gracias a la contundente participación de los microorganismos, que con el paso del tiempo conformaron su hábitat en esta piscina. La reducción de la inyección de oxígeno semana a semana, demostró que las bacterias aeróbicas pueden desarrollar sus funciones, utilizando el oxígeno que entra a través de la lámina de agua de la piscina, cuya profundidad máxima es de 1,7 metros, y que permite adicionalmente el paso de la luz solar.

- Se consideró la posible volatilización del Fenol durante la aspersión del agua residual industrial, sin embargo se encontró que el Fenol en fase líquida (río) tiene una volatilización lenta igual a 107 días [40, 55, 59].
- La degradación de los Fenoles, por las vías fotolítica y biodegradativa, evidencia que los Fenoles presentes en las aguas de formación del Campo Arauca no son recalcitrantes.

## 6. RECOMENDACIONES

- Para observar mayores cambios en las concentraciones de Fenoles, durante la ejecución de pruebas en próximos ensayos e implementaciones en otros sistemas de tratamiento de aguas de producción, se recomienda: 1. Iniciar la implementación de las tecnologías con la instalación de la red fotolítica y observar su eficiencia en la remoción de Fenoles, posteriormente inyectar en el sistema de tratamiento las bacterias fenólicas y evaluar su eficiencia de remoción; y 2. realizar las pruebas en períodos de tiempo mayores a una semana para observar cambios sustanciales en las concentraciones de Fenoles. Igualmente se recomienda analizar los Fenoles a la salida del sistema de tratamiento, utilizando un método con una sensibilidad de detección superior como la cromatografía de gases.
- Dado el corto alcance de la monografía, se concibe la necesidad de investigar las vías de degradación del Fenol (cinética), sus productos de degradación, las sustancias que inducen su fotodegradación y la toxicidad de la solución en cada momento. Para ello es necesario realizar pruebas comparando la degradación del Fenol en aguas sintéticas y en aguas problema, utilizando altas concentraciones de Fenol para identificar los productos de la degradación, sin embargo dichas concentraciones de Fenol pueden dar lugar a la formación de dímeros altamente inducidos.

Los parámetros fundamentales para evaluar la cinética del proceso durante la aplicación de POA (Procesos de Oxidación Avanzada) son:

1. Carbono Orgánico Total (COT).
2. Concentración del contaminante original y sus productos de degradación.
3. Concentración de iones inorgánicos.
4. Evaluación de su toxicidad durante el proceso de degradación.

- Se deben realizar estudios de toxicidad para evaluar la capacidad de biodegradabilidad de un compuesto. En la mayoría de los casos, las reacciones de degradación transforman los pesticidas en otros compuestos de menor toxicidad, aunque en otros casos, los productos de degradación son tanto o más tóxicos que los propios pesticidas. Para evaluar la toxicidad de una muestra existen dos tipos de metodologías principales: las relaciones cuantitativas estructura – toxicidad (QSTR, métodos que con ecuaciones matemáticas, predicen la toxicidad de compuestos basándose en variables estructurales) y los bioensayos (técnicas de laboratorio para evaluar experimentalmente la toxicidad de una muestra, determinando la respuesta biológica de organismos de prueba expuestos a ella).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. A. Gerecke et al. En: Environ. Sci. Technol. No 35 (2.001).
2. A., KARLSSON et al. En: Anaerobe. No 5 (1.999); p 25-35.
3. Apella, María C.; Araujo Paula. MICROBIOLOGIA, CONCEPTOS BASICOS. [online]. Available from Internet <URL:[http://www.microbiologia.org.mx/microbiosenlinea/CAPITULO\\_02/Capitulo02.pdf](http://www.microbiologia.org.mx/microbiosenlinea/CAPITULO_02/Capitulo02.pdf)>.
4. Arroyave R., Joan A.; Garcés G., Luís F.; Cruz C., Andrés F. Fotodegradación de las aguas residuales con pesticida Mertect en la industria bananera empleando Fotocatálisis con Dióxido de Titanio y Lámpara de Luz Ultravioleta [online]. REVISTA LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN - Vol. 4 No. 1, pag 7-13. Available from Internet <URL:[http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/vol4n1/07-3\\_Mertec.pdf](http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/vol4n1/07-3_Mertec.pdf)>
5. B.C. Faust; J. Hoigne´. En: Environ. Sci. Technol. Vol 21 (1.987)
6. Bais, A.F.; Madronich, S.; Crawford, J. International Photolysis Frequency Measurement and Model Intercomparison: Spectral actinic solar flux measurements and modeling. En: Journal of Geophysical Research. No 108 (2.003).
7. BANERJEE G. Wat Res 31(4): 705-714, 1.997
8. Blesa, Miguel A.; Navntoft, Christian; Dawidowski, Laura. Curso Posibilidades para la Provisión de Agua Segura Usando Nuevas Tecnologías. 7. Modelado de la radiación solar UV para aplicaciones en tratamiento de aguas. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/agua-pura/default.htm>>
9. Branco, S.M., 1.984. Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales. En: Monografía científica. No 28, serie Biología, OEA; 11.9 págs.

10. C.G. da Silva; J.L. Faria. En: J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 155, 133, (2.003).
11. C., Harwood et al. En: FEMS Microbiol. Rev 22 (1.999); p 439-458.
12. C.P. Huang; Ch Dong; Z Tang. En: Waste Manag., Vol 13 (1.993).
13. C. Richard et al. Auto- remediation of surface waters by solar-light: photolysis of 1-naphthol, and two herbicides in pure and synthetic waters. En: Revista Catalysis Today. No.124 (2.007); p 82-87.
14. C. Richard et al. Auto- remediation of surface waters by solar-light: photolysis of 1-naphthol, and two herbicides in pure and synthetic waters. En: Revista Catalysis Today. No124 (2.007); p 82-87
15. Carlvert, Jack G.; Pitts, James N. Jr. Photochemistry. 1 Ed. New York: Edit John Wiley & Sons, Inc, 1.966, p 444, 445.
16. Castillo, Jenny et al. Estudio de la influencia de un sistema de Fotocatálisis en la remoción de patógenos de aguas residuales domesticas, crudas y tratadas y su relación con algunos parámetros físico-químicos. Cali-Colombia: Universidad del Valle. (2.003)
17. D., LOVLEY; D., LONERGAN. En: Appl Environ Microbiol. No 56(1.990); p 1.858-1.864.
18. Dainton, F.S.; Sugden, T.M. Photochemistry and reaction kinetics. 1 Ed. Great Britain: Editorial Cambridge University Press, 1.967, p 268 – 281.
19. Degrémont. Water Treatment Handbook. Degrémont. 6a Edición. Paris, Editorial Lavoisier Publishing, (1.991).
20. Díaz, Altamira et al. Degradación de Fenoles totales durante el tratamiento biológico de aguas de producción petroleras Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, La Universidad del Zulia. Estado Zulia, Venezuela. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>
21. Doménech, Xavier; Jardim, Wilson F.; Litter, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com>

22. F., Bak; F., Widdel. En: Arch Microbiol. No 156 (1.986); p 152-158.
23. Flox, C. et al. Combustión electroquímica de cresoles en medio acuoso mediante procesos de oxidación avanzada asistidos por luz solar. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>
24. Garcia Montaña, Julia. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for commercial reactive azo dyes removal. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BARCELONA, Facultad de ciencias, departamento de química. Junio de 2.007.
25. H., Samuel. Fundamentos de fisicoquímica. 1a Ed; p 787 - 806.
26. Hernández Moreno, C.P. Evaluación preliminar de la oxidación avanzada de compuestos fenólicos. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>
27. Hincapié P., Margarita; Marín S., Juan M. La fotocatalisis en el tratamiento de aguas contaminadas. En: Revista Ingenierías. No 1 (Diciembre 2.002); p 83 – 91.
28. J.P. Aguer; D. Te´te´gan; C. Richard. Photochem. Photobiol. Sci. No 4 (2.005).
29. J. Golimowski y K. Golimowska, Anal Chim. Acta, 325, 111, (1.996).
30. J.P. Scott y D.F. Ollis. En: Environ. Progress, No 14, Vol 88, (1.995).
31. K., McALLISTER; H., LEE; J., TREVORS. En: Biodegradation. No 7(1.996); p 1-40.
32. Ksibi, Mohamed; Zemzemia, Asma; Boukchina, Rachid. Photocatalytic Degradability of Substituted Phenols Over UV Irradiated TiO<sub>2</sub>. En: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. No 159 (2.003); p 61-70.
33. Legrini, O.; Oliveros, E.; Braun, A.M. En: Chem. Rev. No 93 (1.993); p 671-698.
34. Litter, Marta I. Curso Posibilidades para la Provisión de Agua Segura Usando Nuevas Tecnologías. 5. Tecnologías avanzadas de oxidación: tecnologías solares. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/agua-pura/default.htm>

35. Magaña A., J. P. et al. Comparación de diferentes procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de efluentes tóxicos de la industria petrolera. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>
36. Malato, Sixto. Curso Posibilidades para la Provisión de Agua Segura Usando Nuevas Tecnologías. 11. Procedimientos para la evaluación de la degradación de contaminantes en agua mediante TAOs. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/agua-pura/default.htm>
37. Malaver Q., Nora; Ramos O., Jesús. Participación de microorganismos perifíticos asociados a la raíz de la bora (EICHHORNIA CRASSIPES) en la remoción de Fenol. En: Acta biológica Venezolana. Vol. 17, No 4 (Diciembre, 1.997); p 35- 46.
38. Maroto Arroyo, M<sup>a</sup> Esther; Rogel Quesada, Juan Manuel. Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. GEOCISA. Diav. Protección Ambiental de Suelos. – MEXICO. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>
39. Marques Britto, Jaildes; Rangel, Maria do Carmo. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. En: Quím. Nova. Vol 1, No 1 (2.008). [online]. Available from Internet <URL: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422008000100023&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422008000100023&lng=pt&nrm=iso)
40. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia. Guía 14. [online]. Available from Internet <URL: [www.minambiente.gov.co/documentos/Guia14.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia14.pdf)
41. Mofidi, Alexander A. et al. Advanced Oxidation Processes and UV Photolysis for Treatment of Drinking Water. Enero de 2.002. [online]. Available from Internet <URL: [http://www.energy.ca.gov/reports/2004-04-02\\_500-02-019/500-02-019\\_A1.PDF](http://www.energy.ca.gov/reports/2004-04-02_500-02-019/500-02-019_A1.PDF)
42. Montràs Boet, Anna; Vicent Huguet, Teresa. Biodegradación y biorremediación. Abril, 2.002. [online]. Available from Internet <URL: [WWW.ECOTROPIA.COM](http://WWW.ECOTROPIA.COM)
43. Moore, Walter J. Fisicoquímica Básica. 1 ed. México. Edit. Prentice Hall, 1.986.
44. O.R. Legrini; E. Oliveros; A.M. Braun. En: Chem. Rev., No 93 (1.993).

45. P., Colberg; L., Young. Anaerobic degradation of nonhalogenated homocyclic aromatic compounds coupled with nitrate, iron, or sulfate reduction. En: Microbial transformation and degradation of toxic organic chemicals. Chapter 8 (1.995); p 307-330.
46. Pérez, Esperanza; Jiménez Prieto Y. Procesos de detoxificación solar: retos y perspectivas de aplicación en el siglo XXI. Centro de Estudio de Química Aplicada (CEQA) Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.
47. PIGNATELLO, JOSEPH J. Biodegradation and Photolysis of pentachlorophenol in Artificial Freshwater Streams. En: Applied and environmental microbiology. VOL. 46 , No. 5 (Nov. 1.983); p. 1024-1031.
48. R., Scrinke. Photodissociation dynamics. 1 ed. Great Britain: Editorial Cambridge University Press, 1.993, p 6 y 7.
49. Ramírez Cortina, Clementina R. et al. Oxidación de Fenoles con peróxido de hidrógeno y ozono. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>
50. Rodríguez Fernández-Alba, Antonio et al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Universidad de Alcalá, Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME). [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>
51. Rubiano H. Claudia M.; William A. Laguna C. Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de Fenoles en medio acuoso. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.monografias.com>
52. S. Canonica; U. Jans, K. Stemmler; J. Hoigne'. En: Environ. Sci. Technol. No 29(1.995); p 18 - 22.
53. Salaices M.; Serrano B; Lasa H.I. de. Photocatalytic Conversion of Phenolic Compounds in Slurry Reactors. En: Chemical Engineering Science No 59 (2.004); p 3-15.
54. Sarria, Víctor M. Los Procesos de Oxidación Avanzada. [online]. Available from Internet <URL: <http://www.google.com.co>

55. Sarria, Víctor M. et al. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. En: Rev.Colomb.Quim. Vol.34, No 2 (dic. 2.005). [online]. Available from Internet <URL: [http://www.ust.cl/html/cree/asignaturas/material\\_profesor/material\\_qorganica/clase7a.pdf](http://www.ust.cl/html/cree/asignaturas/material_profesor/material_qorganica/clase7a.pdf).
56. SI GROUP. Hojas de datos de seguridad. [online]. Available from Internet <URL:<http://msds.siigroup.com/files/atn%5cansi2%5cspanish%5c01012400.pdf>
57. Song, Wonho; Ravindran Varadarajan; Pirbazari Massoud. Process optimization using a kinetic model for the ultraviolet radiation-hydrogen peroxide decomposition of natural and synthetic organic compounds in groundwater. [online]. Chemical Engineering Science. No 63 (2.008); p 3249 – 3270. Available from Internet <URL: <http://www.elsevier.com/locate/ces>
58. Tello R., Eric D. Tesis doctoral: Optimización de tecnologías fotocatalíticas de oxidación avanzada aplicadas al tratamiento de residuos líquidos de laboratorio. 1ed. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria – departamento de Química. (2.000); P 34 – 56.
59. Universidad Autónoma de México. Fenoles [online]. Available from Internet <URL:[www.uam.es/departamentos/ciencias/qorg/docencia\\_red/qo/14/Fenol0.html](http://www.uam.es/departamentos/ciencias/qorg/docencia_red/qo/14/Fenol0.html)
60. W., Evans; G., Fuchs. En: Ann Rev Microbiol. No 42 (1.988); p 289-317.
61. W.R. Haag; J. Hoigne´. En: Environ. Sci. Technol. Vol 20 (1.986); p 341
62. Weffer Gladys et al. Tratamiento biológico de un efluente sintético de Glucosa y Fenol en un reactor biológico rotativo de contacto. En: Bol. Centro Invest. Biol. Vol 39 (Dic. 2.005), No. 3
63. [www.colciencias.gov.co/simbiosis/percepcion/c1mambiente.htm](http://www.colciencias.gov.co/simbiosis/percepcion/c1mambiente.htm)
64. Y. Chin et al. Environ. Sci. Technol. No 38 (2.004).

## ANEXOS

### ANEXO A. REGISTRO FOTOGRÁFICO

**Foto 1.** Panorámica aérea de la Estación Principal, los pozos Arauca 1, 2 y 3 y las líneas de flujo del Campo Arauca, y el Oleoducto Campo Arauca - Banadía – Saravena, Arauca – 2.007.



**Fuente:** ECOPETROL S.A. – Campo Arauca

**Foto 2.** Panorámica aérea de los piezómetros ubicados en el área de influencia directa del Campo Arauca, Saravena, Arauca – 2.007. Los piezómetros 1, 2 y 3 (Puntos rojos), son aquellos que estaban construidos antes de la aplicación de las tecnologías combinadas para el mejoramiento del sistema de tratamiento; los piezómetros 4, 5 y 6 (Puntos verdes) fueron instalados posteriormente.



**Foto 3.** Puntos de muestreo de los cuerpos del agua del área de influencia directa del Campo Arauca, Saravena, Arauca – 2.007. El punto 1 es el punto aguas abajo del Caño Quemadero; debido al distanciamiento del Caño Verde no se visualizan en la foto los puntos 2 y 3.



**Foto 4.** Anillo perimetral de la Piscina de aireación. Anteriormente el anillo perimetral abarcaba la mitad del perímetro de la piscina (Línea azul), actualmente se amplió este anillo (Línea roja), cubriendo la totalidad del perímetro de la piscina.



**Foto 5.** Red fofolítica instalada sobre la Piscina de aireación. Se evidencia el funcionamiento de la red fofolítica, mediante el efecto nebulizante que generan las boquillas sobre el chorro de agua residual recirculada (ver círculo rojo).



**Foto 6.** Red fotalítica instalada sobre la Piscina de aireación y aireador superficial. Se observa la red fotalítica (apagada) flotando sobre la piscina de aireación y el aireador superficial tipo venturi.



**Foto 7.** Escalado de Fenobiol. Se presenta la adición de nutrientes y Fenobiol y el seguimiento del crecimiento microbiano, a través de la medición continua de oxígeno disuelto y la temperatura del agua.



**Foto 8.** Instalación de biorreactores. Los biorreactores BR 1 y BR 2, fueron instalados frente a la última sección del separador API, con el fin de adicionar el Caldo de cultivo una vez se bombee esta agua a la piscina de aireación.



**Foto 9.** Seguimiento al crecimiento microbiano en los biorreactores. Se realizó el seguimiento del oxígeno disuelto y la temperatura.



## ANEXO B. DATOS DE SALIDA DEL MODELO PIPE PHASE - SIMSEL

```

PPPP   III   PPPP   EEEEE   PPPP   H   H   A   SSS   EEEEE (R)
P  P   I   P  P  E   P  P  H  H  A  A  S  S  E
P  P   I   P  P  E   P  P  H  H  A  A  S   E
PPPP   I   PPPP   EEEE   PPPP   HHHHH  A  A   SSS   EEEE
P       I   P     E     P       H  H  AAAAA   S  E
P       I   P     E     P       H  H  A  A  S  S  E
P       III  P     EEEEE  P       H  H  A  A   SSS   EEEEE

```

VERSION 9.0

```

*****
*                                     *
*          SUPPORT CENTERS, INVENSYS, SIMSCI-ESSCOR          *
*          =====*
*  Western USA/Canada                                     Japan *
*    Phone (713) 683-1710                               Phone (81) 3-5793-4856 *
*    Fax   (713) 683-6613                               Fax   (81) 3-5793-4855 *
*    Email support@simsci.com                           Email  ssijpn@po.iiijnet.or.jp *
* *
*  Mid USA/Virgin Islands                               Venezuela *
*    Phone (713) 683-1710                               Phone (58) 212-267-5868 *
*    Fax   (713) 683-6613                               Fax   (58) 212-267-0964 *
*    Email support@simsci.com                           Email  simscilat@simsci.com *
* *
*  Eastern USA/Canada                                   Europe *
*    Phone (610) 364-1900                               Phone (44) 161-429-6744 *
*    Fax   (610) 364-9600                               Fax   (44) 161-480-9063 *
*    Email support@simsci.com                           Email *
* *                                     simsci.uk.helpdesk@invensys.com *
* *
*  Asia/Pacific Rim                                     Middle East/Africa *
*    Phone (65) 6662-4891                               Phone (971) 4-881-1440 *
*    Fax   (65) 6261-9492                               Fax   (971) 4-881-1426 *
*    Email asiapactech@simsci.com                       Email  supportme@simsci.com *
* *
*  Germany/Austria                                     Mexico *
*    Phone (49) 621-1503-721                             Phone (52) 55-526301-00 *
*    Fax   (49) 621-1503-722                             Fax   (52) 55-555726-20 *
*    Email desupport@simsci.com                         Email  supportmex@simsci.com *
* *
*  Italy                                                 Brazil *
*    Phone (39) 02-26297-327                             Phone (52) 55-21-2215-8973 *
*    Fax   (39) 02-26297-200                             Fax   (52) 55-11-6844-0203 *
*    Email italysup@simsci.com                         Email  simscibra@invensys.com *
* *
*  Australia/New Zealand                               Argentina *
*    Phone (61) 28396-3651                               Phone (54) 116345-2100 *
*    Fax   (61) 28396-3604                               Fax   (54) 116345-2111 *
*    Email supportan@simsci.com                         Email  supportar@simsci.com *
* *
*  India                                                 In USA/Canada Toll Free *
*    Phone (91) 44243-3762                               Phone (800) SIMSCI-1 *
*    Fax   (91) 44243-0165 *
*    Email supportin@simsci.com                         http://www.invensys.com *
* *                                     http://www.simsci.com *
*****

```

(R) SIMSCI IS A TRADEMARK OF INVENSYS SYSTEMS, INC.

(R) PIPEPHASE IS A TRADEMARK OF INVENSYS SYSTEMS, INC.

(c) COPYRIGHT 1985, UPDATED 1986-2003

INVENSYS SYSTEMS, INC.

ALL RIGHTS RESERVED

=====

PROJECT ASPERSION USER **Javier O Caicedo D**  
 PROBLEM PROBLEM1 DATE 12/14/06

RED DE ASPERSION

| PAGE  | CONTENTS                    |
|-------|-----------------------------|
| ----- |                             |
| 1     | GENERAL DATA                |
| 3     | PVT DATA                    |
| 3     | CORRELATION SET DATA        |
|       | METHODS DATA                |
| 4     | SOLUTION METHODS/TOLERANCES |
|       | SOURCE DATA                 |
| 5     | SOURCE S001                 |
|       | STRUCTURE DATA              |
| 6     | LINK L005                   |
| 6     | LINK L012                   |
| 7     | LINK L021                   |
| 8     | LINK L032                   |
| 9     | LINK L036                   |
| 9     | LINK L040                   |
| 10    | LINK L043                   |
| 10    | LINK L050                   |
| 11    | LINK L053                   |
| 11    | LINK L056                   |
| 12    | LINK L061                   |
| 12    | LINK L081                   |
| 13    | LINK L086                   |
| 13    | LINK L090                   |
| 14    | LINK L094                   |
| 15    | LINK L098                   |
| 15    | LINK L102                   |
| 16    | LINK L106                   |
| 17    | LINK L110                   |
| 17    | LINK L114                   |
| 18    | LINK L118                   |
| 19    | LINK L122                   |
| 19    | LINK L126                   |
| 20    | LINK L130                   |
| 21    | LINK L134                   |
| 21    | LINK L138                   |
| 22    | LINK L142                   |
| 23    | JUNCTIONS AND SINKS         |
| 25    | NETWORK CONNECTIVITY        |

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| VERSION 9.0               | R            |
| SIMULATION SCIENCES, INC. | PIPEPHASE    |
| PAGE 1                    |              |
| PROJECT ASPERSION         | INPUT        |
| JOCD                      |              |
| PROBLEM PROBLEM1          | GENERAL DATA |
| 12/14/06                  |              |

=====

PROBLEM DESCRIPTION

RED DE ASPERSION

CALCULATION OPTIONS

RUN TYPE..... NETWORK  
FLUID TYPE..... LIQUID

DIMENSIONAL UNITS - PETROLEUM

|                  |           |                  |            |
|------------------|-----------|------------------|------------|
| TEMPERATURE..... | DEG F     | PRESSURE.....    | PSIG       |
| MOLAR RATE.....  | MOLE/HR   | WEIGHT RATE..... | LB/HR      |
| LIQUID RATE..... | GAL/MIN   | VAPOR RATE.....  | MM FT3/DAY |
| COARSE LENGTH... | M         | FINE LENGTH..... | IN         |
| DENSITY/GRAVITY. | DEG API   | VISCOSITY.....   | CP         |
| DUTY.....        | MM BTU/HR | POWER.....       | HP         |
| VELOCITY.....    | MPH       |                  |            |

DEFAULTS

|                             |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| FLOW EFFICIENCY.....        | 100.00 PERCENT     |
| HAZEN-WILLIAMS COEFF.....   | 150.00             |
| ROUGHNESS.....              | 0.00180 IN         |
| AMBIENT TEMPERATURE.....    | 80.00 DEG F        |
| TEMPERATURE GRADIENT.....   | 1.00 DEG F/100 FT  |
| PIPE U-FACTOR.....          | 1.000 BTU/HR-FT2-F |
| RISER U-FACTOR.....         | 1.000 BTU/HR-FT2-F |
| TUBING U-FACTOR.....        | 1.000 BTU/HR-FT2-F |
| ANNULUS U-FACTOR.....       | 1.000 BTU/HR-FT2-F |
| INSIDE DIAMETER - PIPE..... | 1.610 IN           |
| INSIDE DIAMETER - RISER.... | 4.026 IN           |
| INSIDE DIAMETER - TUBING... | 4.026 IN           |
| INSIDE DIAMETER - ANNULUS.. | 6.065 IN           |
| PIPE NOMINAL DIAMETER.....  | 1.500 IN           |
| LAMINAR INSIDE FILM COEFF.. | HAUSEN             |

FLOW CODES

PIPE FLOW CODE IS MOODY  
REYNOLDS NUMBER(LAMINAR)..... 3000.0000  
RISER FLOW CODE IS MOODY  
TUBING FLOW CODE IS MOODY  
ANNULUS FLOW CODE IS MOODY

BASE CONDITIONS

|                           |             |
|---------------------------|-------------|
| STANDARD TEMPERATURE..... | 80.00 DEG F |
| STANDARD PRESSURE.....    | 0.000 PSIG  |
| VERSION 9.0               | R           |
| SIMULATION SCIENCES, INC. | PIPEPHASE   |
| PAGE 3                    |             |
| PROJECT ASPERSION         | INPUT       |
| JOCD                      |             |

PROBLEM PROBLEM1  
12/14/06

PVT DATA

=====

PVT DATA SUMMARY

CORRELATION SET DATA

CORRELATION SET NUMBER 1

GRAVITY OF WATER..... 10.0000 DEG API  
VISCOSITY OF LIQUID..... 1.0000 CP

SOLUTION METHODS/TOLERANCES

NETWORK SOLUTION METHOD IS PBAL  
MAXIMUM ITERATIONS..... 2000  
MAXIMUM NUMBER OF INTERVAL HALVINGS.... 3  
ABSOLUTE PRESSURE TOLERANCE..... 0.010 PSIG  
RATE PERTURBATION..... 0.010000  
METHOD OF INITIAL SOLUTION ESTIMATION.. IMPLICIT MODEL  
ZERO FLOW IN CHECK VALVES..... OFF  
CHOKE CRITICAL FLOW MODEL (FORTUNATI) . EXPONENTIAL  
NEW ACCELERATION OPTION IS..... OFF

PARAMETERS FOR PBAL INITIALIZATION METHOD

NUMBER OF CONTINUATION STEPS..... 1  
RELAXATION PARAMETER..... 0.2500E+00  
MAXIMUM NUMBER OF SUBITERATIONS..... 200  
MAXIMUM JUNCTION PRESSURE CHANGE..... 0.1000E-03 PSIG  
MAXIMUM JUNCTION FLOW IMBALANCE..... 0.2917E-01 GAL/MIN  
LINK PROPERTY EVALUATIONS METHOD .... GLOBAL

SOURCE S001

THIS SOURCE IS ON

PVT SET NUMBER..... 1  
RATE..... 320.0005 GAL/MIN  
ESTIMATED PRESSURE..... 10.0000 PSIG  
TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

=====

LINK L005

LINK IS FROM "S001 " TO "J003 "

DEVICE SA001, P007, IS A PIPE

FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 4.0276 IN  
LENGTH..... 4.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT

|                            |         |              |
|----------------------------|---------|--------------|
| HEAT LOSS COEFFICIENT..... | 1.00000 | BTU/HR-FT2-F |
| ROUGHNESS.....             | 0.00180 | IN           |
| AMBIENT TEMPERATURE.....   | 80.00   | DEG F        |

DEVICE WA002, T008, IS A TEE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
PIPE INSIDE DIAMETER..... 4.03 IN  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 20.0000  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L012

LINK IS FROM "J003 " TO "J009 "

DEVICE WA003, C016, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 4.03 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 3.07 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA004, P015, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
LENGTH..... 16.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA005, B017, IS A BEND  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
THIS IS A STANDARD BEND  
PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 4.35000  
RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 30.0000  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====

LINK L012 (CONT)

DEVICE SA006, P018, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
LENGTH..... 21.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT

|                            |         |              |
|----------------------------|---------|--------------|
| HEAT LOSS COEFFICIENT..... | 1.00000 | BTU/HR-FT2-F |
| ROUGHNESS.....             | 0.00180 | IN           |
| AMBIENT TEMPERATURE.....   | 80.00   | DEG F        |

DEVICE WA007, T019, IS A TEE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 20.0000  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L021

LINK IS FROM "J003 " TO "J010 "

DEVICE WA008, C022, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 4.03 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 3.07 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA009, P023, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
LENGTH..... 16.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA010, B024, IS A BEND  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
THIS IS A STANDARD BEND  
PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 4.35000  
RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 30.0000  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====

LINK L021 (CONT)

DEVICE SA011, P025, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
LENGTH..... 21.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| FLOW EFFICIENCY.....       | 100.00 PERCENT       |
| HEAT LOSS COEFFICIENT..... | 1.00000 BTU/HR-FT2-F |
| ROUGHNESS.....             | 0.00180 IN           |
| AMBIENT TEMPERATURE.....   | 80.00 DEG F          |

DEVICE WA012, T026, IS A TEE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
 RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 20.0000  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L032

LINK IS FROM "J009 " TO "J030 "

DEVICE SA013, P034, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
 LENGTH..... 4.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA014, T035, IS A TEE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
 RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 20.0000  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====

LINK L036

LINK IS FROM "J009 " TO "J029 "

DEVICE SA015, P037, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
 LENGTH..... 4.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA016, T038, IS A TEE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... | 1.00000    |
| C2 (CHISHOLM PARAMETER).....  | 1.75000    |
| RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. | 20.0000    |
| ROUGHNESS.....                | 0.00180 IN |
| NUMBER OF DEVICES.....        | 1.         |

LINK L040

LINK IS FROM "J010 " TO "J027 "

DEVICE SA017, P041, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| INSIDE DIAMETER.....       | 3.0669 IN            |
| LENGTH.....                | 4.0 M                |
| ELEVATION CHANGE.....      | 0.0 M                |
| FLOW EFFICIENCY.....       | 100.00 PERCENT       |
| HEAT LOSS COEFFICIENT..... | 1.00000 BTU/HR-FT2-F |
| ROUGHNESS.....             | 0.00180 IN           |
| AMBIENT TEMPERATURE.....   | 80.00 DEG F          |

DEVICE WA018, T042, IS A TEE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| PIPE INSIDE DIAMETER.....     | 3.07 IN    |
| LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... | 1.00000    |
| C2 (CHISHOLM PARAMETER).....  | 1.75000    |
| RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. | 20.0000    |
| ROUGHNESS.....                | 0.00180 IN |
| NUMBER OF DEVICES.....        | 1.         |

=====

LINK L043

LINK IS FROM "J010 " TO "J028 "

DEVICE SA019, P044, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| INSIDE DIAMETER.....       | 3.0669 IN            |
| LENGTH.....                | 4.0 M                |
| ELEVATION CHANGE.....      | 0.0 M                |
| FLOW EFFICIENCY.....       | 100.00 PERCENT       |
| HEAT LOSS COEFFICIENT..... | 1.00000 BTU/HR-FT2-F |
| ROUGHNESS.....             | 0.00180 IN           |
| AMBIENT TEMPERATURE.....   | 80.00 DEG F          |

DEVICE WA020, T045, IS A TEE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| PIPE INSIDE DIAMETER.....     | 3.07 IN    |
| LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... | 1.00000    |
| C2 (CHISHOLM PARAMETER).....  | 1.75000    |
| RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. | 20.0000    |
| ROUGHNESS.....                | 0.00180 IN |
| NUMBER OF DEVICES.....        | 1.         |

LINK L050

LINK IS FROM "J030 " TO "J046 "

DEVICE SA021, P051, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
LENGTH..... 8.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA022, T052, IS A TEE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
RESISTANCE COEFF: MULTIPLIER.. 20.0000  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====  
LINK L053

LINK IS FROM "J029 " TO "J047 "

DEVICE SA023, P054, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
LENGTH..... 8.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA024, T055, IS A TEE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
RESISTANCE COEFF: MULTIPLIER.. 20.0000  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L056

LINK IS FROM "J027 " TO "J048 "

DEVICE SA025, P057, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
LENGTH..... 8.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT

|                            |         |              |
|----------------------------|---------|--------------|
| HEAT LOSS COEFFICIENT..... | 1.00000 | BTU/HR-FT2-F |
| ROUGHNESS.....             | 0.00180 | IN           |
| AMBIENT TEMPERATURE.....   | 80.00   | DEG F        |

DEVICE WA026, T058, IS A TEE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
 RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 20.0000  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====

LINK L061

LINK IS FROM "J028 " TO "J049 "

DEVICE SA027, P062, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 3.0669 IN  
 LENGTH..... 8.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA028, T063, IS A TEE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 PIPE INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 1.75000  
 RESISTANCE COEFF: MULTPLIER.. 20.0000  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L081

LINK IS FROM "J046 " TO "D001 "

DEVICE WA029, C085, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA030, P083, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 8.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F

ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA031, N084, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
NOZZLE ID DIAMETER..... 0.50000 IN  
CPCV OF FLUID..... 1.40  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
FLOW COEFF. .... CALCULATED  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====  
LINK L086

LINK IS FROM "J046 " TO "D009 "

DEVICE WA032, C087, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA033, P088, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
LENGTH..... 8.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA034, N089, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
CPCV OF FLUID..... 1.40  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
FLOW COEFF. .... CALCULATED  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L090

LINK IS FROM "J047 " TO "D004 "

DEVICE WA035, C091, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA036, P092, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 8.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

=====

LINK L090 (CONT)

DEVICE WA037, N093, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.50000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L094

LINK IS FROM "J047 " TO "D012 "

DEVICE WA038, C095, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA039, P096, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 8.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA040, N097, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.50000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====

LINK L098

LINK IS FROM "J048 " TO "D005 "

DEVICE WA041, C099, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA042, P100, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
LENGTH..... 8.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA043, N101, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
CPCV OF FLUID..... 1.40  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
FLOW COEFF. .... CALCULATED  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L102

LINK IS FROM "J048 " TO "D013 "

DEVICE WA044, C103, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA045, P104, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
LENGTH..... 8.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

=====

LINK L102 (CONT)

DEVICE WA046, N105, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
NOZZLE ID DIAMETER..... 0.50000 IN  
CPCV OF FLUID..... 1.40  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
FLOW COEFF. .... CALCULATED  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L106

LINK IS FROM "J049 " TO "D008 "

DEVICE WA047, C107, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA048, P108, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
LENGTH..... 8.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA049, N109, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
CPCV OF FLUID..... 1.40  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
FLOW COEFF. .... CALCULATED  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====

LINK L110

LINK IS FROM "J049 " TO "D016 "

DEVICE WA050, C111, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA051, P112, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 8.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA052, N113, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L114

LINK IS FROM "J030 " TO "D002 "

DEVICE WA053, C115, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA054, P116, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 12.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

VERSION 9.0 R  
 SIMULATION SCIENCES, INC. PIPEPHASE  
 PAGE 18  
 PROJECT ASPERSION INPUT  
 JOCD  
 PROBLEM PROBLEM1 STRUCTURE DATA  
 12/14/06

=====

LINK L114 (CONT)

DEVICE WA055, N117, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L118

LINK IS FROM "J030 " TO "D010 "

DEVICE WA056, C119, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA057, P120, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 12.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA058, N121, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====

LINK L122

LINK IS FROM "J029 " TO "D003 "

DEVICE WA059, C123, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA060, P124, IS A PIPE

FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 12.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA061, N125, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L126

LINK IS FROM "J029 " TO "D011 "

DEVICE WA062, C127, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA063, P128, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 12.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

=====

LINK L126 (CONT)

DEVICE WA064, N129, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L130

LINK IS FROM "J027 " TO "D014 "

DEVICE WA065, C131, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA066, P132, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
LENGTH..... 12.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA067, N133, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
CPCV OF FLUID..... 1.40  
LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
FLOW COEFF. .... CALCULATED  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

=====  
LINK L134

LINK IS FROM "J027 " TO "D006 "

DEVICE WA068, C135, IS A CONTRACTION  
FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA069, P136, IS A PIPE  
FLOW CODE IS MOODY  
INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
LENGTH..... 12.0 M  
ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

DEVICE WA070, N137, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM  
UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN

NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L138

LINK IS FROM "J028 " TO "D015 "

DEVICE WA071, C139, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA072, P140, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY  
 INSIDE DIAMETER..... 1.6102 IN  
 LENGTH..... 12.0 M  
 ELEVATION CHANGE..... 0.0 M  
 FLOW EFFICIENCY..... 100.00 PERCENT  
 HEAT LOSS COEFFICIENT..... 1.00000 BTU/HR-FT2-F  
 ROUGHNESS..... 0.00180 IN  
 AMBIENT TEMPERATURE..... 80.00 DEG F

=====

LINK L138 (CONT)

DEVICE WA073, N141, IS A NOZZLE  
 FLOW CODE IS CHISHOLM  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 1.61 IN  
 NOZZLE ID DIAMETER..... 0.500000 IN  
 CPCV OF FLUID..... 1.40  
 LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... 1.00000  
 C2 (CHISHOLM PARAMETER)..... 0.50000  
 FLOW COEFF. .... CALCULATED  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

LINK L142

LINK IS FROM "J028 " TO "D007 "

DEVICE WA074, C143, IS A CONTRACTION  
 FLOW CODE IS HOMOGENEOUS  
 UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... 3.07 IN  
 DOWNSTREAM INSIDE DIAMETER... 1.61 IN  
 CONTRACTION ANGLE ANGLE..... 90.00 DEG  
 NUMBER OF DEVICES..... 1.

DEVICE SA075, P144, IS A PIPE  
 FLOW CODE IS MOODY

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| INSIDE DIAMETER.....       | 1.6102 IN            |
| LENGTH.....                | 12.0 M               |
| ELEVATION CHANGE.....      | 0.0 M                |
| FLOW EFFICIENCY.....       | 100.00 PERCENT       |
| HEAT LOSS COEFFICIENT..... | 1.00000 BTU/HR-FT2-F |
| ROUGHNESS.....             | 0.00180 IN           |
| AMBIENT TEMPERATURE.....   | 80.00 DEG F          |

DEVICE WA076, N145, IS A NOZZLE  
FLOW CODE IS CHISHOLM

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| UPSTREAM INSIDE DIAMETER..... | 1.61 IN     |
| NOZZLE ID DIAMETER.....       | 0.500000 IN |
| CPCV OF FLUID.....            | 1.40        |
| LAMDA (CHISHOLM PARAMETER)... | 1.00000     |
| C2 (CHISHOLM PARAMETER).....  | 0.50000     |
| FLOW COEFF. ....              | CALCULATED  |
| NUMBER OF DEVICES.....        | 1.          |

=====

JUNCTIONS AND SINKS

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| JUNCTION J003           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 9.0909 PSIG |
| JUNCTION J009           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 6.3636 PSIG |
| JUNCTION J010           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 8.1818 PSIG |
| JUNCTION J027           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 4.5455 PSIG |
| JUNCTION J028           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 7.2727 PSIG |
| JUNCTION J029           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 5.4545 PSIG |
| JUNCTION J030           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 0.9091 PSIG |
| JUNCTION J046           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 0.2273 PSIG |
| JUNCTION J047           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 2.7273 PSIG |
| JUNCTION J048           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 1.8182 PSIG |
| JUNCTION J049           |             |
| ESTIMATED PRESSURE..... | 3.6364 PSIG |

|                     |         |         |
|---------------------|---------|---------|
| SINK D001           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D002           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D003           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D004           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |

=====

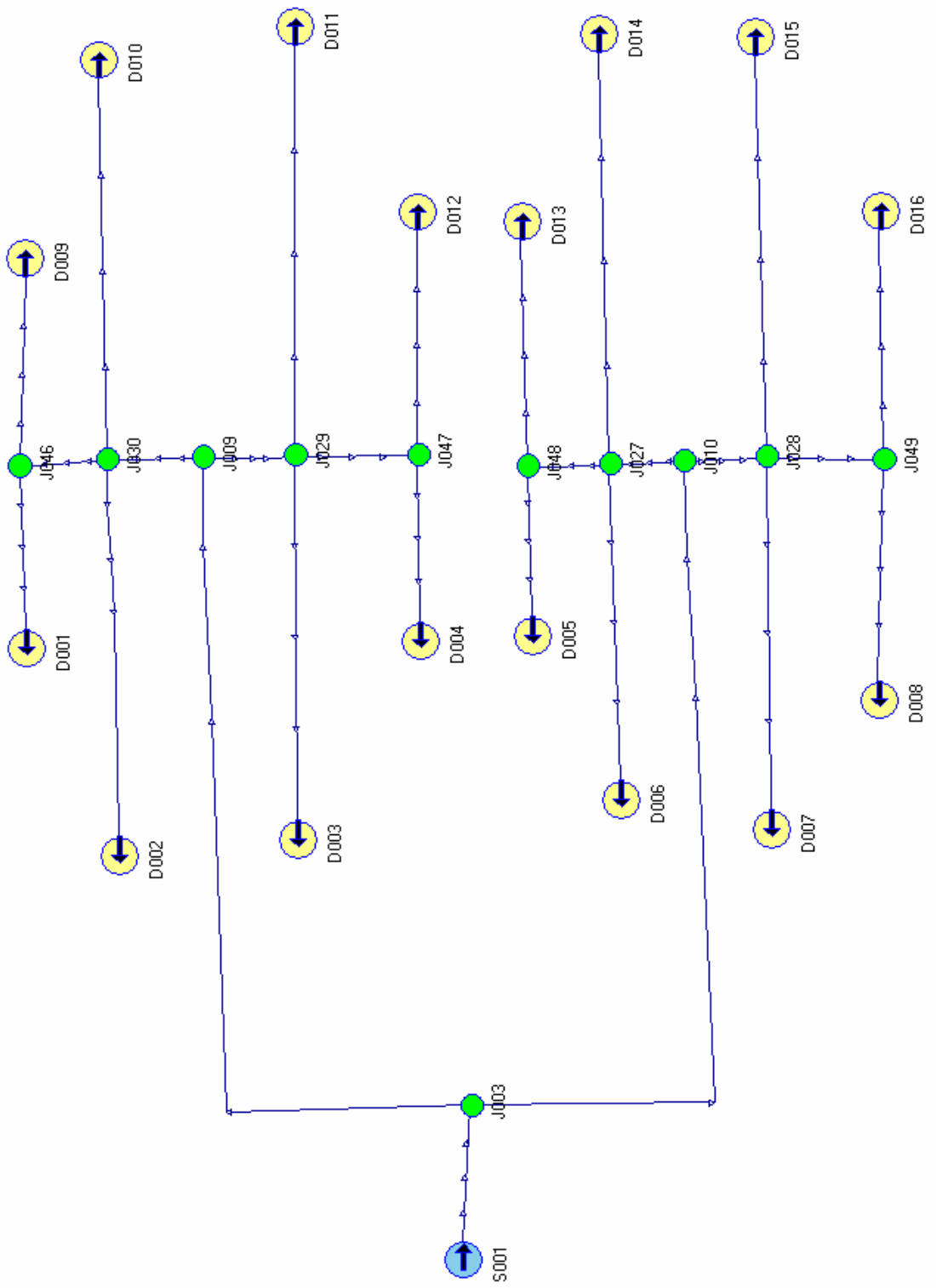
JUNCTIONS AND SINKS (CONT)

|                     |         |         |
|---------------------|---------|---------|
| SINK D005           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D006           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D007           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D008           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D009           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D010           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D011           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D012           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |
| SINK D013           |         |         |
| ESTIMATED RATE..... | 20.0000 | GAL/MIN |
| PRESSURE.....       | 0.0000  | PSIG    |

|                     |  |                 |
|---------------------|--|-----------------|
| SINK D014           |  |                 |
| ESTIMATED RATE..... |  | 20.0000 GAL/MIN |
| PRESSURE.....       |  | 0.0000 PSIG     |
| SINK D015           |  |                 |
| ESTIMATED RATE..... |  | 20.0000 GAL/MIN |
| PRESSURE.....       |  | 0.0000 PSIG     |
| SINK D016           |  |                 |
| ESTIMATED RATE..... |  | 20.0000 GAL/MIN |
| PRESSURE.....       |  | 0.0000 PSIG     |

|                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| SIMULATION SCIENCES, INC. | PIPEPHASE            |
| PAGE 27                   |                      |
| PROJECT ASPERSION         | INPUT                |
| JOCD                      |                      |
| PROBLEM PROBLEM1          | NETWORK CONNECTIVITY |
| 12/14/06                  |                      |

=====



END OF INPUT PROCESSING -- NO ERRORS  
 -- 1 WARNING

END OF INPUT CROSS-CHECKING -- NO ERRORS.

=====

CONVERGENCE TOLERANCE 0.01 PSI PRESSURE IMBALANCE AT SELECTED  
 NODES (RMS VALUE USED FOR STEP-SIZE  
 SELECTION)

ITERATION NUMBER 0. 0

\*\*\*\*\*  
 PBAL SOLUTION CONVERGED AFTER 0 ITERATIONS  
 \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\* PROBLEM SOLUTION REACHED \*\*\*\*\*

| Node Summary - Base Case |              |             |                 |
|--------------------------|--------------|-------------|-----------------|
| RED DE ASPERSION         |              |             |                 |
| Node                     | Pressure     | Temperature | Liquid LV Rate  |
|                          | PSIG         | DEG F       | GAL/MI N        |
| S001                     | 12. 18       | 80. 00      | <u>320. 000</u> |
| D001                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 078        |
| D009                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 070        |
| D004                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 070        |
| D012                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 070        |
| D005                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 070        |
| D013                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 070        |
| D008                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 070        |
| D016                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -20. 070        |
| D002                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |
| D010                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |
| D003                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |
| D011                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |
| D014                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |
| D006                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |
| D015                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |
| D007                     | <u>0. 00</u> | 80. 00      | -19. 929        |

*Rates reported at standard conditions. Specified values are underlined.*

VERSION 9.0  
 SIMULATION SCIENCES, INC.

R  
 PIPEPHASE

PAGE 2  
 PROJECT ASPERSION  
 JOCD  
 PROBLEM PROBLEM1  
 12/14/06

OUTPUT  
 NETWORK REPORT

=====

BASE CASE

LINK SUMMARY

RATE, PRESSURE AND TEMPERATURE SUMMARY

-----

| FROM(F)<br>AND<br>TO(T) |         | ----ACTUAL FLOW RATES***-- |       |         | PRESS: |         |       | ---    |
|-------------------------|---------|----------------------------|-------|---------|--------|---------|-------|--------|
| HOLDUP**---             |         |                            |       |         | PRESS: | DROP    | TEMP: | GAS    |
| LINK                    | NODE    | GAS                        | OIL   | WATER   | PRESS: | DROP    | TEMP: | GAS    |
| LIQ                     |         | (MMCFD)                    | (GPM) | (GPM)   | (PSIG) | (PSIG)  | (F)   | (MM    |
| (SGAL)                  |         |                            |       |         |        |         |       | SCF)   |
| -----                   |         | -----                      | ----- | -----   | -----  | -----   | ----- | -----  |
| L005                    | S001(F) | 0.0000                     | 0.000 | 320.897 | 12.2   |         | 80.0  |        |
|                         | J003(T) | 0.0000                     | 0.000 | 320.898 | 11.7   | 0.5     | 80.0  | 0.0000 |
| 9.                      |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L012                    | J003(F) | 0.0000                     | 0.000 | 160.452 | 11.7   |         | 80.0  |        |
|                         | J009(T) | 0.0000                     | 0.000 | 160.454 | 8.1    | 3.6     | 80.0  | 0.0000 |
| 46.                     |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L021                    | J003(F) | 0.0000                     | 0.000 | 160.446 | 11.7   |         | 80.0  |        |
|                         | J010(T) | 0.0000                     | 0.000 | 160.447 | 8.1    | 3.6     | 80.0  | 0.0000 |
| 46.                     |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L032                    | J009(F) | 0.0000                     | 0.000 | 80.231  | 8.1    |         | 80.0  |        |
|                         | J030(T) | 0.0000                     | 0.000 | 80.231  | 8.0    | 0.1     | 80.0  | 0.0000 |
| 5.                      |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L036                    | J009(F) | 0.0000                     | 0.000 | 80.223  | 8.1    |         | 80.0  |        |
|                         | J029(T) | 0.0000                     | 0.000 | 80.223  | 8.0    | 0.1     | 80.0  | 0.0000 |
| 5.                      |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L040                    | J010(F) | 0.0000                     | 0.000 | 80.224  | 8.1    |         | 80.0  |        |
|                         | J027(T) | 0.0000                     | 0.000 | 80.224  | 8.0    | 0.1     | 80.0  | 0.0000 |
| 5.                      |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L043                    | J010(F) | 0.0000                     | 0.000 | 80.224  | 8.1    |         | 80.0  |        |
|                         | J028(T) | 0.0000                     | 0.000 | 80.224  | 8.0    | 0.1     | 80.0  | 0.0000 |
| 5.                      |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L050                    | J030(F) | 0.0000                     | 0.000 | 40.261  | 8.0    |         | 80.0  |        |
|                         | J046(T) | 0.0000                     | 0.000 | 40.261  | 7.9    | 5.93E-2 | 80.0  | 0.0000 |
| 10.                     |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L053                    | J029(F) | 0.0000                     | 0.000 | 40.252  | 8.0    |         | 80.0  |        |
|                         | J047(T) | 0.0000                     | 0.000 | 40.252  | 7.9    | 5.93E-2 | 80.0  | 0.0000 |
| 10.                     |         |                            |       |         |        |         |       |        |
| L056                    | J027(F) | 0.0000                     | 0.000 | 40.253  | 8.0    |         | 80.0  |        |

|     |              |        |       |        |          |         |      |        |
|-----|--------------|--------|-------|--------|----------|---------|------|--------|
|     | J048(T)      | 0.0000 | 0.000 | 40.253 | 7.9      | 5.93E-2 | 80.0 | 0.0000 |
| 10. |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L061 J028(F) | 0.0000 | 0.000 | 40.253 | 8.0      |         | 80.0 |        |
|     | J049(T)      | 0.0000 | 0.000 | 40.253 | 7.9      | 5.93E-2 | 80.0 | 0.0000 |
| 10. |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L081 J046(F) | 0.0000 | 0.000 | 20.135 | 7.9      |         | 80.0 |        |
|     | D001(T)      | 0.0000 | 0.000 | 20.135 | 4.10E-3* | 7.9     | 80.0 | 0.0000 |
| 3.  |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L086 J046(F) | 0.0000 | 0.000 | 20.126 | 7.9      |         | 80.0 |        |
|     | D009(T)      | 0.0000 | 0.000 | 20.127 | 4.10E-3* | 7.9     | 80.0 | 0.0000 |
| 3.  |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L090 J047(F) | 0.0000 | 0.000 | 20.126 | 7.9      |         | 80.0 |        |
|     | D004(T)      | 0.0000 | 0.000 | 20.127 | 4.10E-3* | 7.9     | 80.0 | 0.0000 |
| 3.  |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L094 J047(F) | 0.0000 | 0.000 | 20.126 | 7.9      |         | 80.0 |        |
|     | D012(T)      | 0.0000 | 0.000 | 20.127 | 4.10E-3* | 7.9     | 80.0 | 0.0000 |
| 3.  |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L098 J048(F) | 0.0000 | 0.000 | 20.126 | 7.9      |         | 80.0 |        |
|     | D005(T)      | 0.0000 | 0.000 | 20.127 | 4.10E-3* | 7.9     | 80.0 | 0.0000 |
| 3.  |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L102 J048(F) | 0.0000 | 0.000 | 20.126 | 7.9      |         | 80.0 |        |
|     | D013(T)      | 0.0000 | 0.000 | 20.127 | 4.10E-3* | 7.9     | 80.0 | 0.0000 |
| 3.  |              |        |       |        |          |         |      |        |
|     | L106 J049(F) | 0.0000 | 0.000 | 20.126 | 7.9      |         | 80.0 |        |
|     | D008(T)      | 0.0000 | 0.000 | 20.127 | 4.10E-3* | 7.9     | 80.0 | 0.0000 |
| 3.  |              |        |       |        |          |         |      |        |

\* - INDICATES KNOWN PRESSURE

\*\* VOLUME REPORTED AT USER STANDARD CONDITIONS

\*\*\* RATE REPORTED AT ACTUAL TEMPERATURE AND PRESSURE CONDITIONS

VERSION 9.0 R  
SIMULATION SCIENCES, INC. PIPEPHASE  
PAGE 3  
PROJECT ASPERSION OUTPUT  
JOCD  
PROBLEM PROBLEM1 NETWORK REPORT  
12/14/06

=====  
BASE CASE

LINK SUMMARY

RATE, PRESSURE AND TEMPERATURE SUMMARY

-----  
FROM(F)  
AND  
TO(T) ----ACTUAL FLOW RATES\*\*\*-- PRESS: ---  
HOLDUP\*\*---  
LINK NODE GAS OIL WATER PRESS: DROP TEMP: GAS  
LIQ  
(SGAL) (MMCFD) (GPM) (GPM) (PSIG) (PSIG) (F) (MM  
SCF)

```

-----
*****CONTINUED*****
L110 J049(F) 0.0000 0.000 20.126 7.9 80.0
      D016(T) 0.0000 0.000 20.127 4.10E-3* 7.9 80.0 0.0000
3.
L114 J030(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D002(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.
L118 J030(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D010(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.
L122 J029(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D003(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.
L126 J029(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D011(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.
L130 J027(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D014(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.
L134 J027(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D006(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.
L138 J028(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D015(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.
L142 J028(F) 0.0000 0.000 19.985 8.0 80.0
      D007(T) 0.0000 0.000 19.986 4.10E-3* 8.0 80.0 0.0000
4.

```

\* - INDICATES KNOWN PRESSURE

\*\* VOLUME REPORTED AT USER STANDARD CONDITIONS

\*\*\* RATE REPORTED AT ACTUAL TEMPERATURE AND PRESSURE CONDITIONS

```

VERSION 9.0 R
SIMULATION SCIENCES, INC. PIPEPHASE
PAGE 4
PROJECT ASPERSION OUTPUT
JOCD
PROBLEM PROBLEM1 NETWORK REPORT
12/14/06

```

=====
BASE CASE

NODE SUMMARY

```

---STANDARD FLOW RATES ---**
NODE   PRES.   GAS   OIL   WATER   TEMP.
      (PSIG) (MMCFD) (GPM) (GPM) (F)
-----
S001   12.2   0.0000 0.000 319.999* 80.0
J003   11.7   0.0000 0.000 0.000* 80.0
J009   8.1    0.0000 0.000 0.000* 80.0

```

|      |          |        |       |         |      |
|------|----------|--------|-------|---------|------|
| J010 | 8.1      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J030 | 8.0      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J029 | 8.0      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J027 | 8.0      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J028 | 8.0      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J046 | 7.9      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J047 | 7.9      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J048 | 7.9      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| J049 | 7.9      | 0.0000 | 0.000 | 0.000*  | 80.0 |
| D001 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.078 | 80.0 |
| D009 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.070 | 80.0 |
| D004 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.070 | 80.0 |
| D012 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.070 | 80.0 |
| D005 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.070 | 80.0 |
| D013 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.070 | 80.0 |
| D008 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.070 | 80.0 |
| D016 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -20.070 | 80.0 |
| D002 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |
| D010 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |
| D003 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |
| D011 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |
| D014 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |
| D006 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |
| D015 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |
| D007 | 4.10E-3* | 0.0000 | 0.000 | -19.929 | 80.0 |

\* INDICATES KNOWN PRESSURE OR FLOW

\*\* STANDARD FLOW RATES REPORTED AT USER STD CONDITION

## ANEXO C.

El siguiente cálculo fue presentado por NEW GAS AND OIL en la propuesta de venta de los equipos a ECOPETROL S.A.

### RELACIONES DE TRANSFERENCIA DE OXIGENO

El oxígeno requerido por una laguna aireada se suministra mediante equipos de aireación superficial o de aire difuso. El rendimiento nominal de los equipos de aireación superficial debe corregirse para las condiciones de diseño mediante la siguiente ecuación:

$$N = N_o * ( * 1.024 (T-20) * (((*C_{sw} - C_L)/C_{st}))$$

N = Tasa de transferencia de oxígeno en campo (Kg O<sub>2</sub>/ HP)

N<sub>o</sub> = Tasa de transferencia de oxígeno en condiciones Standard. Para el equipo en mención, se tomará un valor de 2.5 Kg O<sub>2</sub>

α = Relación entre la tasa de transferencia de O<sub>2</sub> en aguas residuales a la tasa de transferencia en agua pura. Para aguas residuales industriales el valor puede variar entre 0,3 y 2. Para este caso particular, se tomará un valor intermedio de uno (1)

β = Concentración de saturación de O<sub>2</sub> en el agua residual a la concentración de saturación en agua pura. Para aguas residuales β = 0.9.

C<sub>sw</sub> = Valor de saturación del oxígeno en el agua a la temperatura y altitud del lugar (mg/L).

C<sub>L</sub> = Concentración de oxígeno disuelto en las lagunas. Normalmente varía entre 0.5 y 2.0 mg/L. Se empleará 2.0 para este caso.

C<sub>st</sub> = Concentración de saturación del oxígeno en el agua pura en condiciones Standard. Es igual a 9.17 mg/L.

Reemplazando:

$$N = 2.5 * 1 * 1.024^{(28-20)} * ((0.9 * 5.7 - 2) / 9.1)$$

$$N = 1.04 \text{ Kg O}_2 / \text{HP}$$

### POTENCIA REQUERIDA (P) SEGÚN RELACIONES DE TRANSFERENCIA DE OXIGENO.

Basados en los requerimientos de oxígeno, tendríamos:

$$Pr = OR / N$$

Donde: Pr = Potencia requerida

$$Pr = 31.34 \text{ Kg/h} / 1.04 \text{ Kg O}_2 / \text{HP}$$

$$Pr = 32.6 \text{ HP}$$

De acuerdo con los cálculos realizados anteriormente se requiere aproximadamente de 6 a 7 aireadores de 5 HP cada uno, distribuidos equitativamente de acuerdo a la geometría de la piscina.

## ANEXO D. FICHA DE SEGURIDAD DEL FENOBIOL

|   |                          |                         |
|---|--------------------------|-------------------------|
|  | <b>HOJA DE SEGURIDAD</b> | FECHA EDICIÓN: 15/12/06 |
|   | PRODUCTO                 | Páginas 1 de 3          |

### IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

**Características producto:** MICROORGANISMOS DEGRADADORES DE HIDROCARBUROS O COMPUESTOS FENÓLICOS

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>NOMBRE PRODUCTO</b> | <b>PROVEEDOR</b>                            |
| ECOBIOL / FENOBIOL     | ECOPETROL-Instituto Colombiano del Petróleo |

|  |  |
|--|--|
| <b>PROVEEDOR ACTUAL:</b> ECP ICP<br><b>DIRECCIÓN:</b> Km 7. Vía Piedecuesta<br><b>CIUDAD/DEP:</b> Piedecuesta - Santander<br><b>PAÍS:</b> Colombia | <b>TELÉFONO:</b> 6847000<br><b>FAX:</b> 6847444<br><b>A.A.:</b> 4185<br><b>Obs:</b> Distribuidor Exclusivo |
|--|--|

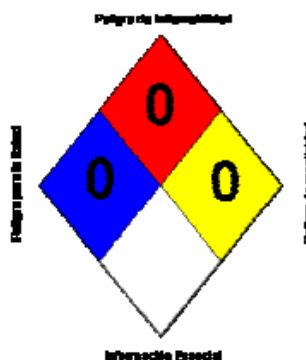
### COMPOSICIÓN DEL PRODUCTO

**Familia Química del producto:** MEZCLA BIOLÓGICA

| Componentes            |                        | Límite de exposición TLV(TWA) | Peligroso |    | Observaciones |
|------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------|----|---------------|
| Nombre Científico      | Nombre Común           |                               | SI        | NO |               |
| <i>Pseudomonas sp</i>  | Bacterias degradadoras | No conocido                   |           | X  |               |
| <i>Alcaligenes sp.</i> | Bacterias degradadoras | No conocido                   |           | X  |               |
|                        |                        |                               |           |    |               |

| Frasas de Riesgo (RE) | Frasas de Seguridad (S)   |
|-----------------------|---|
|                       | S2 Manténgase fuera del alcance de los niños<br>S3 Consérvese en un lugar fresco<br>S7 Manténgase en recipiente bien cerrado<br>S25 Evite el contacto con los ojos<br>S47 Consérvese a una temperatura no superior a 25°C |

### DIAMANTE DE SEGURIDAD



**HOJA DE SEGURIDAD**

FECHA EDICIÓN: 15/12/06

PRODUCTO

Páginas 2 de 3

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| <b>Apariencia</b>  | SÓLIDA -POLVO DE TEXTURA FINA |
| <b>Color</b>       | MARRÓN                        |
| <b>Olor</b>        | ORGANICO                      |
| <b>Solubilidad</b> | PARCIALMENTE SOLUBLE EN AGUA  |

**INCENDIO O EXPLOSIÓN**

| Parámetro   | Valor |
|---|-------|
| Temperatura de autoignición (°C)                  | NA    |
| Temperatura de Inflamación (°C)                   | NA    |
| Límite inferior de inflamabilidad (Concentración) | NA    |
| Límite superior de inflamabilidad (Concentración) | NA    |

Mezcla (s) peligrosa(s)  SI  NO

(¿Cuál?) \_\_\_\_\_

**SALUD HUMANA-PRIMEROS AUXILIOS**

| Valor límite permisible de exposición (40 h /semana o 8h/ día) | TLV (TWA)   | Unidad | Norma |
|--|-------------|--------|-------|
|  | No conocido |        |       |

| Incidente   |                                     |    |  |
|---|-------------------------------------|----|--|
| <b>1. Contacto con los ojos</b>   | Requiere atención médica inmediata: | SI | <input checked="" type="checkbox"/> NO |
| - Tiempos exposición / Efectos: IRRITACIÓN POR CONTACTO / EFECTOS LEVES.<br>- Primeros auxilios: LAVAR CON ABUNDANTE AGUA. CONSULTE AL MÉDICO |                                     |    |  |
| <b>2. Inhalación</b>  | Requiere atención médica inmediata: | SI | <input checked="" type="checkbox"/> NO |
| - Tiempos exposición / Efectos: LA INHALACIÓN PUEDE CAUSAR TOS.<br>- Primeros auxilios: TRASLADAR LA PERSONA AL AIRE FRESCO.                  |                                     |    |  |
| <b>3. Contacto con la piel</b>  | Requiere atención médica inmediata: | SI | <input checked="" type="checkbox"/> NO |
| - Tiempos exposición / Efectos: EN CONTACTO CON LA PIEL NO CAUSA QUEMADURAS.<br>- Primeros auxilios: LAVAR CON ABUNDANTE AGUA.                |                                     |    |  |
| <b>4. Ingestión</b>   | Requiere atención médica inmediata: | SI | <input checked="" type="checkbox"/> NO |
| - Tiempos exposición / Efectos: NO IRRITA EL TRACTO DIGESTIVO.<br>- Primeros auxilios: NO INDUCIR VÓMITO, .SUMINISTRAR AGUA                   |                                     |    |  |

**CONTROL DE LA EXPOSICIÓN**

| Riesgo | Equipos de Protección personal              | Control de la instalación |
|--------|---|---------------------------|
| OJOS   | USAR GAFAS CONTRA SALPICADURA               |                           |
| PIEL   | UTILIZAR DELANTAL Y GUANTES DE CAUCHO O PVC |                           |

**HOJA DE SEGURIDAD**

FECHA EDICIÓN: 15/12/06

PRODUCTO

Páginas 3 de 3

Práctica de trabajo e higiene: LAS PERSONAS DEBEN LAVARSE DESPUÉS DE SU MANIPULACIÓN

**INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA Y ECOLÓGICA**

| Organismos    | Evaluación                                | Resultado   | Organismo                     | CL <sub>50</sub> | CE <sub>50</sub> | Resultados |
|---------------|---|-------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------|
| Ratas Winstar | <b>Toxicidad aguda/<br/>Patogenicidad</b> | No Patógeno | <i>Daphnia pulex</i> **       | >100%            | >100%            | No tóxico  |
|               | <b>Toxicidad dérmica aguda</b>            | No tóxico   | <i>Scenedesmus acutus</i> **  | >100%            | >100%            | No tóxico  |
|               | <b>Toxicidad Inhalatoria aguda</b>        | No tóxico   | <i>Oreochromis sp</i> **      | >100%            | >100%            | No tóxico  |
|               | <b>Irritación ocular primaria</b>         | No alérgico | <i>Lemna aequinocialis</i> ** | >100%            | >100%            | No tóxico  |

\* Estudio de toxicidad/patogenicidad en animales de laboratorio para los consorcios degradador de hidrocarburos, degradador de fenoles GCB y degradador de fenoles GRC. Laboratorios Immunopharmos Ltda. para ECOPETROL S.A. Instituto Colombiano del Petróleo. 2005

\*\* Evaluación de toxicidad aguda en pruebas bioensayo. Laboratorio de Biotecnología. ECOPETROL S.A. Instituto Colombiano del Petróleo. 2005

**ALMACENAMIENTO, MANEJO Y DERRAME**

| Parámetro                  | Descripción              |  |  |   |             |                |
|----------------------------|--------------------------|--|--|---|-------------|----------------|
| Tipo de empaque o envase   | Material: Bulto plástico |  |  |   |             |                |
| Posición de almacenamiento | Vertical                 |  | Horizontal                                 | X | Indiferente | No establecida |
| Disposición                | Lugar : sombra           |  | Temperatura almacenamiento (°C): 15 - 25°C |   |             |                |

**Observaciones para uso y almacenamiento:**

- Se recomienda su uso inmediato o en un lapso no mayor a tres (3) meses.
- Almacene en un lugar seco alejado del calor directo o de la luz del sol y protegido de la lluvia.
- Mantenga el empaque cerrado mientras no lo esté utilizando.
- El producto debe protegerse de la acción de plagas y retirar cuando se observe un bulto contaminado.
- ECOBIOL y FENOBIOL son productos naturales, su mezcla de microorganismos no patógenos, no tóxicos, no alérgicos puede liberarse al medio ambiente.

## ANEXO E. FICHA DE SEGURIDAD DEL TRIPLE 7



Fertilizantes: Químicos  
Químico Orgánicos  
Líquidos

### FERTILIZANTE LÍQUIDO TRIPLE 7

#### ESPECIFICACIONES TECNICAS

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| Nombre              | : T-7     |
| Nitrógeno total     | 7 % p/p   |
| Nitrógeno Orgánico  | 4,3 % p/p |
| Nitrógeno Amoniacal | 2,7 % p/p |
| P2O5                | 7 % p/p   |
| K2O                 | 7 % p/p   |
| Densidad a 15 C     | 1,18 g/ml |
| Color               | Café      |
| Presentación        | Líquido.  |
| Solubilidad en agua | 100%      |

#### RECOMENDACIONES DE USO

Líquido formulado especialmente para la industria de los hidrocarburos, recomendado para utilizarlo como nutriente de microorganismos específicos (bacterias) que tienen la facultad de descomponer residuos orgánicos tales como fenoles presentes en aguas residuales de procesos petroquímicos.

La aplicación debe ser realizada por personal calificado bajo la estricta supervisión de los técnicos de la industria petroquímica. No se recomienda utilizarlo para otra función diferente a las antes sugeridas.

La producción se realiza por solicitud expresa de ECOPETROL y para uso exclusivo de la industria de los hidrocarburos.

La firma SERVIFRAN LTDA. Es el único distribuidor autorizado para todo el país

Fabrica Km 27 vía la costa, Portachuelo, Telefax 6413505 , B/ga.

# Fichas Internacionales de Seguridad Química

## FERTILIZANTE TRIPLE 7

ICSC:

|          |  |   |
|----------|--|---|
| <b>D</b> | <b>ESTADO FISICO; ASPECTO</b><br>Líquido, ligeramente turbio,<br>color café claro  | <b>VIAS DE EXPOSICION</b><br>La sustancia se puede absorber<br>por ingestión.   |
| <b>A</b> | <b>PELIGROS FISICOS</b>  |   |
| <b>T</b> |  | <b>RIESGO DE INHALACION</b><br>La evaporación de gases de<br>amoníaco cuando se somete a<br>ebullición puede causar efectos<br>de irritación de mucosas<br>superiores |
| <b>O</b> | <b>PELIGROS QUIMICOS</b><br>La sustancia libera ligeramente<br>gases de amoníaco cuando se<br>somete a ebullición durante<br>largo tiempo. |   |
| <b>S</b> |  | <b>EFFECTOS DE EXPOSICION<br/>PROLONGADA O REPETIDA</b>   |
| <b>I</b> | <b>LIMITES DE EXPOSICION</b><br>TLV no establecido.  |   |
| <b>M</b> |  |   |
| <b>P</b> |  |   |
| <b>O</b> |  |   |
| <b>R</b> |  |   |
| <b>T</b> |  |   |
| <b>A</b> |  |   |
| <b>N</b> |  |   |
| <b>T</b> |  |   |
| <b>E</b> |  |   |
| <b>S</b> |  |   |

|                            |   |                               |
|----------------------------|---|-------------------------------|
| <b>PROPIEDADES FISICAS</b> | Punto de Ebullición 130 C<br>Densidad relativa (agua = 1): 1.18 | Solubilidad en agua: miscible |
|----------------------------|---|-------------------------------|

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>DATOS AMBIENTALES</b> |  |
|--------------------------|--|

**NOTAS**

**INFORMACION ADICIONAL**

Mezcla de fertilizantes simples para lograr el grado de fertilizante T-7

ICSC:

© CCE, IPCS, 2006

**NOTA LEGAL IMPORTANTE:** El uso que se de este producto es responsabilidad del comprador .

**TRIPLE 7  
FERTILIZANTE LIQUIDO**

NºCAS  
NºRTECS  
Nº ICSC

| <b>TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION</b>   | <b>PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS</b>  | <b>PREVENCION</b>   | <b>PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS</b>  |
|---|---|---|---|
| <b>INCENDIO</b>   | No combustible.   |   | En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.   |
| <b>EXPLOSION</b>  | No explosivo  |   |   |
| <b>EXPOSICION</b>   |   |   |   |
| • <b>INHALACION</b>   |   | Extracción localizada.  | Aire limpio, reposo   |
| • <b>PIEL</b>   | No irritante en cortos periodos de contacto<br><br>Enrojecimiento.Dolor | Guantes protectores.<br><br>Gafas de protección de seguridad. | Aclarar la piel con agua abundante o ducharse.<br><br>Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico. |
| • <b>OJOS</b>   |   |   |   |
| • <b>INGESTION</b>  |   | No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo               | Enjuagar la boca<br>Proporcionar asistencia médica.   |
| <b>DERRAMAS Y FUGAS</b>   | <b>ALMACENAMIENTO</b>   | <b>ENVASADO Y ETIQUETADO</b>                                  |   |
| Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente y eliminar el residuo con agua abundante. | Condiciones normales de almacenamiento.                                 | NU (transporte): No clasificado<br><br>CE: No clasificado     |   |

**VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE**

**ICSC:**

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 2006