

**PROPUESTA PARA LA DISPOSICION FINAL DE LODOS ACEITOSOS DEL CAMPO  
CASTILLA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY –  
ECOPETROL S. A**

**ING. SANDRA CAROLINA AGUILAR J  
ING. ANDRES ERNESTO TRIVIÑO RODRIGUEZ**

**Monografía para optar al título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director  
ING. PEDRO ALFONSO CASALLAS GONZALEZ  
Coordinador de Producción Castilla**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BOGOTA, D.C.  
2.006**

**PROPUESTA PARA LA DISPOSICION FINAL DE LODOS ACEITOSOS DEL CAMPO  
CASTILLA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY –  
ECOPETROL S. A**

**ING. SANDRA CAROLINA AGUILAR J  
ING. ANDRES ERNESTO TRIVIÑO RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA AMBIENTAL  
BOGOTA, D.C.  
2.006**



Ni la Universidad Industrial de Santander, ni los jurados se hacen responsables de los conceptos expuestos en el presente documento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La Superintendencia de Operaciones Apiay por su apoyo en la ejecución de este proyecto en cuanto a información y recursos.

Ing. Pedro Alfonso Casallas, Director de este proyecto por su colaboración y guía para la elaboración de este trabajo.

Ing. Jhon Alexander Pinto, Profesional de producción por su asesoría y suministro de información

Profesionales del ICP por su contribución y cooperación.

A todos los compañeros de la Superintendencia de Operaciones Apiay que nos ayudaron e hicieron posible la elaboración de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
<b>3. LA EMPRESA</b>	<b>17</b>
3.1 EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS – ECOPETROL S.A	17
3.1.1 Información general	17
3.1.2 Direccionamiento estratégico de Ecopetrol S. A.	17
3.2 <i>SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY</i>	19
3.2.1 Ubicación Geográfica	19
3.2.2 Reseña Histórica	20
3.2.3 Esquema Organizacional	21
3.2.4 Organigrama	21
3.2.5 Negocios	22
<b>4. DESCRIPCION DEL PROBLEMA</b>	<b>23</b>
4.1 PRINCIPALES FUENTES	23
4.2 ANTECEDENTES	25
4.2.1 Lodos Provenientes del tratamiento de Chichimene	25
4.2.2 Lodos Provenientes de la piscina de acopio de Castilla 2	27
4.2.3 Área de biorremediación La Vara	28
4.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	29
4.3.1 Diagnóstico Inicial	29
4.3.2 Limitaciones del sistema	30
4.4 JUSTIFICACIÓN	32
<b>5. REFERENCIA TEORICA Y LEGAL</b>	<b>34</b>
5.1. MARCO TEORICO	34
5.1.1 Biorremediación	34
5.1.2 Tanques espesadores	40
5.1.3 Separadores de placas corrugadas o CPI	41
5.1.4 Lechos de Secado	43
5.1.5 Mezclas asfálticas	44
5.2 MARCO LEGAL	46
5.2.1 Residuos peligrosos	46
5.2.2 Legislación en Colombia	51

<b>6.</b>	<b>DESCRIPCION DEL PRODUCTO</b>	<b>56</b>
6.1	OBTENCION Y USO	56
6.2	CARACTERIZACION DEL CRUDO CASTILLA	57
6.2.1	Condiciones de Seguridad	57
6.2.2	Datos Fisico Químicos	58
6.2.3	Propiedades del Petróleo	58
6.3.	CARACTERIZACION DEL LODO	60
6.3.1	Esquema del Espesador de Lodos	60
<b>7.</b>	<b>BENCHMARKING</b>	<b>67</b>
7.1	CONSIDERACIONES GENERALES DEL SISTEMA DE MANEJO DE LODOS DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA	67
7.2	TRATAMIENTO DE AGUA EN LA REFINERIA DE CARTAGENA	68
7.2.1	Retiro de Lodos	68
7.2.2	Filtro y Trampa	68
7.2.3	API	69
7.2.4	Sumidero de Lodos	70
7.2.5	Tanques Espesadores	70
7.2.6	Lechos de Secado	72
<b>8.</b>	<b>PROPUESTAS PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS</b>	<b>74</b>
8.1	OPORTUNIDADES DE MEJORA EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS	74
8.2	PROPUESTA PARA EL MANEJO DE LODOS EN EL AREA CASTILLA CHICHIMENE	75
8.2.1	Generalidades	76
8.2.2	Descripción del Proceso	77
8.2.3	Recomendaciones	78
8.3	PROPUESTA PARA EL ACOPIO DE LODOS DE PROCESO	85
8.3.1	Observaciones y recomendaciones de la propuesta de acopio de lodos	86
8.4	ACCIONES DE MEJORAMIENTO	86
8.4.1	Acciones a Corto Plazo	86
8.4.2	Acciones a Mediano Plazo	87
8.5	RAZÓN Y BENEFICIOS DEL CAMBIO	87
8.6	COSTOS DE LA PROPUESTA	88
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>89</b>
<b>10.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>92</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>93</b>

## TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Grupos de Interés de ECOPETROL S. A	18
Tabla 2. Diagnóstico sistema de tratamiento de lodos Campo Castilla	30
<b>Tabla 3. Tipos de residuos aceitosos</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 4. Diamante del Fuego - Crudo Castilla</b>	<b>58</b>
Tabla 5. Datos Fisico Químicos – Crudo Castilla	58
Tabla 6. Propiedades del Petróleo	59
Tabla 7. Caracterización de Crudo y Gas	59
Tabla 8. Composición de fondos después de filtrado	64
Tabla 9. Diagnóstico sistema de tratamiento de lodos Refinería Cartagena	67

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Cobertura Operacional de la Superintendencia de Operaciones Apiay.	19
Figura 2. Mapa de localización del Área Castilla	20
Figura 3. Organigrama	22
Figura 4. Esquema General de Tratamiento	24
Figura 5. Separador de placas corrugadas	42
Figura 6. Esquema de Operación Actual	74
Figura 7. Esquema de Operación Propuesto	77
Figura 8. Distribución del Proceso de CPI hacia Tanques Espesadores	79
Figura 9. Distribución del Proceso entre Tanques Espesadores y Lechos de Secado	79
Figura 10. Ejemplo de configuración interna de un tanque Espesador	80
Figura 11. Distribución del Proceso entre Tanques Espesadores y Lechos de Secado	80
Figura 12. Proceso entre Lechos de Secado y Foso Bombas Verticales	82
Figura 13. Distribución del Proceso entre Depuradores y Foso de Bombas Verticales	82
Figura 14. Distribución de áreas aledañas a La Vara	80

## GLOSARIO

**ALMACENAMIENTO:** Acción de retener temporalmente residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento se entregan al servicio de recolección o se dispone de ellos.

**ATMÓSFERA PELIGROSA:** Cualquier atmósfera ya sea inmediatamente o no inmediatamente peligrosa para la vida o la salud, la cual es deficiente en oxígeno o que contiene un contaminante tóxico productor de enfermedad, que excede el nivel máximo permisible.

**DEPURADOR:** Celda de Flotación de hidrocarburos, tipo IAF. (Induced Air Flotation).

**CPI:** Corrugated Plate Interceptor. Separador de placas corrugadas.

**LODOS ACEITOSOS:** Son residuos que se generan en los tanques de almacenamiento de crudo, combustóleo, gasóleo y en plantas de tratamiento de efluentes. Están constituidos por parafinas, asfaltenos, agua y material inorgánico.

**SOA:** *Superintendencia de Operaciones Apiay.*

**STAP:** Sistema de Tratamiento de Agua Potable

**STIL:** Sistema de Tratamiento Integral de Lodos

**TIE-INS:** Es la interconexión entre una línea y/o equipo nuevo con una línea y/o equipo existente.

# **TITULO: PROPUESTA PARA LA DISPOSICION FINAL DE LODOS ACEITOSOS DEL CAMPO CASTILLA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY – ECOPETROL S. A\***

Autores: AGUILAR JAIMES, Sandra Carolina – TRIVIÑO RODRIGUEZ, Andrés Ernesto\*\*

Palabras Claves: Lodos Aceitosos, Tratamiento de crudo, Aglomerados asfálticos, Biorremediación.

La Superintendencia de Operaciones Apiay – ECOPETROL. S. A, está conformada por las áreas de Apiay y Castilla que a su vez se componen de los Campos Apiay, Suria y Reforma y los Campos Castilla y Chichimene respectivamente. En el campo Castilla se realiza el proceso de tratamiento de los fluidos (agua – aceite) dejando a lo largo de éste residuos que conforman los lodos aceitosos. Las principales fuentes de este residuo son la limpieza de tanques de tratamiento de crudo, limpieza y operación del sistema de tratamiento de agua, piscinas API y equipos de proceso en las estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene y complementariamente los residuos generados en las contingencias que presentan derrame de hidrocarburo.

En la actualidad los lodos generados son tratados con Biorremediación, práctica ambiental eficiente para el tipo de residuo generado en el Área Apiay e igualmente utilizada pero con mayores exigencias en los lodos generados en el Área Castilla. Debido al gran volumen de almacenamiento y generación de este tipo de residuos se evidenció la necesidad de prestar atención al tema del tratamiento y disposición final de los lodos aceitosos con el fin de evitar desviaciones y problemas posteriores con la autoridad ambiental.

El presente documento analiza el esquema de operación actual que deja de manera incierta la disposición final que se le debe dar a los lodos aceitosos, identificando oportunidades de mejora planteadas bajo un esquema de operación complementario al actual que permita aumentar la capacidad de tratamiento del sistema conforme a los volúmenes incrementales de producción.

Las conclusiones del estudio se basan en el análisis de muestras de lodos procedentes de diferentes puntos del tratamiento con las cuales se propuso dar como disposición final del residuo su utilización como ligante de mezcla asfáltica para pavimentos de vías secundarias y terciarias, propuesta que está siendo analizada para realizar una prueba piloto con el fin de demostrar su eficiencia y por ello el siguiente trabajo explora estas alternativas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director Ing. Pedro Alfonso Casallas

**TITLE: PROPOSAL FOR THE FINAL DISPOSITION OF OILY MUDS OF THE CAMP OF CASTILLA FROM THE SUPERVISION OF OPERATIONS APIAY – ECOPETROL S. A.\***

AUTHORS: AGUILAR JAIMES Sandra Carolina – TRIVIÑO RODRIGUEZ, Andrés Ernesto\*\*

Key Words: Oily Muds, Crude Treatment, Agglomerated Asphalt, Bioremediation.

The Supervision of Operations Apiay – ECOPETROL. S. A, is formed by the areas of Apiay ad Castilla which at the same time composes the Camps Apiay, Suria and Reforma and the Camps Castilla and Chichimene respectively. The process of fluid (water – oil) treatment is done in the Camp of Castilla leaving in it residues that conform the oily mud. The principal sources of this residue are the cleaning of the tanks of crude treatment, cleaning and operation of the system of water treatment, API pools and process equipments in the stations Castilla 1, Castilla 2, and Chichimene and complementary to these, the residues generated in the contingencies that present the spilling of hydrocarbons.

Now a days the mud generated, is treated with Bioremediation, environmental practice which is effective for the type of residue generated in the area of Apiay and also used but with greater requirements in the mud formed in the area of Castilla.

Due to the great volume of storage and generation of these type of residues became evident the need of paying close attention to the topic of treatment and final disposition of oily mud with the purpose of avoiding deviations and future problems with the environmental authorities.

The present document analyses the actual operation scheme that leaves in an uncertain way the final disposition that must be given to oily mud, identifying opportunities of improvement raised in one operation scheme complementary to the actual that allows to increase the treatment capacity of the system according to the increasing volumes of production.

The conclusions of the study are based in the analysis of mud samples that come from different parts of the treatment with which was proposed to give as a final disposition of the residue its utilization like a link of asphalt mixture for the pavement of secondary and tertiary roads, proposal that in the moment is being analysed to make a pilot test with the purpose of demonstrating its efficiency and because of that the present work explores these alternatives.

---

\* Graduating Project.

\*\* School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Director Eng. Pedro Alfonso Casallas.

## INTRODUCCION

La Superintendencia de Operaciones Apiay – ECOPEPETROL. S. A, está conformada por las áreas de Apiay y Castilla que a su vez se componen de los Campos Apiay, Suria y Reforma y los Campos Castilla y Chichimene respectivamente, de los cuales se puede afirmar que las características del crudo son significativamente diferentes.

La producción del campo Castilla se recibe en las estaciones denominadas Castilla 1 y Castilla 2 y la producción del campo Chichimene se recibe en la estación Chichimene. En el campo Castilla se realiza el proceso de tratamiento de los fluidos (agua – aceite) dejando a lo largo de éste residuos que conforman los lodos aceitosos. Las principales fuentes de este residuo son la limpieza de tanques de tratamiento de crudo, limpieza y operación del sistema de tratamiento de agua, piscinas API y equipos de proceso en las estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene y complementariamente los residuos generados en las contingencias que presentan derrame de hidrocarburo.

Estos lodos son almacenados en las piscinas de acopio de Chichimene, Castilla 2 y La Vara o zona de parqueo de Carro Tanques en espera de obtener cantidades óptimas para su tratamiento. En la actualidad los lodos generados son tratados con Biorremediación, práctica ambiental eficiente para el tipo de residuo generado en el Área Apiay e igualmente utilizada pero con mayores exigencias en los lodos generados en el Área Castilla.

Debido al gran volumen de almacenamiento y generación de este tipo de residuos se evidenció la necesidad de prestar atención al tema del tratamiento y disposición final de los lodos aceitosos con el fin de evitar desviaciones y problemas posteriores con la autoridad ambiental. Por tal motivo, se realizó un diagnóstico al sistema de tratamiento de lodos específicamente de la Estación Castilla 2 con el fin de determinar la mejor alternativa para el aprovechamiento de estos desechos que contienen hidrocarburos que pudieran ser recuperados y reutilizados en esta u otra industria.

El presente documento analiza el esquema de operación actual que deja de manera incierta la disposición final que se le debe dar a los lodos aceitosos, identificando oportunidades de mejora planteadas bajo un esquema de operación complementario al actual que permita aumentar la capacidad de tratamiento del sistema conforme a los volúmenes incrementales de producción.

Las conclusiones del estudio se basan en el análisis de muestras de lodos procedentes de diferentes puntos del tratamiento con las cuales se propuso dar como disposición final del residuo su utilización como ligante de mezcla asfáltica para pavimentos de vías secundarias y terciarias, propuesta que está siendo analizada para realizar una prueba piloto con el fin de demostrar su eficiencia y por ello el siguiente trabajo explora estas alternativas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar alternativas de disposición final de lodos aceitosos generados en el tratamiento de crudo y agua de la Estación Castilla 2, limpieza de tanques y equipos de proceso en las estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene de Ecopetrol S.A

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Recolectar la información existente en la Superintendencia de Operaciones Apiay (SOA) referente a la generación y tratamiento de lodos

Evaluar el actual sistema de manejo y disposición final de lodos aceitosos

Analizar el tipo de residuo generado de acuerdo a las caracterizaciones existentes

Establecer y evaluar las alternativas de solución a la problemática del manejo de estos desechos

Determinar costos de las alternativas propuestas para implementación de facilidades de manejo y disposición final

### 3. LA EMPRESA

#### 3.1 EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS (ECOPETROL S.A.)

**3.1.1 Información General:** ECOPETROL S.A. es una sociedad pública por acciones, del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, constituida como sociedad anónima que desarrolla sus actividades en el sector de los hidrocarburos. El objeto social de ECOPETROL S.A. es el desarrollo, en Colombia o en el exterior, de actividades comerciales o industriales correspondientes o relacionadas con la exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de hidrocarburos, sus derivados, productos, afines, o combustibles con capacidad de sustituirlos, y de operaciones subsidiarias, conexas o complementarias de dichas actividades.

#### 3.1.2 Direccionamiento estratégico de ECOPETROL S. A.

- **Misión de ECOPETROL S.A.:** Maximizar el valor a los accionistas en forma sostenible mediante la gestión eficiente, rentable y segura de la cadena productiva del petróleo, gas, sus derivados y combustibles alternativos, en Colombia y Latinoamérica, asegurando una propuesta competitiva al cliente y a sus socios, brindando oportunidades atractivas de desarrollo a nuestro personal, y actuando con responsabilidad social y ambiental.
- **Visión de ECOPETROL S.A.:** ECOPETROL S.A. será reconocida como la empresa líder en Colombia y Latinoamérica en el negocio integrado del petróleo, gas, sus derivados y combustibles alternativos, apoyada principalmente en la capacidad y compromiso de su equipo humano.
- **Valores:** La reputación de la compañía estará basada en los valores corporativos, porque éstos regirán sus actos y por éstos será juzgada. Todos los negocios y relaciones se rigen por los valores de Responsabilidad Integridad y Respeto.

- **Objetivos estratégicos:** ECOPETROL, con el fin de crear y mantener ventajas competitivas en el mercado, definió su plan de negocio con base en los siguientes objetivos:
  - Maximizar Reservas y Producción: Producción superior a 0.8 MBPD en el 2010.
  - Competitividad *Downstream*: Optimización Refinerías y Plan Maestro.
  - Nuevos Negocios: Desarrollar el mercado de gas natural
  - Capital Humano y Tecnológico: Mejorar la eficiencia administrativa y operativa de la Empresa en todos sus niveles mediante la implementación de las estrategias horizontales
- **Grupos de Interés:** Los principales grupos de interés para ECOPETROL S.A. y sus compromisos con ellos son se pueden observar en la tabla 1.

**Tabla 1. Grupos de Interés de ECOPETROL S.A.**

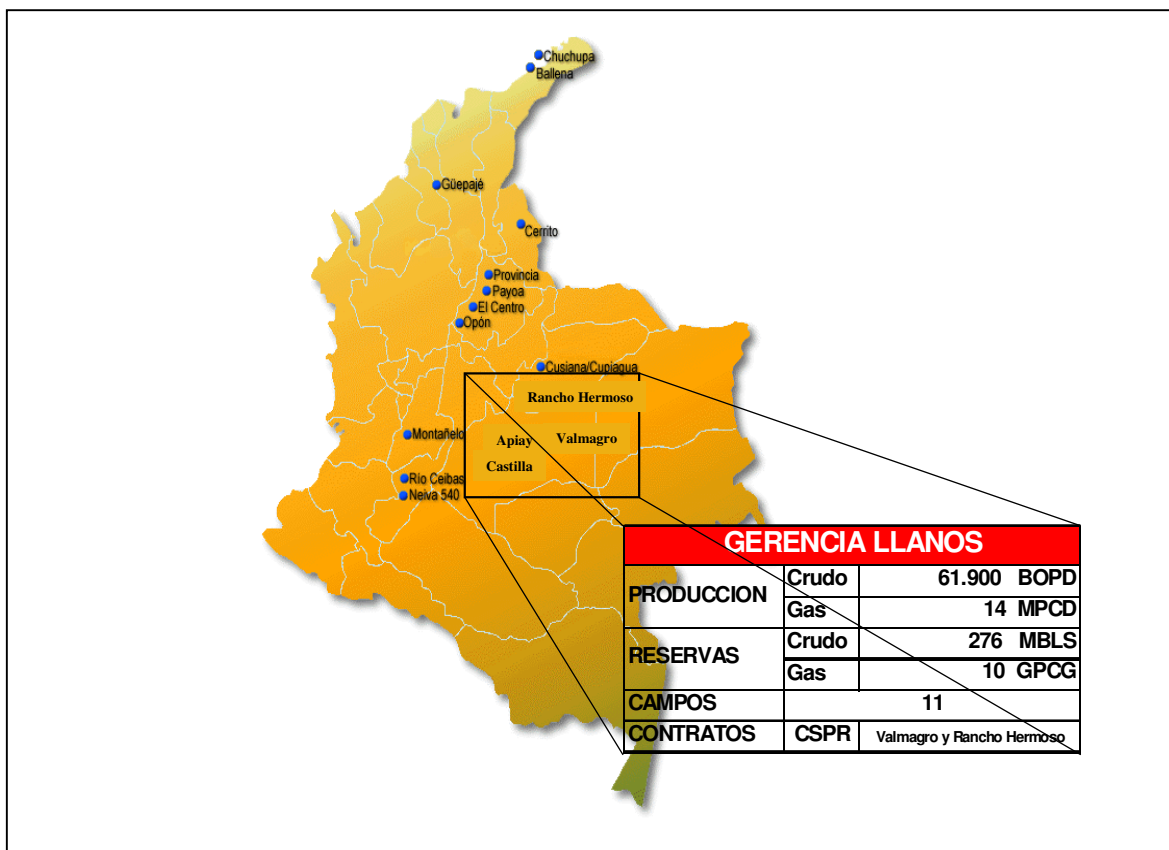
<b>GRUPO DE INTERÉS</b>	<b>COMPROMISO</b>
Los accionistas	Agregar valor a la empresa
Los empleados	Valorar y retribuir sus capacidades e ideas y contribuir a su crecimiento
Los proveedores de bienes y servicios	Adelantar los procesos de compras y contratación con transparencia y responsabilidad. Brindar todo el apoyo requerido para asegurar la entrega efectiva de los bienes y servicios convenidos.
Los clientes	Proveer los productos y servicios con criterios de calidad, costo competitivo y oportunidad
Los competidores	Actuar lealmente con la competencia
Los socios de negocios	Sostener relaciones de largo plazo que generen beneficio mutuo
Los entes de control	Obrar con responsabilidad en la gestión de los recursos públicos
La sociedad	Contribuir al desarrollo sostenible y a su bienestar
El Estado colombiano	Contribuir al desarrollo económico de Colombia

Fuente: Documento de Gobierno Corporativo de ECOPETROL S.A.

### 3.2 SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY

**3.2.1 Ubicación Geográfica:** La Superintendencia de Operaciones Apiay, denominada hasta el 2003 como Gerencia Llanos, está conformada por las áreas de Apiay y Castilla que a su vez se componen de los Campos Apiay, Suria y Reforma, y los Campos Castilla y Chichimene respectivamente.

**Figura 1. Cobertura Operacional de la Superintendencia de Operaciones Apiay.**

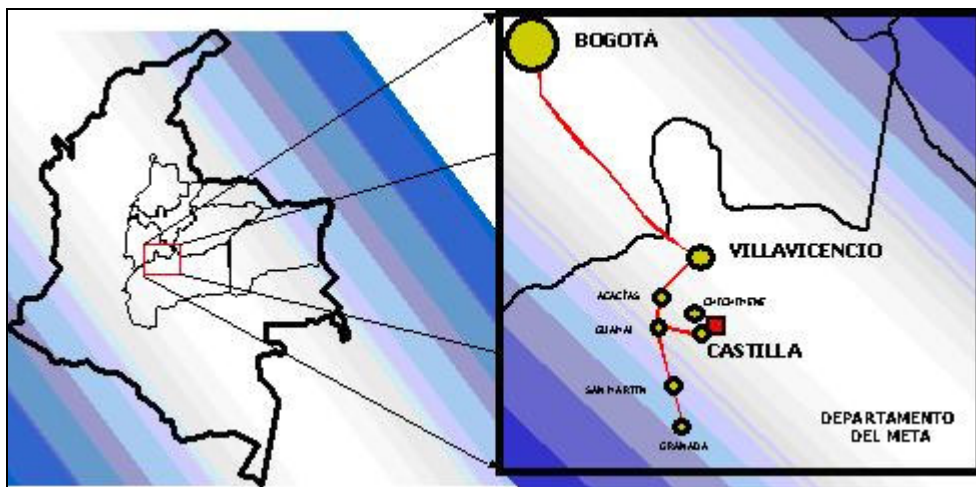


Fuente: Archivo "Presentación SOA año 2004"

El área Apiay se encuentra aproximadamente a 25 Km al sur-este de la ciudad de Villavicencio dentro de las coordenadas Gauss (origen Bogotá) Norte: 934.000 a 948.000 y Este: 1.066.000 a 1.080.000 y la principal vía de acceso es la carretera que de

Villavicencio conduce a Puerto López. El Área Castilla se encuentra ubicada en el departamento del Meta, aproximadamente a 30 km al sur de Villavicencio dentro de las coordenadas Gauss (origen Bogotá) Norte: 915.000 a 929.000 y Este: 1.043.000 a 1.053.000, esta área se encuentra en la jurisdicción de los municipios de Acacías y Castilla la Nueva (Ver figura 2). Geográficamente estas áreas corresponden a terreno plano con alturas que oscilan entre 180 y 340 m sobre el nivel del mar.

**Figura 2. Mapa de localización del Área Castilla**



### 3.2.2 Reseña Histórica

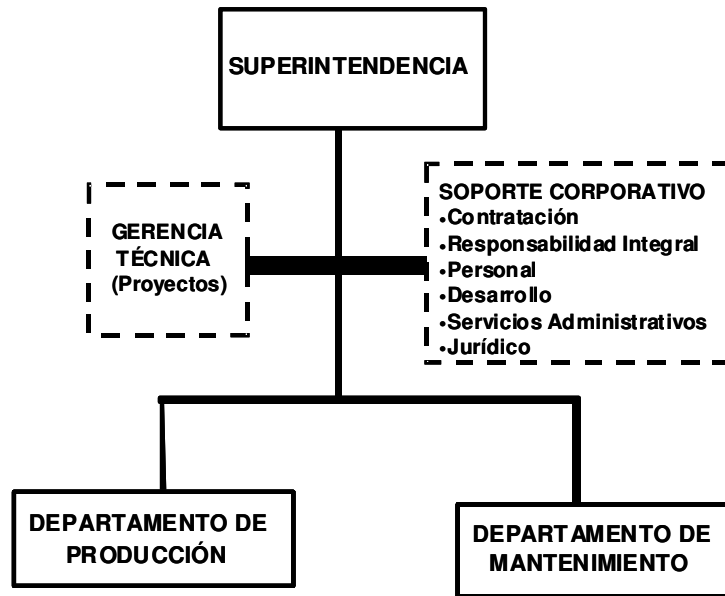
- Fase exploratoria
  - 1944 a 1977: Varias compañías petroleras entre las que se cuentan Shell, Intercol, Texaco, Chevron, Continental y Phillips hicieron gestión exploratoria en la zona que incluyó sísmica y perforación de pozos. La mayoría de estas compañías obtuvo resultados negativos.
  - Chevron descubrió los campos Castilla y Chichimene en 1969 y Ecopetrol descubrió los campos Apiay y Suria en 1981 y 1985 respectivamente.
  - 1981 a 1988: se perforaron 47 pozos en desarrollo pertenecientes a los campos Apiay, Apiay Este, Guatiquía, Suria, Suria sur, Pompeya, Austral, Guayuriba, Tanané, Libertad, Libertad Norte y Reforma.

- Fase de desarrollo
  - 1982: ECOPETROL hizo el descubrimiento del campo de Apiay con resultados positivos.
  - 1981 a 1989 el crudo producido en el área se transportó por carrotanques, llegándose a manejar un volumen de 16.000 bls por día.
  - 1981 a 1993 se construyeron las facilidades de producción, así como la Estación de Bombeo Apiay y las plantas de gas y asfalto. A partir del 8 de agosto de 1989 se inició el bombeo por el Oleoducto Central de los Llanos. En 1990 se construyeron las estaciones Suria y Reforma.
  - Durante los años 1993 y 1994 se desarrolló un programa de sísmica 3D (125 km<sup>2</sup>). En 1995 se inició el proyecto “Desarrollo Adicional Área Apiay-Ariari”, para un recobro adicional de 36 mbls.
  - En el 2000 La Gerencia Llanos asumió en forma directa la operación de los campos Castilla y Chichimene e inició los Contratos de Producción con Riesgo de los campos Valdivia - Almagro y Rancho Hermoso.
  - En el año 2003, ECOPETROL S.A. se reestructura y la Gerencia Llanos pasa a ser la Superintendencia de Operaciones Apiay, compuesta por el Área Apiay y el Área Castilla.

**3.2.3 Esquema Organizacional:** La Superintendencia de Operaciones Apiay pertenece a la Gerencia Regional Central de la Vicepresidencia de Producción. Cuenta con dos departamentos: Producción Llanos y Mantenimiento Llanos. Estos departamentos a su vez están conformados por 5 coordinaciones en total: Producción Apiay, Producción Castilla, Planta de Proceso Apiay, Mantenimiento Apiay y Mantenimiento Castilla.

**3.2.4 Organigrama:** La Superintendencia de Operaciones Apiay está bajo la dirección del Superintendente, quien cuenta con el apoyo de las Unidades de Soporte Corporativo. En total el personal de planta directa laborando en los campos de la Superintendencia de Operaciones Apiay es de 165 funcionarios. En la Figura 3 se muestra el organigrama correspondiente

Figura 3. Organigrama



Fuente: Aplicación informática Gestión Integral de Personal GIP

**3.2.5 Negocios:** La Superintendencia de Operaciones Apiay (SOA) opera directamente las áreas Apiay y Castilla y adicionalmente administra en el esquema de producción bajo riesgo los Campos Valdivia-Almagro y Rancho Hermoso, desarrollando los siguientes negocios:

- **Hidrocarburos:** Relacionado con la producción de crudo y gas.
- **Productos Blancos:** Relacionado con los productos derivados del gas.
- **Refinación:** Relacionado principalmente con la producción de asfalto.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 4.1 PRINCIPALES FUENTES

La producción del campo Castilla se recibe en dos estaciones de recolección y tratamiento denominadas Castilla 1 y Castilla 2 en las cuales se realiza el proceso de tratamiento de los fluidos que en el año 2005 fue de aproximadamente 16.788.846 barriles de crudo y 40.218.441 barriles de agua, con promedio día de 45.997 barriles de crudo y 110.187 barriles de agua<sup>1</sup>. Los fluidos provenientes de los diferentes pozos a las estaciones Castilla 1 y 2 son mezclados en el múltiple de recibo dónde se adiciona un aditivo demulsificante que tiene como función romper la emulsión agua - aceite procedente de los pozos que se forma durante su viaje a través de los sistemas de levantamiento y recolección (tuberías y accesorios) - (Ver figura 4)

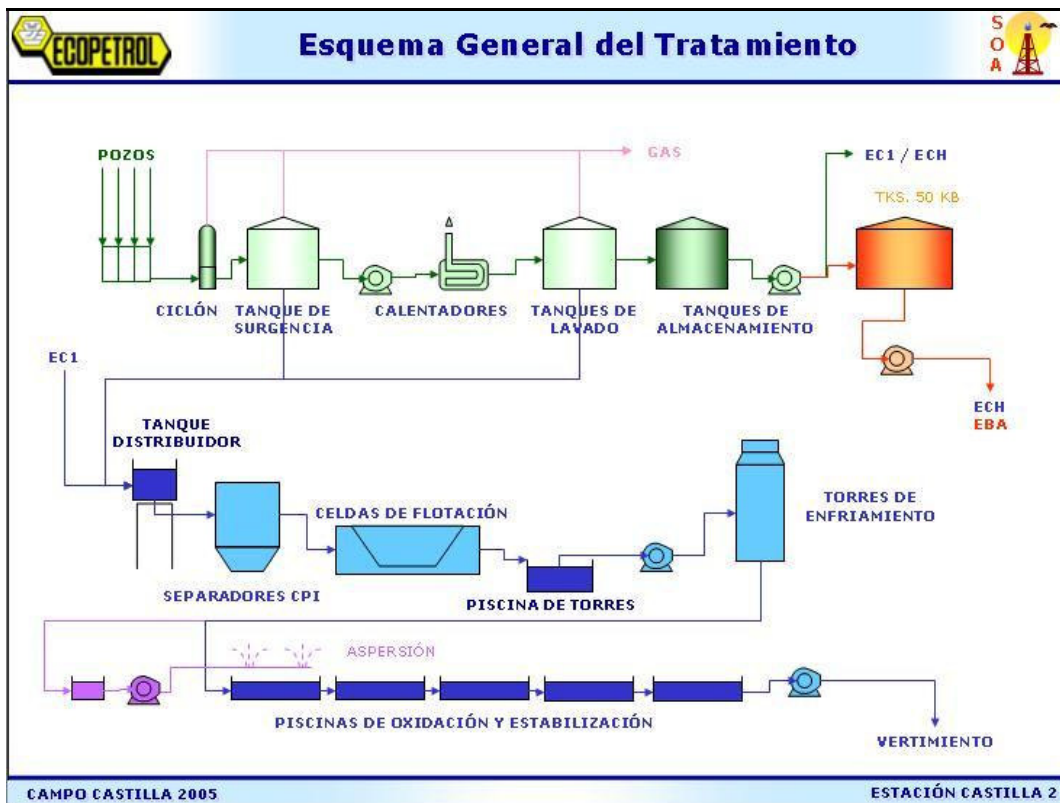
Los fluidos pasan del colector a los tanques de surgencia que tienen una capacidad de 3.600 barriles, con el objeto de retirar el agua libre que pasa posteriormente a los tanques de lavado con capacidad de 7.500 barriles. El crudo separado en los tanques de surgencia es calentado y transferido a los tanques de lavado, donde tiene el tiempo de residencia necesario para reducir el porcentaje de agua y sedimentos (BS&W) por debajo de 0.5%, límite máximo permitido.

El agua retirada en el proceso de la Estación Castilla 1 es transportada a la Estación Castilla 2 en donde se mezcla en la caja de entrada al sistema de tratamiento de agua con las corrientes de aguas aceitosas provenientes de los tanques de surgencia, los tanques de lavado y los drenajes de los tanques de almacenamiento de crudo de esta estación. Desde la caja de distribución, el agua aceitosa es transferida hacia la siguiente etapa del proceso, los separadores de placas corrugadas (CPI por sus siglas en inglés "*Coalescent Plate Interceptor*"). Estos CPI son los encargados de separar el aceite libre

en el agua y por precipitación los lodos aceitosos más pesados que el agua, debido a su contenido de sólidos.

Al salir del CPI al agua se le inyecta un aditivo coagulante para generar flóculos de aceite y sólidos antes de su ingreso a las celdas de flotación (WENCO), donde los flóculos flotan formando una nata en la superficie del recipiente siendo retirados mecánicamente mediante desnatadores rotatorios de espas.

**Figura 4. Esquema General de Tratamiento**



FUENTE: Departamento de Tratamiento Castilla

Teniendo en cuenta que el agua en ésta etapa del proceso (salida de las celdas de flotación) se encuentra a una temperatura superior a 80°C, se procede a reducir la temperatura por debajo de 38°C, (esta es la temperatura permitida por la corporación que

<sup>1</sup> Producción de crudo y agua año 2005 - Superintendencia de Operaciones Apiay. Feld View

da los permisos de vertimiento - CORMACARENA) en las torres de enfriamiento y las piscinas de aspersión. En la piscina de carga a las torres de enfriamiento se presenta una separación y acumulación de aceite en la superficie, sin ser ésta una función de dicha piscina, por lo cual se emplea una barrera y la remoción manual para evitar que la succión de las bombas arrastre dicho aceite hacia las torres. La salida de las torres de enfriamiento se reúnen en un canal inmediatamente antes de ingresar a la primera piscina de aspersión. Posteriormente, el agua pasa a través de la piscina de aspersión y luego por las piscinas de oxidación y estabilización, desembocando finalmente en un foso desde el cual es bombeado hacia el cuerpo receptor, el río Orotoy.

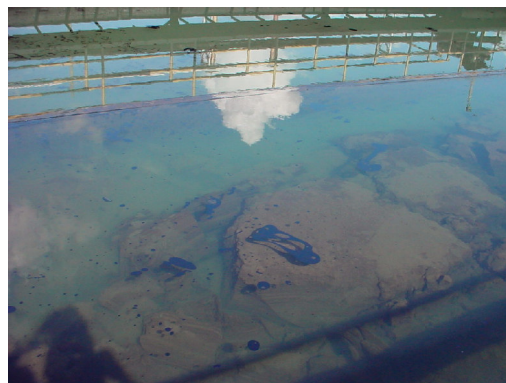
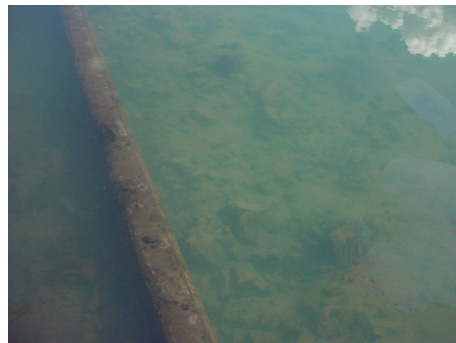
A lo largo del proceso de tratamiento del crudo descrito anteriormente, se generan los residuos que conforman los lodos aceitosos, por lo tanto se pueden definir como fuentes principales la limpieza de tanques de tratamiento de crudo, la operación y limpieza del sistema de tratamiento de agua, las piscinas API y equipos de proceso en las estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene y complementariamente los residuos generados en las contingencias que generen derrame de hidrocarburo. Los lodos son depositados en la piscina de acopio de Chichimene con capacidad de almacenamiento de 2.800 barriles, Castilla 2 con capacidad de almacenamiento de 5.000 barriles y las piscinas de acopio en el área denominada La Vara o zona de parqueo de Carro Tanques con capacidad de almacenamiento de 12.000 barriles en espera de obtener cantidades suficientes para su tratamiento. En la actualidad los lodos generados son tratados con Biorremediación, práctica ambiental eficiente para el tipo de residuo generado en el Área Apiay e igualmente utilizada pero con mayores exigencias en los lodos generados en el Área Castilla.

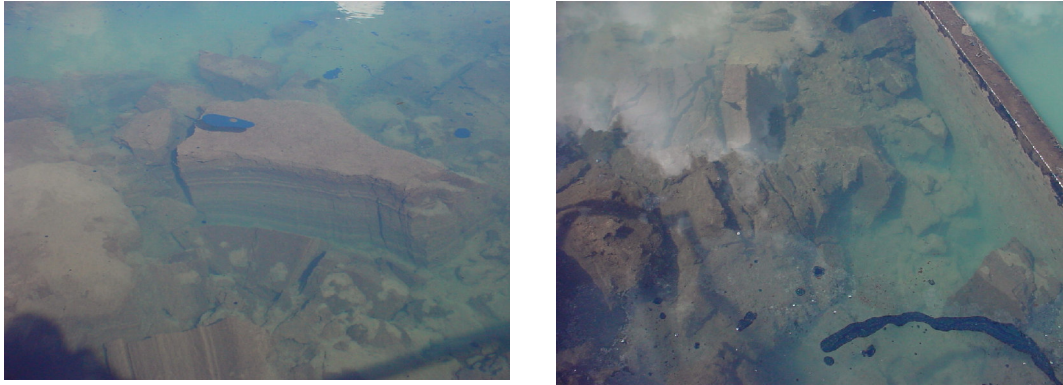
## **4.2 ANTECEDENTES**

Como resultado de la operación de tratamiento en las Estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene, se acumulan lodos en diferentes puntos del proceso.

**4.2.1 Lodos Provenientes del tratamiento de Chichimene:** En la piscina API de Chichimene se recibe el agua de tratamiento proveniente del sistema de lavado de la Estación. En el último mantenimiento realizado a la piscina en el mes de marzo de 2005, como parte de las obras de ampliación del STAP, se encontró que el nivel de lodos alcanzaba aproximadamente un metro de altura. Es importante destacar que la piscina API de chichimene fue limpiada 6 meses atrás, lo cual evidencia que el volumen de lodos en los tanques de tratamiento ha alcanzado un nivel de saturación que sobrepasa la capacidad de manejo de dichos tanques e inevitablemente están transfiriendo los lodos al sistema de piscinas. En las siguientes imágenes se muestra el estado del lodo dentro de la piscina API, en el nivel mínimo a que se puede reducir la altura del agua, sin formar emulsión.

**Foto 1. Estado de Lodos en la Piscina API Chichimene**





Estos lodos, fueron transportados a la primera piscina de estabilización hacia finales de diciembre de 2004. Una vez iniciado el proceso de deshidratación se dimensionó su volumen en 700 m<sup>3</sup>.

**4.2.2 Lodos Provenientes de la piscina de acopio de Castilla 2:** En la Estación Castilla 2 se encuentra una piscina de borras que se utiliza como único punto de recepción de material contaminado, debido a que la generación de estos residuos es permanente se busca adecuar un talud perimetral a la piscina para incrementar su capacidad. Actualmente se está utilizando un punto de acopio de material contaminado dentro de la estación 2, la piscina que inevitablemente se ha convertido en un área de movimiento de canecas y otros elementos para los cuales no se tienen las facilidades apropiadas.

**Foto 2. Vista lateral de piscina de borras en la Estación 2. Perfil con talud**



**Foto 3. Vista área cercana a la piscina de borras con canecas y otros materiales**



**Foto 4. Vista piscina**



**Foto 5. Vista nivel de fluido en la piscina de borras**



**4.2.3 Área de biorremediación La Vara:** Durante el 2004 se utilizó parte del área de parqueadero de los carrotanques para disponer de un material contaminado proveniente de las antiguas piscinas de la Estación 2. Esta acción representó sacrificar espacio

disponible para el parqueo de los carrotanques, razón por la cual, actualmente se puede observar el parqueo de los carrotanques alrededor de la vía, generando una situación insegura para el flujo de vehículos.

El material dispuesto en el área durante el 2004, fue biodegradado en un tiempo de 2 meses aproximadamente y actualmente se encuentra apto para su disposición en cualquier sitio; se estima que el área utilizada corresponde a 1 Ha, con una altura de 60 centímetros en promedio. Este ejemplo, muestra que en un periodo corto de tiempo es posible adelantar una acción de recuperación de material contaminado mediante biorremediación, de tal manera que quede en condiciones de ser reutilizado tal y como se muestra en las siguientes fotos.

**Foto 6. Área del parqueadero intervenida con material biodegradado**

**Vista de frente**



**Foto 7. Área del parqueadero intervenida con material biodegradado.**

**Vista Desde el fondo del área**



#### 4.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

**4.3.1 Diagnóstico Inicial:** Como resultado de la continua operación del sistema de tratamiento de fluidos en las estaciones de Castilla y Chichimene, se ha determinado que la formación de lodos en su interior es acelerada y se convierten en un evento recurrente, lo cual requiere de un mantenimiento periódico. Sin embargo, debido a la limitación en número de tanques en las estaciones y la condición de mantener al máximo la utilización de los equipos instalados, la idea de sacar un tanque de servicio para mantenimiento es poco práctica y su viabilidad se convierte en un factor crítico del proceso que conlleva a manejar periodos de producción diferida y alteraciones en la calidad de tratamiento de fluidos.

**Tabla 2. Diagnóstico sistema de tratamiento de lodos Campo Castilla**

ITEM	EVIDENCIA
<b>1. Composición del lodo</b>	Los lodos obtenidos son el resultado del tratamiento del agua y el mantenimiento de equipos de proceso. Aunque su principal base es crudo, el lodo contiene además residuos sólidos, residuos químicos y un alto contenido de agua. El Volumen estimado de agua de tratamiento, es de 150.000 bwpd.
<b>2. Punto de acopio</b>	Los lodos retirados de los equipos que se encuentran en mantenimiento, se acopian en piscinas ubicadas en las estaciones y parte se

	recircula a tanques de proceso. No existe un punto oficial de recibo de lodos. No existe área definida para bioremediación
<b>3. Mecanismos de acopio</b>	En el área no existe sistemas mecánicos para el acopio de lodos. Se utilizan bombas para retirarlos en la fuente y carrotanques para transportarlos a piscinas.
<b>4. Alistamiento</b>	No se dispone de un sistema que permita drenar los lodos para aumentar la concentración de sólidos.
<b>5. Tratamiento</b>	Aunque se tienen instalados lechos de secado, no se pueden utilizar de forma continua, debido a que no se dispone de un sitio para el acopio de los residuos resultantes.

**4.3.2 Limitaciones del sistema:** El campo Castilla ha centralizado el manejo del tratamiento de agua de producción en la Estación Castilla 2. Para tal efecto se han adecuado las instalaciones con diferentes equipos que permiten realizar el vertimiento del agua al río Orotoy en condiciones de calidad conforme a los requerimientos establecidos por las autoridades ambientales en el Decreto 1594 de 1984

Los equipos que componen la Planta de Tratamiento o STAP (Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción), son los siguientes:

- 4 CPI ( Corrugated Plate interceptor) con capacidad de 50.000 bwpd, c/u.
- 2 Depuradores, con capacidad de 100.000 bwpd c/u.
- 4 Lechos de Secado
- 1 Piscina de Enfriamiento, que sirve como succión para las bombas de las torres de enfriamiento.
- 5 Torres de enfriamiento, con capacidad de 35.000 bwpd, c/u.
- 1 Piscina de aspersion para 100.000 bwpd
- 4 Piscinas de Estabilización, con una capacidad conjugada de 150.000 bwpd.
- 3 Bombas de Vertimiento, dos con una capacidad conjunta de 150.000 bwpd y la tercera como respaldo.

De acuerdo con la Ingeniería de Detalle, el STAP fue construido de tal manera que los lodos y material sólido que se presentara en los CPI y Depuradores fueran recibidos en los lechos de secado, por ello, en este punto se debería realizar un mantenimiento periódico de remoción del material contaminado para ser transportado a un punto de acopio y bioremediado.

De esta manera, el campo Castilla inició la operación del STAP enviando los lodos producidos en los CPI y Depuradores a los Lechos de Secado. El resultado inmediato de esta acción fue la colmatación rápida de los lechos de secado, acumulando gran cantidad de agua y aceite en la parte superior de la arena filtrante (Ver Foto 8); Sin embargo, debido a la falta de un sitio de acopio de lodos en el área Castilla para bioremediación no es posible limpiar de manera continua los lechos de secado.

Teniendo en cuenta que la generación de lodos es permanente, que los lechos de secado se encuentran colmatados y que no hay un sitio de disposición de lodos en Castilla, ha sido necesario redefinir el sitio para su acopio; por esta razón, los lodos se están recirculando a los tanques de proceso (surgencia y de lavado), generando problemas de desestabilización de la interfase agua-aceite en dichos tanques así como la disminución de los tiempos de residencia para el tratamiento.

**Foto 8. Imagen de lecho de Secado colmatado**



Como consecuencia inmediata de esta acción, se retiró de servicio el Tanque de Lavado 205B, ya que la saturación de lodo generó el rebose del tanque manejando calidades superiores al 1% de BSW siendo el máximo permitido 0.5% de BSW.

#### **4.4 JUSTIFICACIÓN**

Por los antecedentes mencionados el Instituto Colombiano del Petróleo – ICP, se ha vinculado con la SOA y ha hecho acompañamiento en la búsqueda de alternativas de manejo de los lodos producidos en Castilla. Basados en su experiencia se realizó a inicios del año 2005 un acercamiento con esta entidad para abordar el tema, que debido al gran volumen de almacenamiento y generación de residuos requería de atención para evitar desviaciones y problemas posteriores con la autoridad ambiental

De acuerdo con este planteamiento, el ICP revisó el sistema actual de manejo de lodos con el fin de determinar la mejor alternativa para el aprovechamiento de estos desechos que contienen hidrocarburos y que pudieran ser recuperados y reutilizados en esta u otra industria, proponiendo a su vez el desarrollo de manera integral del tratamiento de este tipo de residuos.

El diagnóstico se realizó al sistema de tratamiento de lodos específicamente de la Estación Castilla 2, identificando oportunidades de mejora, planteando un esquema de operación complementario al actual que consiste en una unidad espesadora y la habilitación de lechos de secado eficientes que permitan incrementar la capacidad de tratamiento del sistema conforme a los volúmenes incrementales de producción.

Sin embargo, las conclusiones de dicho estudio apuntan hacia la reducción del volumen de lodos generados, dejando sin definición el tratamiento y disposición final que se le debe dar a los lodos que de cualquier forma seguirán generándose, por ello el siguiente trabajo explora estas alternativas.

## 5. REFERENCIA TEORICA Y LEGAL

### 5.1 MARCO TEORICO

**5.1.1 Biorremediación<sup>2</sup>:** Es el proceso en el que se emplean organismos biológicos para resolver problemas específicos [medioambientales](#), como la [contaminación](#). La biorremediación se puede emplear para atacar algunos contaminantes específicos, como los pesticidas clorados que son degradados por [bacterias](#), o bien, de forma más general como en el caso de los [derrames de petróleo](#) que se tratan empleando varias técnicas, incluyendo la adición de [fertilizantes](#) para facilitar la descomposición del [crudo](#) por las bacterias.

Al contrario de la [biodegradación](#) que se produce naturalmente, la biorremediación es un proceso iniciado por el hombre generalmente con el propósito de subsanar el medio ambiente.

Los llamados organismos “hidrocarburoclásticos” son bacterias y hongos capaces de degradar petróleo fisiológica y metabólicamente. Más de 100 especies de 30 géneros microbianos son capaces de usar hidrocarburos, como método de subsistencia. Los géneros de organismos hidrocarburoclásticos son: *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Vibrio*, *Candida*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Micrococcus*, *Arthrobacter*, *Achromobacter*, *Rhodococcus*, *Alcaligenes*, *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Rhodotorula* y *Sporobolomyces*. La fracción del total de organismos que metabolizan hidrocarburos es altamente variable, 6 a 82% para hongos terrestres, 0.13% a 50% para bacterias de la tierra y del 0.003% a 100% para bacterias marinas.

---

<sup>2</sup> [www.biorremediacion.org](http://www.biorremediacion.org)

En ecosistemas no contaminados, los microorganismos degradadores de hidrocarburos constituyen menos del 0.1% de la comunidad microbiana, mientras que en ecosistemas contaminados con hidrocarburos pueden constituir el 100% de la comunidad microbiana.

Las poblaciones dominantes en estas comunidades poseen características nutricionales relacionadas al contaminante y pueden ser también resistentes a muchas formas de estrés ambiental. Cuando la fuente de carbono es un substrato insoluble como un hidrocarburo, los microorganismos facilitan su difusión hacia la célula produciendo sustancias como carbohidratos, ácidos grasos, enzimas y biosurfactantes. Los microorganismos utilizan estos compuestos a manera de un *biofilm* alrededor de la molécula del hidrocarburo, para posteriormente ingerirlo o romperlo en compuestos simples de carbono y oxígeno. Estos microorganismos usan la energía liberada para manejar los procesos termodinámicamente no espontáneos como la síntesis de componentes celulares.

No es posible tratar todos los contaminantes mediante el uso de la biorremediación; por ejemplo, los metales pesados como el cadmio o el plomo no son absorbidos o captados fácilmente por los organismos. La introducción de metales como el mercurio en la cadena alimentaria puede empeorar las cosas, pues los organismos bioacumulan estos metales.

Sin embargo, hay una serie de ventajas en la biorremediación la cual se puede emplear en áreas a las que no se puede acceder fácilmente si no es mediante excavación. Por ejemplo, los derrames de gasolina pueden contaminar el agua subterránea. Introduciendo los organismos precisos, en conjunción con compuestos formadores de oxígeno se puede reducir significativamente la concentración en gasolina después de un determinado periodo de tiempo, esto es mucho menos caro que la excavación, seguida del enterramiento en otra parte o incineración, y reduce o elimina la necesidad de bombeo y tratamiento que es la práctica más normal en sitios en los que el agua subterránea está contaminada por gasolina.

En general, se necesitará la existencia de determinadas poblaciones de microorganismos autóctonos capaces de utilizar los hidrocarburos como fuente nutricional y de energía. A su vez, será necesario un determinado número de aceptores de electrones que enzimáticamente oxide los carbonos procedentes de los hidrocarburos, así como unas condiciones adecuadas de pH, nutrientes, temperatura, humedad, textura y estructura del suelo, y concentración de los contaminantes.

- **Factores que influyen en la biorremediación<sup>3</sup>**

Los factores que influyen en la resistencia de una molécula del hidrocarburo frente a la biodegradación pueden ser características propias de la molécula o condiciones presentes en el medio y se enuncian a continuación:

**- Factores propios de la molécula**

- En general cuando la estructura química de la sustancia es muy diferente a la de los compuestos presentes en el medio, la sustancia será menos biodegradable.
- Igualmente la presencia de dos o más substitutos en las cadenas de carbono, por ejemplo halógenos, grupos nitro o grupos metil, generan mayor resistencia de la sustancia a los microorganismos. Además la posición de los substitutos también afecta la capacidad de los microorganismos a degradar el compuesto orgánico.
- La baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica, también afectan la degradación de la molécula de hidrocarburo.

**- Factores ambientales:**

- Temperatura: : Los microorganismos se clasifican de acuerdo con el rango de temperatura dentro del cual pueden vivir y desarrollarse, por tanto la temperatura del medio puede inhibir la proliferación de el grupo de microorganismos capaces de degradar determinada molécula orgánica. Generalmente las especies

---

<sup>3</sup> Tomado y adaptado de: Bollag W.B. y Bollag J.M. (1992), "Biodegradation", en Encyclopedia of Microbiology, Volume 1, Academic Press, Inc. y [www.porquebiotecnologia.com](http://www.porquebiotecnologia.com)

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.

- La presencia de otras sustancias o la presencia en concentraciones muy altas del mismo compuesto orgánico a degradar, pueden resultar tóxicas para los microorganismos que realizan la degradación e inhibir su crecimiento.
- PH: 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. Así mismo el pH también afecta directamente en la solubilidad del fósforo y en el transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos del azufre.
- Humedad: Los microorganismos requieren unas condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como medio de transporte a través del cual los compuestos orgánicos y nutrientes son movilizados hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo. El rango varía en función de la técnica.
- Agentes de separación: 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. Por lo general suele haber en el suelo una concentración de nutrientes suficiente, sin embargo, si estos no se encontrasen en el rango normal se puede adicionar mayor cantidad al medio. El rango normal de C:N:P depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1.
- La disponibilidad del aceptor de electrones: Cuando la o las sustancias aceptoras no se encuentran disponibles o no son suficientes, se disminuye o no existe la degradación del compuesto orgánico. Por ejemplo si el aceptor de electrones es el oxígeno, en condiciones anaeróbicas la degradación es mínima o nula.

- Oxigenación: Debido a la aireación del suelo se va a favorecer la degradación de los hidrocarburos por dos motivos: por volatilización, facilitando la migración de la fase volátil de los contaminantes, y por biodegradación, ya que al incrementar la oxigenación del suelo se van a estimular la actividad bacteriana.
- Población bacteriana: Para los investigadores en geomicrobiología, es de gran interés conocer las relaciones existentes entre los microorganismos, los minerales y los contaminantes con el fin de encontrar microorganismos capaces de degradar, movilizar o secuestrar contaminantes. En el futuro, será importante estudiar cómo los microorganismos cambian la superficie de los minerales en un cierto plazo de tiempo. La ausencia o inhibición de alguno de los grupos de microorganismos que cooperan en la degradación de cierto compuesto, puede generar la persistencia del mismo en el medio. En el funcionamiento de los componentes del sistema algunos microorganismos se ven atraídos de forma específica por ciertos minerales, en consecuencia, se pueden obtener poblaciones bacterianas más eficaces en procesos de biorremediación. Lo realmente importante es establecer la relación mineral - población bacteriana, proporcionando además información sobre el metabolismo bacteriano.

- **Métodos de biorremediación<sup>4</sup>**

De manera básica los métodos de biorremediación se pueden dividir en dos tipos de tratamientos de acuerdo al lugar donde se realiza el proceso de degradación biológica del contaminante, en este caso el hidrocarburo:

**- Tratamientos in-situ**

- Adición de nutrientes en tierra: Consiste en promover el crecimiento y aumento de la población de microorganismos, nativos, capaces de degradar el hidrocarburo que contamina las zonas contaminadas, tales como playas, acantilados, riveras de

---

<sup>4</sup> Tomado y adaptado de: Miliarium Aureum, S.L. (2001, 2004). "Técnicas de limpieza", en: <http://www.miliarium.com/Monografias/MareasNegras/Tecnicas/Tecnicas.asp>

ríos, y lugares donde se han vertido o depositado los escapes de hidrocarburos. Esta labor se lleva a cabo fertilizando las zonas a tratar con productos que contienen nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y potasio, que generan un crecimiento más rápido de las comunidades microbianas. de los métodos de biorremediación, la acción de nutrientes ha sido el más estudiado, y actualmente se presenta como el de más factible aplicación para la mayoría de vertidos.

- Adición de nutrientes en el mar: Para casos de derrames en el mar o hundimientos de buques cisterna (p. ej. el caso del Buque *Prestige*) en donde no se pueden recuperar en su totalidad los hidrocarburos, se puede “fertilizar” los depósitos o las manchas de hidrocarburos con productos a base de nitrógeno, potasio y fósforo, con el objeto de fomentar el crecimiento y desarrollo de los microorganismos. Este método puede presentar problemas debido a las bajas temperaturas presentes en el mar, las cuales pueden inhibir el crecimiento de los microorganismos.
- Inoculación de microorganismos degradadores: Cuando en el sitio contaminado no existe o existe en muy baja cantidad, una población de microorganismos capaces de degradar el hidrocarburo, se pueden introducir cepas de microorganismos capaces de realizar dicha labor. Este procedimiento presenta limitantes en cuanto a que las condiciones del medio deben ser las adecuadas para determinada clase de cepas y en cuanto al posible desbalance en el ecosistema por la introducción de individuos foráneos o el aumento exagerado de una especie nativa.

### **- Tratamientos ex-situ**

El principio de funcionamiento es el mismo, es decir la degradación del hidrocarburo por la acción de los microorganismos, solo que en éste caso se realiza en sitios preparados y aislados de tal manera que se pueden controlar las cantidades de contaminantes a tratar, se evitan problemas de lixiviación de subproductos y se controlan, hasta cierto punto, las condiciones en las que se desarrolla el proceso. Estos tratamientos se conocen como *land farming*, ya que se hace un cultivo de microorganismos en el material contaminado o a una mezcla de suelo con el hidrocarburo recuperado.

Estos tratamientos a su vez se pueden dividir en las siguientes clases:

- Utilización de cepas nativas: Cuando en el medio donde se ubica el área de tratamiento, se identifican y se pueden separar microorganismos capaces de degradar el hidrocarburo a tratar, se pueden adicionar dichas cepas al material contaminado y realizar una adición de fertilizantes y otros elementos que permitan un crecimiento y desarrollo rápido de los microorganismos y por tanto un proceso de degradación mas completo y veloz, de los métodos de biorremediación, la acción de nutrientes ha sido el más estudiado.
- Inoculación de microorganismos: Cuando en el lugar de tratamiento no existen microorganismos capaces de degradar el combustible, se introducen cepas de dichos organismos. Este proceso también se acompaña de fertilización.

Tanto para los tratamientos in-situ como para los exsitu se pueden emplear microorganismos modificados genéticamente para degradar componentes de petróleo que no son degradados por microorganismos naturales. Su desarrollo supone un alto costo en investigación, ya que se deben hacer suficientes pruebas de efectividad y de no agresión al medio circundante.

**5.1.2 Tanques espesadores<sup>5</sup>:** En el tratamiento del crudo se generan una cantidad de residuos en donde se concentra la contaminación eliminada llamada lodos; Al retirarlos de los puntos de recolección (tanques de tratamiento, sistema de tratamiento de agua, piscinas API y equipos de proceso de las estaciones) se lleva dentro de ellos aceite y agua debido a que ocupan volúmenes importantes en estos puntos, por tanto es necesario reducir el volumen de los lodos mediante la eliminación parcial de esta agua y es a este proceso al que se le llama de espesamiento o espesado.

Los tipos de espesamiento más utilizados son:

- **Espesamiento por gravedad:** En este proceso los lodos son conducidos a un espesador, generalmente circular, por medio de tuberías. Tienen un diseño parecido al de

---

<sup>5</sup> [www.acsmedioambiente.com](http://www.acsmedioambiente.com)

un decantador y tiene un mecanismo giratorio con unas aspas de fondo para el barrido de los lodos y su conducción a un agujero situado en el centro desde donde se extraen más tarde.



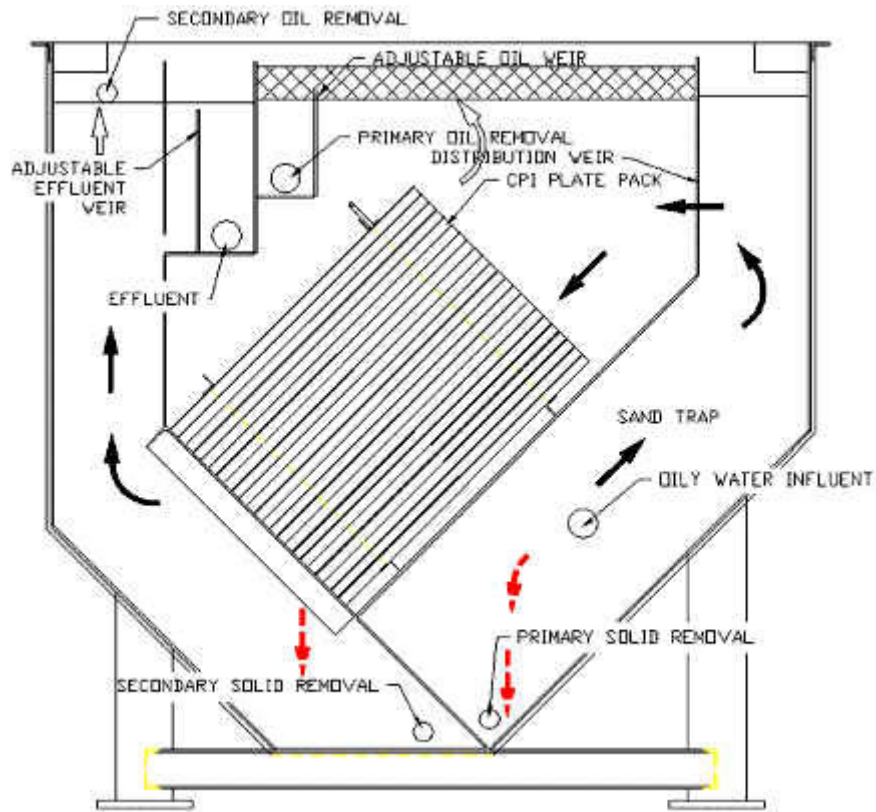
**Foto 9. Imagen de un tanque espesador**

En el espesador los lodos permanecen varias horas y en este tiempo se van depositando en el fondo del espesador, quedando por una parte agua y por otra los lodos que son extraídos por succión.

- **Espesamiento por flotación:** Cuando se introduce aire a presión en un líquido con cierto contenido de sólidos, parte de las burbujas se fijan a ellos y los hacen flotar, los lodos más pesados y que no se fijan a las burbujas tienden a sedimentar. Más tarde un rascador superficial se encarga de retirar los lodos que quedan flotando en el líquido. Los lodos sedimentados son recogidos por un rascador de fondo y conducidos hacia el centro del tanque, donde son absorbidos.

- **Espesamiento mediante métodos mecánicos:** Existen otros métodos mecánicos como centrifugas espesadoras, espesadores rotativos, etc. que se basan en los mismos métodos que la deshidratación mediante centrifugas.

**5.1.3 Separadores de placas corrugadas o CPI<sup>6</sup>:** Por su sigla en inglés *Coalescent Plate Interceptor*, es Separador de hidrocarburos y agua por gravedad, conformado por un sistema de placas corrugadas cuya función es separar el agua de los aceites permitiendo la recuperación de ambos en altos porcentajes. Por ruptura de moléculas en placas coalescentes, el aceite es llevado a la superficie por simple gravedad para ser removido; la capacidad de este tipo de equipos varía de 5 a 1,200 gpm.



**Figura 5. Separador de placas corrugadas**

Cuando el agua de desecho entra al Separador (*oily water influent*), la velocidad es reducida, permitiendo que los sólidos se precipiten al fondo a través de la trampa de arena (*Sand trap*) y las gotas de aceite suspendidas floten a la superficie. En seguida el efluente pasa por un amortiguador (*distribution weir*) que distribuye el flujo hacia las placas corrugadas coalescentes. Estas placas tienen la forma de un panal de abejas y logran

<sup>6</sup> www.ascmedioambiente.com

atrapar al aceite libre, cuando el tamaño de la partícula es lo suficientemente grande, lo dejan escapar hacia la superficie.

El aceite removido es llevado hacia el vertedero ajustable (*Adjustable oil weir*) por simple gravedad para ser retirado (*primary oil removal*). El agua que pasó por estas placas es enviada hacia la salida (*Effluent*). No sin antes ser forzado el paso para liberar el efluente de sólidos sedimentables y/o flotantes que hayan escapado al proceso. El vertedero del efluente es ajustable (*Adjustable effluent weir*) con el fin de manipularlo cada vez que exista la posibilidad de aceite en el agua ya tratada. Este aceite se descargará por la salida destinada (*Secondary oil removal*) y los lodos se descargan por efecto de vasos comunicantes por las salidas destinadas para ello (*Primary & secondary solid removal*)

Es muy importante resaltar que no contiene partes móviles, por lo cual es libre de mantenimiento y como opera por gravedad no requiere electricidad. Además, gracias a sus placas coalescentes, tienen un tiempo de retención de 3 a 10 minutos, otros equipos necesitan de 1 a 3 horas para lograr a misma capacidad de remoción.

**5.1.4 Lechos de Secado<sup>7</sup>:** Son dispositivos que eliminan una cantidad de agua suficiente de lodos para que puedan ser manejados como material sólido. Los lechos de secado corresponden a un tratamiento físico de separación cuya selección de sistema de deshidratación dependerá de:

- Las características del lodo (viscosidad, densidad, origen)
- Espacio disponible en el sitio de tratamiento
- Contenido de humedad requerido para la disposición final o tratamiento

Existen diferentes tipos de lechos de secado:

---

<sup>7</sup> [www.ambiente-ecologico.com](http://www.ambiente-ecologico.com)

- Convencionales de arena: El secado ocurre por drenaje y evaporación colocando el lodo sobre una cama de arena equipada con un sistema de drenaje.
- Pavimentados: El secado ocurre por drenaje y evaporación colocando el lodo sobre firmes de concreto o asfalto equipados con un sistema de drenaje
- Empacados
- Auxiliados por vacío

Los lechos, eras o canchas de secado son el método de deshidratación de lodo más empleado. Los lechos de secado se suelen utilizar, normalmente, para la deshidratación de lodos digeridos. Una vez seco, el lodo se retira y se evacúa a vertederos controlados o se utiliza como acondicionador de suelos

En un lecho de secado convencional de arena, el lodo se extiende sobre la misma, formando una capa con un espesor determinado y se deja secar. El lodo se deshidrata por drenaje a través de la masa de lodo y de arena, y por evaporación desde la superficie expuesta al aire. La mayor parte del agua se extrae por drenaje, razón por la cual es fundamental disponer de un sistema de drenaje adecuado. Los lechos de secado están equipados con tuberías de drenaje lateral (tuberías de gres con las juntas abiertas, o tuberías de plástico perforadas), dispuestas con pendientes. Estos conductos deben colocarse adecuadamente y cubrirse con grava gruesa o piedra machacada.

El lecho de arena debe contemplar el espesor determinado, con un cierto espesor adicional para compensar las pérdidas que se puedan producir durante las operaciones de limpieza.

El lodo se puede extraer de las canchas después de que se haya secado y drenado suficientemente para ser paleable. El lodo seco posee una textura gruesa y agrietada y es de color negro o marrón oscuro. El contenido de humedad, después de 10 a 15 días en condiciones favorables, es del orden del 60%. La extracción del lodo se realiza manualmente con palas, carretillas o camiones, o mediante una pala rascadora o cargador frontal.

Las principales ventajas de los lechos de secado son su bajo costo, el escaso mantenimiento que precisan y el elevado contenido en sólidos del producto final. El tiempo de secado puede ser de días o semanas, de acuerdo con el clima.

**5.1.5 Mezclas asfálticas<sup>8</sup>:** Reciben igualmente el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico (hidrocarbonato o hidrocarburo), de manera que los agregados quedan cubiertos por una película continua de dicho ligante y luego son sometidos a compactación. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de las vías para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (*filler*) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

En muchas ocasiones, el proyecto de una mezcla asfáltica se reduce a determinar su contenido de ligante, sin embargo, esa es solo la última fase de un proceso más amplio que requiere de un estudio cuidadoso de todos los factores involucrados, a fin de garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla y un considerable ahorro económico en la solución.

- **Diseño de mezclas asfálticas:** El diseño se centra en la medición de esfuerzo a la penetración de temperatura y velocidad controlada que se presentan en probetas de

---

<sup>8</sup> [www.vialidad.cl](http://www.vialidad.cl)

mezcla asfáltica que están abiertas fabricadas con distintos contenidos de ligante, considerando que la mezcla óptima es aquella que presenta el valor máximo de esfuerzo a la penetración.

Las fases de las que consta el proyecto de diseño de una mezcla son las siguientes:

- a) Análisis de las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc.), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de las capas subyacentes, intensidad del tráfico pesado, clima, humedad del ambiente etc. Asimismo, hay que distinguir si se trata de una pavimentación nueva o de una rehabilitación.
- b) Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar. Debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, entre otras.
- c) Elección del tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, incorporando en este análisis las consideraciones económicas o de puesta en obra que haya que considerar.
- d) Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con determinadas especificaciones, pero que en general serán los disponibles en un radio limitado y, por lo tanto, a un costo razonable. Así mismo, hay que elegir el polvo mineral de aportación.
- e) Elección del tipo de ligante: asfalto, asfalto modificado, emulsión asfáltica, el costo es siempre un factor muy relevante.
- f) Dosificación o determinación del contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que las granulometrías conjuntas analizadas estén dentro de un uso previamente seleccionado.
- g) Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: Exigencias de seguridad vial, Estructura de pavimento, Técnicas de Diseño y Ejecución, Sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo

de lluvias trazado de la vía, entre otros), Condiciones de drenaje, Consideraciones económicas.

Para realizar el proyecto de una mezcla asfáltica que se empleará en un determinado pavimento existe una gama amplia de posibles soluciones, para esto se hace necesario un estudio muy riguroso y detenido, para elegir el diseño más adecuado técnica y económicamente.

## **5.2 MARCO LEGAL**

### **5.2.1. Residuos peligrosos**

Son las sustancias que son inflamables, corrosivas, tóxicas o pueden producir reacciones químicas, cuando están en concentraciones que pueden ser peligrosas para la salud o para el ambiente.

El impacto negativo de estas sustancias se ve agravado cuando son difíciles de degradar en la naturaleza. Los ecosistemas naturales están muy bien preparados, por millones de años de evolución, para asimilar y degradar las sustancias naturales. Siempre hay algún tipo de microorganismo o de proceso bioquímico que introduce en los ciclos de los elementos las moléculas. Pero en la actualidad se sintetizan miles de productos que nunca habían existido antes y algunos de ellos, como es el caso de los CFC, DDT, muchos plásticos, etc. permanecen muchos años antes de ser eliminados. Además al salir tantas moléculas nuevas cada año, aunque se hacen ensayos cuidadosos para asegurar que se conocen bien sus características, no siempre se sabe bien que puede suceder con ellos a medio o largo plazo.

Otro hecho que aumenta el daño es la bioacumulación que se produce en sustancias, como algunos pesticidas del grupo del DDT. En otras ocasiones los residuos se transforman en sustancias más tóxicas que ellos mismos

En éste sentido el Decreto Supremo N° 745, de junio de 1993, del Ministerio de Salud de Chile, señala en su título II, párrafo III, que:

“... se entiende por residuos peligrosos los siguientes, sin perjuicio de otros que pueda calificar la autoridad sanitaria: antimonio, arsénico, asbesto, berilio, bifenilos polibromados, bifenilos policlorados, cadmio, cianuros orgánicos e inorgánicos, compuestos de cobre, compuestos de cromo hexavalente, compuestos de zinc, compuestos inorgánicos de flúor (excepto fluoruro cálcico), compuestos orgánicos de fósforos, dibenzoparadióximas policloradas, dibenzofuranos policlorados, desechos clínicos, éteres, fenoles, medicamentos y productos farmacéuticos, mercurio, metales carbonilos, nitratos y nitritos, plomo y sus compuestos, productos químicos para tratamiento de la madera, selenio, soluciones ácidas o ácidos en forma sólida, soluciones básicas corrosivas, sustancias explosivas, sustancias infecciosas, sustancias inflamables, talio y telurio”<sup>9</sup>.

Y según la Unión Europea, los Residuos tóxicos y peligrosos son los que contienen en determinadas concentraciones<sup>2</sup>:

- As, Cd, Be, Pb, Se, Te, Hg, Sb y sus compuestos
- Compuestos de cobre solubles
- Fenol, éteres, solventes orgánicos, hidrocarburos policíclicos aromáticos cancerígenos
- Isocianatos, cianuros orgánicos e inorgánicos
- Biocidas y compuestos fito farmacéuticos
- Compuestos farmacéuticos
- Polvo y fibras de asbesto

---

<sup>9</sup> Tomado de: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL MEDIO AMBIENTE, Residuos Industriales, en: <http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/13Residu/120ResInd.htm#POBLACION>

- Peróxidos, cloratos y percloratos
- Carbonilos de metales
- Ácidos y bases usados en el tratamiento de metales
- Compuestos de cromo hexavalente
- Organohalogenados no inertes
- Alquitranes
- Materiales químicos de laboratorio no identificados o nuevos compuestos de efectos ambientales no conocidos

En la legislación española se añaden a esta lista:

- Talio y sus compuestos
- Los residuos procedentes de la industria del dióxido de titanio

Los aceites usados minerales o sintéticos, incluyendo las mezclas agua-aceite y las emulsiones

En Estados Unidos <sup>10</sup>, se define un residuo como peligroso si presenta cualquiera de las siguientes características:

- Corrosión, residuos altamente ácidos o alcalinos.
- Inflamabilidad, residuos de fácil combustión que ofrecen riesgo de incendio con manipulación normal.
- Reactividad, residuos con potencial de reacciones súbitas, como explosión, que pueden generar daño.
- Toxicidad, residuos que pueden desprender concentraciones importantes de sustancias específicas en el agua.

De esa forma las regulaciones federales de los Estados Unidos, dadas por la Agencia de Protección Medioambiental (EPA por sus siglas en inglés) proponen cuatro listas, de

---

<sup>10</sup> LaGrega M. D., Buckingham P.L., Evans J.C., 1996. Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. McGraw-Hill/ Interamericana de España S.A., Madrid, España, 1996.

residuos considerados peligrosos. La primera lista contiene los residuos peligrosos de procedencia específica, generados en procesos característicos de ciertos grupos de industrias; existen alrededor de 100 productos de éste tipo, conocidos como residuos tipo K, cuyo denominador común es la toxicidad; entre estos se encuentran los sedimentos de separación API, de la industria de refinería petrolera, así como algunos residuos de la industria de pesticidas, de la industria del acero ó del tratamiento de aguas residuales de procesos de preservación de la madera, entre otros. Además existen otras tres listas de la EPA, los residuos tipo F que agrupa los que no tienen una procedencia específica, que se generan en procesos de diferentes industrias y que resultan ser tóxicos. Por otro lado están los residuos denominados P y U, que relacionan productos químicos de índole comercial, los cuales se consideran tóxicos cuando son descartados en forma esencialmente pura, incluyendo los productos cuya composición no corresponde a la estipulada (descartes de producción), así como los residuos de contenedores y vertidos.

Otras naciones poseen listas que incluyen sustancias químicas, tanto específicas como por tipos, donde se indica el peligro para la salud humana y para el medio ambiente. En dichas listas se indica la concentración que al ser superada hace que el residuo se convierta en peligroso, sin embargo teniendo en cuenta el gran número de sustancias químicas que pueden convertirse en peligrosas éste tipo de métodos reguladores tiende a ser problemática.

De otro lado algunos autores han propuesto alternativas para definir y clasificar los residuos tóxicos, teniendo en cuenta el concepto de grado de peligrosidad, el cual analiza individualmente las sustancias, su concentración y su movilidad, así como factores específicos del lugar. Sin embargo estas propuestas no son prácticas y aunque describe la sustancia misma, no incluye carácter las concentraciones ni todas las cualidades físicas o químicas de importancia, información sin la cual es prácticamente imposible analizar el tratamiento, el potencial de reciclaje o su destino probable en caso de ser liberado en el medio.

Otra alternativa del sistema regulador de clasificación, consiste en ordenar los residuos de acuerdo con la siguiente jerarquía:

1. Según su forma o fase de distribución (líquida o sólida).
2. Según si son orgánicos o inorgánicos.
3. Según su categoría química (por ejemplo disolventes, metales pesados etc.)
4. Según los componentes peligrosos que afecten a su tratamiento (como el caso del Cromo Hexavalente).

Este sistema es simple y eficaz por ejemplo para agrupar residuos con características físicas y químicas similares y requisitos generales de tratamiento. De esta manera los residuos aceitosos que se tratan en el presente documento, se pueden ubicar dentro de dos tipos básicos de residuos (Tabla 3), de un sistema presentado en LaGrega, Buckingham, Evans, (op.cit), empelado para varias investigaciones estatales (de Estados Unidos) para especificar la necesidad de nuevos tratamientos para residuos tóxicos y para instalaciones de almacenamiento:

### 3.3 Tabla 3. Tipos de residuos aceitosos

<b>Categoría principal</b>	<b>Características</b>	<b>Ejemplos</b>
Aceites	Residuo líquido compuesto principalmente por aceites derivados del petróleo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aceites lubricantes utilizados en motores de combustión interna.</li> <li>- Aceites hidráulicos y de turbina de equipos pesados.</li> <li>- Aceites combustibles contaminados. Etc.</li> </ul>
Lodos y sólidos orgánicos	Alquitranes, lodos, sólidos, u otros residuos no líquidos mezclados con sustancias orgánicas peligrosas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lodos de operaciones de pintura.</li> <li>- Residuos de alquitrán de fabricación de colorantes intermedios.</li> <li>- Alquitranes procedentes de la destilación procedentes de la producción de fenoles.</li> <li>- Suelos contaminados con disolventes.</li> <li>- Sólidos residuales de emulsión aceitosa.</li> </ul>

Extractado de: LaGrega, Buckingham, Evans, 1996.

Las anteriores clasificaciones para residuos peligrosos donde se incluyen como tales a los residuos aceitosos, están de acuerdo con el texto del Convenio de Basilea <sup>11</sup>.

### **5.2.2. Legislación en Colombia**

En un campo petrolero como Castilla, la actividad de producción de crudo está ligada a los procesos de tratamiento del mismo y del agua extraída del yacimiento junto con el crudo, donde los residuos generados en este proceso forman los lodos que por tratarse de un residuo peligroso convierte a ECOPETROL S.A en responsable de su disposición final según la Ley 430 de 1998 que en su artículo primero dice: “La presente ley tendrá como objeto, regular todo lo relacionado con la prohibición de introducir desechos peligrosos al territorio nacional, en cualquier modalidad según lo establecido en el Convenio de Basilea y sus anexos, y con la responsabilidad por el manejo integral de los generados en el país y en el proceso de producción, gestión y manejo de los mismos” y de igual manera los Capítulos II y III de esta Ley.

La reglamentación ambiental en lo que respecta a vertimiento de aguas residuales es cada vez más exigente e incluye la eliminación de nutrientes y la máxima reducción de los compuestos orgánicos. Cuando se pretenda reutilizar el agua residual, las normas de calidad incluyen en la mayoría de los casos la obligación de eliminar compuestos orgánicos de carácter refractario, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos.

Las normas de calidad de los tratamientos secundarios de las aguas residuales están relacionadas con la eliminación de la materia orgánica biodegradable, sólidos en suspensión y organismos patógenos.

---

<sup>11</sup> “Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios del 22 de marzo 1989”, en: <http://www.basel.int/text/textspan.html>

La calidad del agua esta relacionada con la presencia de sustancias o compuestos extraños que no existen normalmente en el agua pura y las normas de calidad para aguas son los límites establecidos para controlar la cantidad de dichas sustancias presentes en las diferentes corrientes.

El departamento del Meta además del petróleo, basa su economía en la agricultura, la ganadería y en menor escala en la pesca. Estas actividades dependen de las diferentes fuentes de agua conformadas principalmente por los ríos que bañan esta región ,y, en el caso específico del campo Castilla las aguas tratadas se vierten en el río Orotoy.

Con el fin de reducir al máximo la afectación que pueda causar al ecosistema de la región y a la microeconomía del departamento, el vertimiento de las aguas residuales obtenidas en el proceso de producción de la estación Castilla 2, es necesario implementar un óptimo sistema de tratamiento de las aguas de producción en esta estación, antes de realizar el vertimiento de aproximadamente 150.000 barriles por día de agua al río.

El Decreto 1594 del 26 de junio de 1984 contiene las pautas mediante las cuales el Gobierno de Colombia, por intermedio del Ministerio de Salud Pública y regionalmente a través de Entidades encargadas del manejo y administración del recurso (EMAR), el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT) en los distritos de riego y las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), controlan la calidad de las aguas y los residuos líquidos para evitar la contaminación y los malos manejos de los mismos. En esta norma se establecen los parámetros para el control de la calidad de las aguas, teniendo en cuenta el uso o destinación que tiene el cuerpo receptor.

En lo que respecta al impacto que genera la industria del petroleo en Colombia y en el caso la Superintendencia de Operaciones Apiay, se encuentra en mejoramiento continuo y cumplimiento de la legislación nacional apoyados en el Sistema de Gestión Ambiental - ISO 14000 certificado por primera vez en el año 2003 en donde un principio fundamental

en la producción y gestión de los residuos tóxicos y peligrosos es garantizar la protección de la salud humana, la defensa del medio ambiente y la preservación de los recursos naturales.

Según la legislación Colombiana y debido a que los lodos aceitosos están declarados como residuo peligroso aplica para la gestión de este desecho la siguiente normatividad<sup>12</sup>:

LEY 9 DE 1979

- **ARTICULO 31.** Quienes produzcan basuras con características especiales, en los términos que señale el Ministerio de Salud, serán responsables de su recolección, transporte y disposición final

DECRETO 2811 DE 1974

- **ARTICULO 1o.** El ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social.
- **ARTICULO 32.** Para prevenir deterioro ambiental o daño en la salud del hombre y de los demás seres vivientes, se establecerán requisitos y condiciones para la importación, la fabricación, el transporte, el almacenamiento, la comercialización, el manejo, el empleo o la disposición de sustancias y productos tóxicos o peligrosos.
- **ARTICULO 34.** En el manejo de residuos, basuras, desechos y desperdicios, se observarán las siguientes reglas:

---

<sup>12</sup> [www.suratep.com](http://www.suratep.com)

a). Se utilizarán los mejores métodos, de acuerdo con los avances de la ciencia y la tecnología, para la recolección, tratamiento, procesamiento o disposición final de residuos, basuras, desperdicios y, en general, de desechos de cualquier clase;

b). La investigación científica y técnica se fomentará para:

1). Desarrollar los métodos más adecuados para la defensa del ambiente, del hombre y de los demás seres vivos.

2). Reintegrar al proceso natural y económico los desperdicios sólidos, líquidos y gaseosos, provenientes de industrias, actividades domésticas o de núcleos humanos en general.

3). Sustituir la producción o importación de productos de difícil eliminación o reincorporación al proceso productivo.

4). Perfeccionar y desarrollar nuevos métodos para el tratamiento, recolección, depósito y disposición final de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos no susceptibles de nueva utilización.

5). Se señalarán medios adecuados para eliminar y controlar los focos productores del mal olor.

- **ARTICULO 35.** Se prohíbe descargar, sin autorización, los residuos, basuras y desperdicios, y, en general, de desechos que deterioren los suelos o, causen daño o molestia a individuos o núcleos humanos.

Y complementariamente la resolución 2309 de 1986, la resolución 295 de 2003 y el decreto 321 de 1999, entre otros.

## 6. CARACTERIZACION DEL PRODUCTO

### 6.1 OBTENCIÓN Y USO<sup>13</sup>

El crudo castilla es una mezcla de hidrocarburos pesados mientras que el crudo apiay es un crudo que varía entre intermedio y liviano lo que lo hace más fácil de tratar.

El crudo de Castilla es una mezcla de hidrocarburos pesados resultante del proceso de tratamiento del petróleo y agua que se extrae de los campos Castilla, Castilla Norte y Castilla Este en el Departamento del Meta. Normalmente el destino del crudo Castilla es como materia prima de los procesos de refinación, especialmente en corridas que se requiera la obtención de asfaltos debido al alto contenido de asfaltenos presente en este crudo (hasta un 20%). Con algunas restricciones, puede ser utilizado directamente como ligante asfáltico para la pavimentación de vías secundarias y terciarias. Se emplea como sustituto de los asfaltos líquidos tradicionales en riegos de imprimación, estabilización de bases sub-bases, reciclaje de pavimentos y capas de rodadura. Otras aplicaciones incluyen estabilización de afirmados, parcheos, bordillos, andenes y vías peatonales, canchas deportivas, etc. Con mayor restricción, puede ser utilizado como combustible industrial en hornos, secadores y calderas diluido con otros productos pesados o emulsionado con agua de acuerdo con procesos que son objeto de investigación.

Dentro de un sistema de tratamiento integral de lodos aceitosos, se ha planteado la segregación de los mismos de acuerdo a los diferentes procesos donde son generados para desarrollar diferentes metodologías de tratamiento. Un primer paso de tratamiento es el espesamiento de lodos provenientes de las unidades CPI, este proceso se realiza en unos tanques de lecho cónico que permiten la sedimentación de los sólidos contenidos en el lodo, aumentando la concentración de dichos sólidos.

---

<sup>13</sup> Ficha Técnica Crudo Castilla – Documento de Ingeniería SOA

Posteriormente, los lodos se pueden verter sobre un lecho de secado y filtrado que como su nombre lo indica permite eliminar gran cantidad de agua contenida en ellos mediante evaporación y filtrado de la misma a través de un medio poroso compuesto por arenas y gravas de diferentes tamaños.

Las estrategias de disposición final de lodos contempladas actualmente son la utilización como ligantes en mezclas asfálticas y la biorremediación. Los lodos secos pueden emplearse como ligantes en mezclas asfálticas en pavimentos de vías secundarias y terciarias, para lo cual en el país ya se han realizado algunos ensayos de laboratorio de materiales.

## **6.2 CARACTERIZACION DEL CRUDO CASTILLA**

El Crudo de Castilla es un asfalto líquido natural que contiene 83% de cemento asfáltico y 17% de solventes de diferente volatilidad. Esta composición hace que a temperaturas inferiores a 190 °F sea altamente viscoso. El punto de llama del Crudo de Castilla es de 141,8 °F y el punto de combustión de 195,8 °F. Su poder calorífico es 150.000 BTU/gl, su densidad es 60.24 lb/ft<sup>3</sup>. Estos valores indican que se deben tener algunas precauciones para su manejo.

6.2.1 Condiciones de Seguridad<sup>13</sup>: La NFPA (National Fire Protection Association), una entidad internacional voluntaria creada para promover la protección y prevención contra el fuego es ampliamente conocida por sus estándares (National Fire Codes), a través de los cuales recomienda prácticas seguras desarrolladas por personal experto en el control de incendios. La norma NFPA 704 es el código que explica el diamante del fuego, utilizado para comunicar los peligros de los materiales, para el crudo castilla sus características están descritas en la Tabla 4.

Se clasifica como líquido combustible Clase II de acuerdo con la Norma 321 de la NFPA, lo que significa que puede sufrir ebullición desbordante ( Boil Over)

---

<sup>13</sup> Ficha de seguridad crudo Castilla – Documento DRI SOA

**Tabla 4. Diamante del Fuego - Crudo Castilla**

<b>Riesgo de inflamabilidad</b>	<b>2</b>	<b>Riesgo para la salud</b>	<b>0</b>
<b>Riesgo de reactividad</b>	<b>0</b>	<b>Riesgo especiales</b>	<b>0</b>

**Fuente:** Superintendencia de Operaciones Apiay - DRI

**6.2.2 Datos Físico Químicos:** Para los diseños de plantas de almacenamiento, tuberías, llenaderos, etc, deben tenerse en cuenta las normas NFPA para el almacenamiento y protección contra incendio, API ( *American Petroleum Institute*) y las reglamentaciones expedidas por el Ministerio de minas y Energía. Para su manejo deben conectarse a tierra los camiones de cargue y descargue del producto, las tuberías, las bombas y los tanques.

**Tabla 5. Datos Físico Químicos – Crudo Castilla**

<b>Inflamable:</b>	SI	<b>Explosivo:</b>	NO
<b>Oxidante:</b>	NO	<b>Corrosivo:</b>	NO
<b>Tóxico:</b>	SI	<b>Asfixiante:</b>	NO
<b>Irritante:</b>	SI	<b>Radiactivo:</b>	NO
<b>Estado Físico:</b>	LIQUIDO	<b>Azufre (%W):</b>	2.231%
<b>Gravedad API (15 °C):</b>	13.5 °API	<b>Densidad (15°C):</b>	0.9749 gr / cm3
<b>Saturados (%w)</b>	25.9 %	<b>Resinas (%w)</b>	14.7 %
<b>Aromáticos (%w)</b>	46.0 %	<b>Asfaltenos (%w)</b>	13.5 %
<b>Punto de fluidez:</b>	-9 °C	<b>Punto inicial de ebullición (1 atm):</b>	38.2 °C
<b>Presión de vapor (20 °C):</b>	0.7 psig	<b>Estable</b>	SI

**Fuente:** Superintendencia de Operaciones Apiay - Departamento de Yacimientos

**6.2.3 Propiedades del Petróleo:** Debido a su alta Viscosidad, se recomienda el uso de bombas de desplazamiento positivo. Hay que tener precaución en su manejo a temperaturas superiores a 90°C. Aunque su contenido de agua es bajo, debe drenarse periódicamente.

**Tabla 6. Propiedades del Petróleo**

PROPIEDAD	UNIDADES	K-2
Tipo		Asfáltico "Black Oil"
Factor Volumétrico del Aceite (Bo)	Res bbl/ STB	1,061
Gravedad Especifica del Gas		0,986
Gravedad Especifica del petróleo		0,97
Viscosidad a Py	Cp	41,2
Temperatura del Yacimiento (Ty)	°F	198
Presión Original del Yacimiento @ 5600	PSI	2.830
Presión de Burbuja (Pb)	PSI	143

Fuente: Superintendencia de Operaciones Apiay - Departamento de Yacimientos

**Tabla 7. Caracterización de Crudo y Gas**

Componente	Petróleo Muestra de Fondo	Gas Muestra de Separador
	Fracc. Molar [ % ]	Fracc.Molar [ % ]
Nitrogeno	0.18	3.04
Dioxido de carbono	0.08	5.89
Metano	1.04	30.43
Etano	0.79	9.27
Propano	1.05	14.11
iso-Butano	0.68	6.74
n-Butano	1.61	12.29
iso-Pentano	0.58	6.28
n-Pentano	1.96	5.28
Hexano	2.86	3.78
Heptanos plus	89.17	2.54
<b>Totales</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Superintendencia de Operaciones Apiay - Departamento de Yacimientos

### 6.3 CARACTERIZACION DEL LODO

El Instituto Colombiano de Petroleos - ICP ha adelantando pruebas de laboratorio con el objetivo de analizar el tipo de residuo generado de acuerdo a las caracterizaciones existentes con muestras de lodos obtenidas en el área de Castilla, para simular el comportamiento en los lechos de secado. Las pruebas se realizaron variando la carga de lodo en los lechos de filtrado, representada por la altura de la muestra. Se experimentó con cargas de 0.74 Kg, 0.96 kg y 1.48 Kg evaluando a los 100, 247 y 1295 minutos después de iniciado el ensayo<sup>14</sup>.

**6.3.1 Esquema del Espesador de Lodos:** Dentro de las pruebas pilotos realizadas para dimensionar el sistema de espesamiento de castilla 2 se diseñaron lechos de filtrado con las siguientes características:

- Diámetro : 14 cm
- Altura de arena gruesa 3,8 cm
- Altura arena media 5 cm
- Altura arena fina 7,6 cm
- El tubo de desfogue usado fue de 1/4"

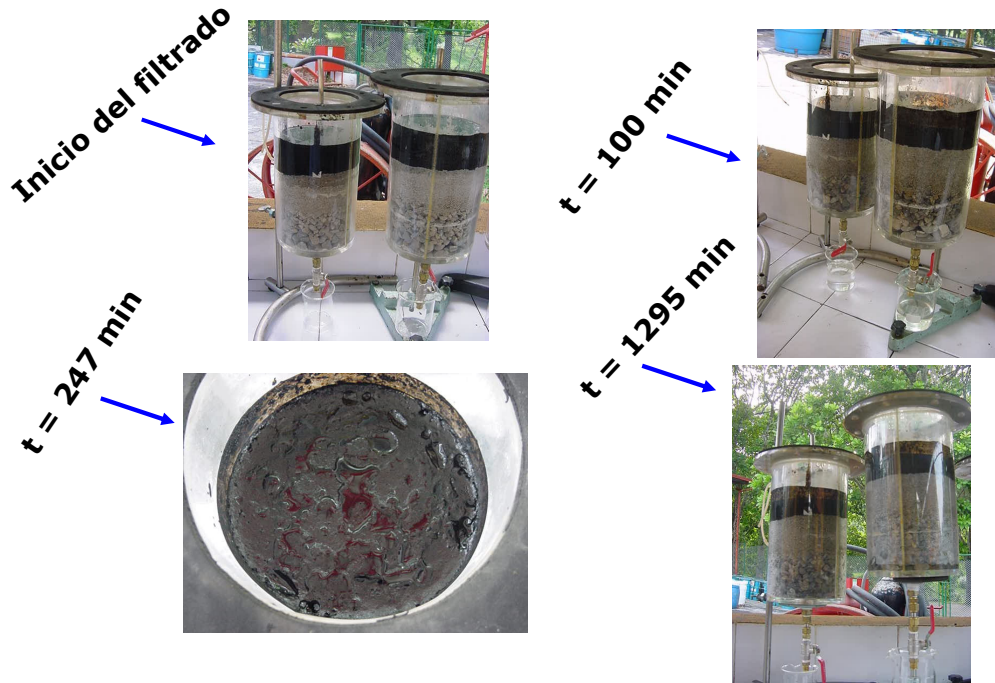
**7Foto 10. Lecho de filtrado para pruebas**



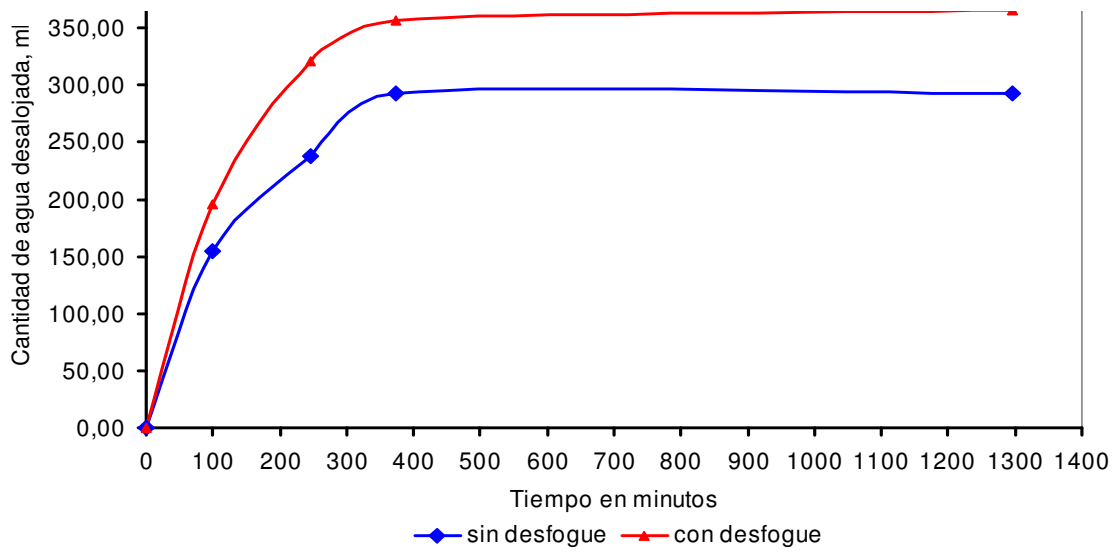
<sup>14</sup> Fuente: Informe presentado por el ICP, referente a pruebas de laboratorio sobre el espesamiento, secado y disposición de lodos producidos en Castilla.

- Lecho de filtrado con una carga de lodo de 0.74 Kg - Equivalente a una altura de 2"

Foto 11. Drenaje con carga de 0.74 Kg

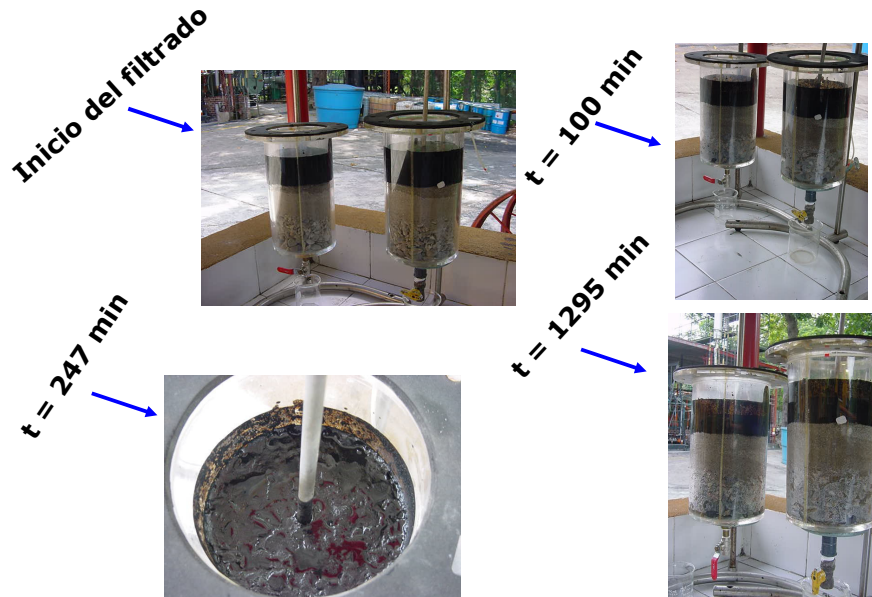


Gráfica 1. Comportamiento de drenaje con carga de 0.74 Kg

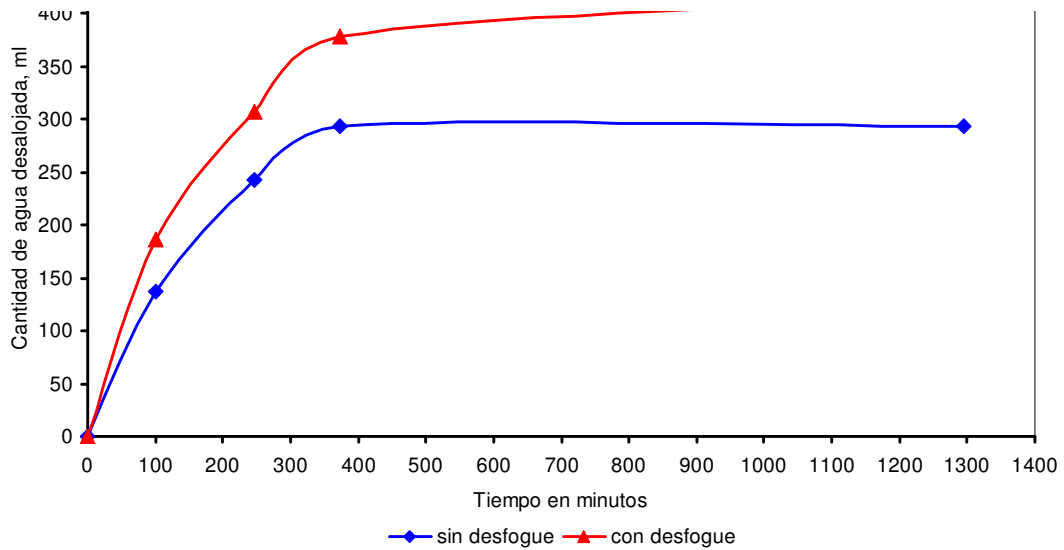


- Lecho de filtrado con una carga de lodo de 0.96 Kg - Equivalente a una altura de 2.5"

Foto 12. Drenaje con carga de 0.96 Kg

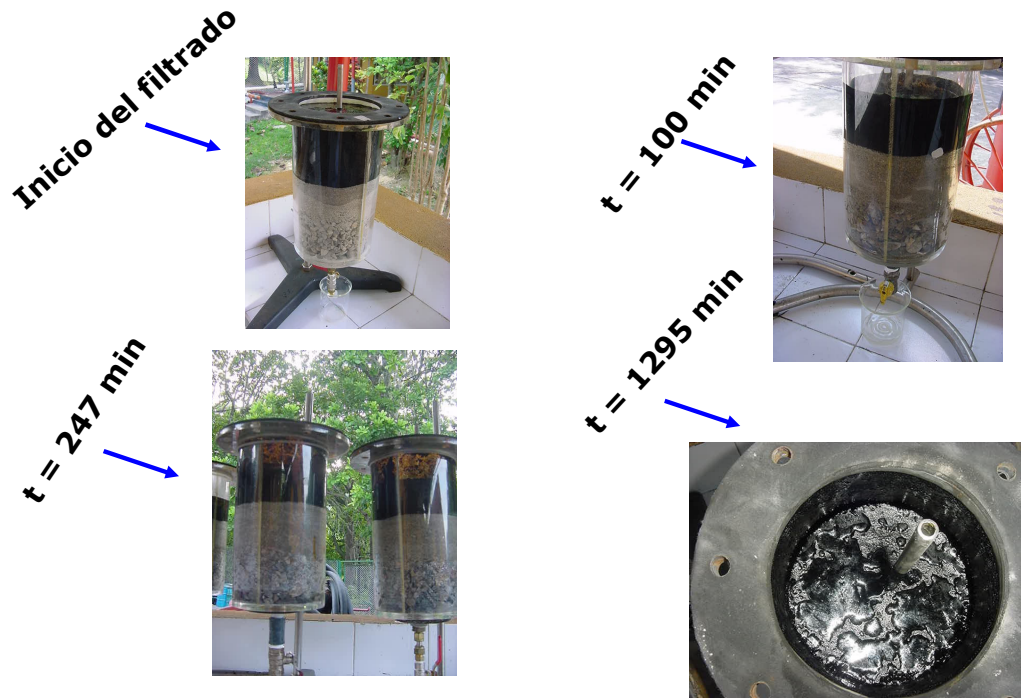


Gráfica 2. Comportamiento de drenaje con carga de 0.96 Kg

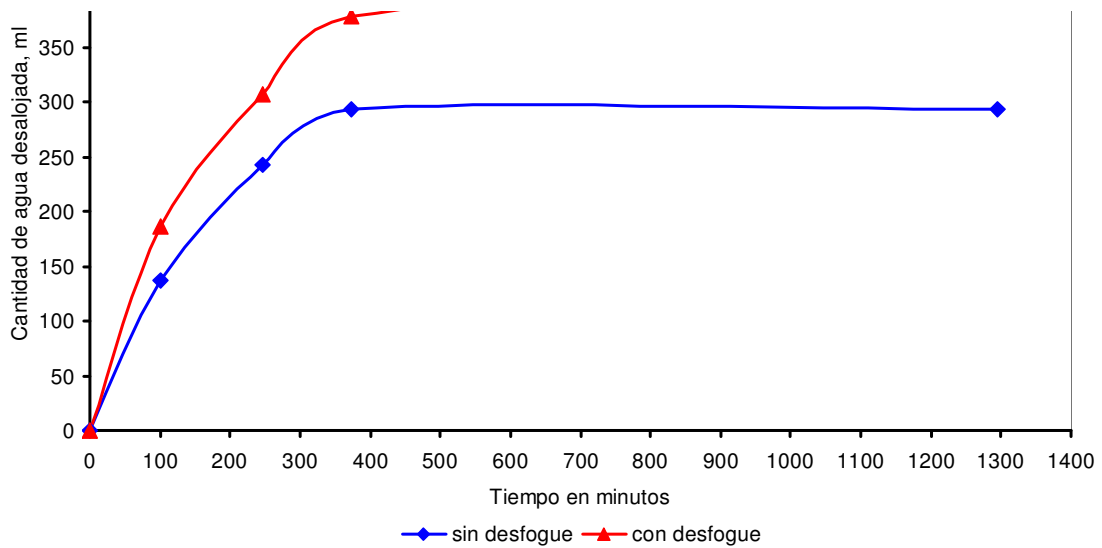


- Lecho de filtrado con una carga de lodo de 1.48 Kg - Equivalente a una altura de 4"

Foto 13. Drenaje con carga de 1.48 Kg



Gráfica 3. Comportamiento de drenaje con carga de 1.48 Kg



Los fondos así obtenidos después de 3 días de filtrado tienen la composición que se muestra en la siguiente tabla.

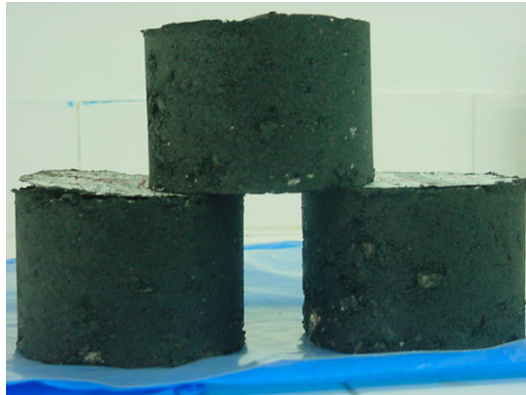
**Tabla 8. Composición de fondos después de filtrado**

<b>CARGA</b>	<b>0.74 Kg</b>	<b>0.96 Kg</b>	<b>1.48 Kg</b>
<b>Porcentaje de Agua</b>	19.6%	20%	20.5%
<b>Porcentaje de Aceite</b>	63.9%	63.7%	62.8%
<b>Porcentaje de Sólido</b>	16.5%	16.3%	16.7%

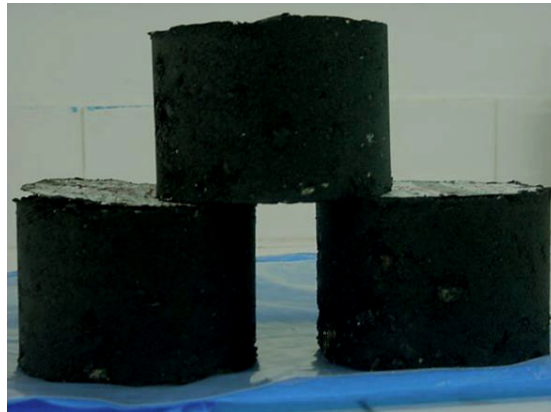
Con base en las gráficas y los comportamientos de drenaje encontrados en los anteriores resultados se puede concluir que

- a) Los lodos alcanzan el máximo tiempo de drenaje en los lechos de secado a los 350 minutos para una carga de 0.74 Kg, a los 400 minutos para una carga de 0.96 Kg y a los 400 minutos para una carga de 1.48 Kg, con capas de lodo de espesores no superiores a 20 cms.
- b) Los fondos obtenidos en las pruebas presentan las composiciones en porcentaje de agua, aceite y sólidos mostradas en la tabla 8.
- c) Los lodos obtenidos de los Depuradores, pueden ser utilizados directamente para la elaboración de pavimentos con mezcla en frío, obteniendo una estabilidad de 3.429 lbs, superior a las 1.800 lbs promedio que se pueden obtener, utilizando solamente crudo Castilla
- d) Los lodos obtenidos de los depuradores, son mejores bases para pavimento, que los lodos obtenidos de los CPI.

**Foto 14. Briqueta para prueba de pavimento realizada con lodos provenientes del Depurador del STAP de Castilla 2**

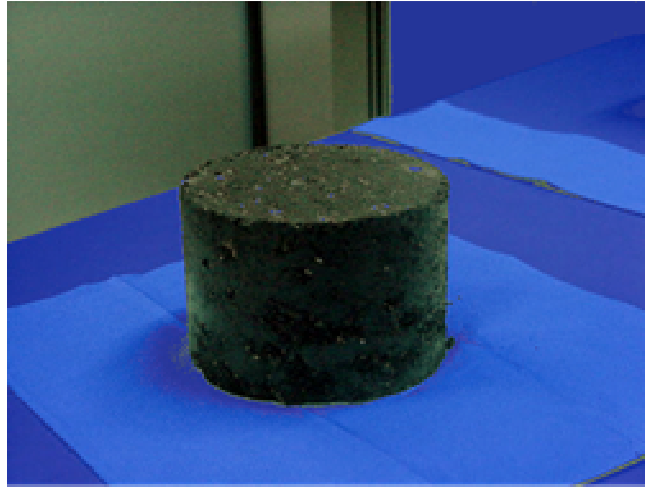


**Foto 15. Briqueta para prueba de pavimento realizada con lodos provenientes de la Celda de flotación**



- El contenido de los lodos en la briqueta fue de 7%.
- Estabilidad promedio registrada por la briqueta fue de 3429 Lb

**Foto 16. Briqueta para prueba de pavimento realizada con lodos provenientes de los fondos de los CPI's**



- El contenido de los lodos en la briqueta fue de 7%.
- Presenta una adhesión aceptable, pero se puede mejorar mezclándolos con los lodos obtenidos de la celda de flotación

## 7. BENCHMARKING

Los funcionarios de la SOA específicamente de la Coordinación de Castilla, visitaron las instalaciones de la Refinería de Cartagena, para conocer el sistema de tratamiento de lodos instalado con base en las recomendaciones del ICP. Los resultados de la visita; la revisión de la propuesta formulada por el ICP, y la recomendación sobre la viabilidad de su implementación en Castilla y Chichimene se muestra a continuación con el fin de ayudar a determinar si es posible implementar este tratamiento.

### 7.1 CONSIDERACIONES GENERALES DEL SISTEMA DE MANEJO DE LODOS DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA <sup>15</sup>

El sistema de tratamiento de lodos con base en lechos de secado que opera en la Refinería de Cartagena, es funcional y presenta buenos resultados en el corto plazo; su filosofía operativa, es muy similar a la del sistema que se tiene instalado en Castilla, aunque este último carece de algunos elementos en común.

**Tabla 9. Diagnóstico sistema de tratamiento de lodos Refinería Cartagena**

ITEM	EVIDENCIA
<b>1. Composición del lodo</b>	Los lodos se generan como parte del proceso de la Refinería, y se encuentran disueltos en el agua de tratamiento; su principal base, la conforman catalizadores. El volumen estimado de agua que llega a un solo punto de captación es de 34.000 bwpd.
<b>2. Punto de acopio</b>	A la llegada del agua, los lodos se retiran mediante maquinaria pesada, y son transportados a un área especial, para ser sometidos a un proceso de bioremediación.
<b>3. Mecanismos de acopio</b>	Los lodos son recogidos, mediante un sistema de vigas metálicas y trampas en el API.

<sup>15</sup> PPL2 – 020, Análisis condiciones para manejo de lodos en Castilla y Chichimene

ITEM	EVIDENCIA
4. Alistamiento	Los lodos son llevados a un sistema de Tanques Espesadores, a través de bombas, para ser drenados y aumentar la concentración de sólidos.
5. Tratamiento	Se utilizan lechos de secado independientes, con rotación de 15 días.

## 7.2 TRATAMIENTO DE AGUA EN LA REFINERIA DE CARTAGENA<sup>13</sup>

La refinería maneja un volumen de 1.000 gls por minuto de agua, proveniente del proceso de obtención de refinados. El agua se caracteriza por la presencia de catalizadores, que dan la contextura de lodos.

**7.2.1 Retiro de Lodos:** La mayor cantidad de lodos que llegan con el agua de tratamiento se retiran en el canal de recibo, mediante maquinaria pesada y son transportados a un sitio especial para su tratamiento y bioremediación. (Ver foto 17 y 18)

**Fotos 17 y 18. Retiro de lodos del canal de llegada**



**7.2.2 Filtro y Trampa:** El sistema cuenta con un filtro, que permite retener el material extraño que llega al sistema, como guantes, palos, etc.; posteriormente, pasa a una trampa que retiene parte del aceite libre que viene con el agua, a través de *Skimer*; mientras que el lodo se queda en la parte inferior y es enviado por gravedad a un foso de

<sup>13</sup> PPL2 – 020, Análisis condiciones para manejo de lodos en Castilla y Chichimene

sumidero, a través de un tubo colector que es alimentado mediante la apertura de válvulas de media vuelta. (Ver fotos 19, 20 y 21)

**Fotos 19, 20 y 21. Retiro de elementos extraños, aceite y lodos del sistema de tratamiento de agua**



La llegada de lodos se verifica visualmente en una caja de inspección, antes de entrar al sumidero. (Ver foto 22)

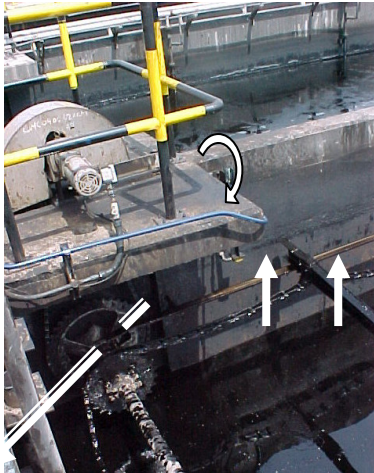
**Foto 22. Caja de Inspección de llegada de lodos.**



**7.2.3 API:** El sistema de piscina API, cuenta con un motor que acciona un mecanismo de barrido superficial de aceite y de lodos en fondo el cual actúa de manera cíclica y es accionado por el operador de acuerdo con las exigencias del proceso.

El mecanismo utiliza una guía y cadenas para desplazar vigas metálicas a lo largo de la piscina. El aceite es recogido en el extremo opuesto de la piscina donde se encuentra un skimmer al dar la vuelta, las vigas arrastran los lodos por el fondo de la piscina, de regreso hacia el tubo colector de lodos. (Ver Fotos 22 y 23)

### Fotos 23 y 24. Mecanismo de remoción del API



MOVIMIENTO SUBACUATIVO EN FONDO DE LAS VIGAS METÁLICAS ARRASTRANDO LODOS HACIA EL COLECTOR



MOVIMIENTO SUPERFICIAL DE VIGAS ARRASTRANDO ACEITE HACIA EL SKIMMER

**7.2.4 Sumidero de Lodos:** El tubo colector de lodos, alimenta un sumidero, que cuenta con dos bombas verticales que llevan el material hacia unos tanques espesadores.

**7.2.5 Tanques Espesadores:** Estos equipos, tienen el propósito de eliminar el agua que viene asociada con los lodos, para aumentar la concentración de sólidos, antes de pasar al proceso de secado. Su estructura es en concreto y tienen la suficiente altura, para disponer de la cabeza que lleve los lodos hacia los lechos de secado por gravedad.

Internamente cuentan con una canaleta en la parte superior, que recoge el agua perimetralmente y la lleva hacia las piscinas de tratamiento por gravedad. Además, tiene instalada una campana que ayuda a la decantación de los sólidos.

El proceso de acumulación de lodos en los tanques espesadores, puede durar 15 días aproximadamente. Durante este tiempo, es monitoreado periódicamente, para determinar el nivel de lodos y programar su envío a los lechos de secado. (Ver Fotos 25, 26 y 27)

**Fotos 25 y 26. Vista de Tanques espesadores en la Refinería de Cartagena- Toma muestras de lodos**



**Foto 27. Vista interior del canal perimetral de agua y la campana decantadora, en uno de los tanques espesadores de la Refinería de Cartagena**



La disponibilidad de dos tanques espesadores, permite programar las actividades de mantenimiento en serie, de tal manera, que mientras un tanque está fuera de servicio para disponer los lodos en los lechos de secado, el otro, se encuentra recibiendo el material.

**7.2.6 Lechos de Secado:** La refinería cuenta con dos lechos de secado, que funcionan en paralelo. El periodo de operación para el tratamiento de cada bache puede durar 15 días aproximadamente.

Los lechos de secado son estructuras cubiertas que permiten acopiar los lodos mediante un sistema de filtros que drenan el agua y mantienen confinados los sólidos para su posterior disposición y manejo. Cada lecho está conformado por 4 capas de material de grava y arena, con espesores que varían entre los 15 y 20 cms, siendo la arena más fina la que se encuentra en la parte superior. (Ver foto 28)

**Foto 28. Vista arena utilizada en la parte superior de los lechos de Secado de la Refinería**



El lodo es depositado en la parte superior de los lechos de secado hasta formar una capa con un espesor aproximado de 20 centímetros. Internamente el fondo de cada lecho de secado tiene un tubo de drenaje que lleva el agua hacia las piscinas de tratamiento.

Luego de varios días el lodo comienza a deshidratarse formando una torta que se cuartea y permite su remoción manualmente como se puede apreciar en las fotos 29 y 30.

**Fotos 29 y 30. Vista de Lechos de Secado en la Refinería de Cartagena – Aspecto de la torta que forma el lodo cuando se seca**



Teniendo en cuenta lo anterior, se considera viable implementar las acciones mejorativas, que permitan optimizar el sistema de manejo de lodos en Castilla, copiando el esquema que mantiene la Refinería de Cartagena en este sentido.

El tratamiento de lodos en Castilla y Chichimene, puede ser optimizado, mediante la eliminación de la etapa de recirculación de los lodos hacia los tanques de proceso, reduciendo el impacto operacional que esta actividad representa. Si se continúan recirculando los lodos hacia tanques de proceso, el Sistema de Tratamiento alcanzará niveles de saturación que obligarán al retiro forzoso de los equipos; como ya se ha visto con el caso del Tanque 205B, que actualmente no está operando, debido a la que la saturación de lodos que existe en su interior, hace que la calidad del BSW del crudo que se maneja en este tanque sea superior al 1%.

Este colapso del Sistema, se verá reflejado directamente en la disminución de la producción del campo, la cual tendría que ser ajustada a la capacidad de los equipos disponibles.

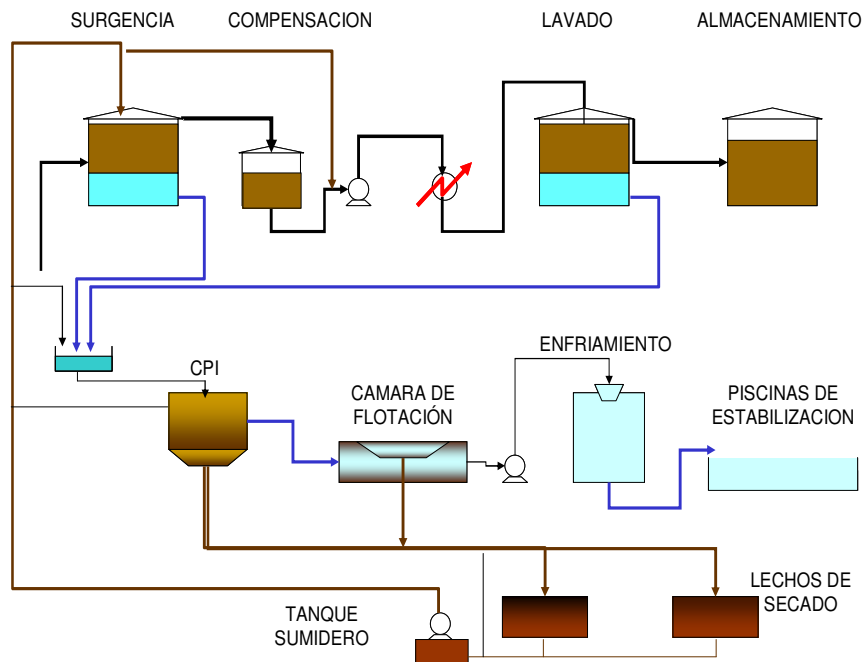
Por tal razón, se considera viable disponer de los lodos en áreas especializadas, ajenas al proceso de agua y aceite, como tanques espesadores, áreas para mezcla de pavimento y áreas para bioremediación; esta alternativa, permitirá reducir la concentración de lodos en el Sistema y se podrá optimizar la capacidad instalada de los equipos, en las Estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene.

## 8. PROPUESTAS PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS

### 8.1 OPORTUNIDADES DE MEJORA EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS

- Implementar un proceso robusto para el tratamiento y disposición de los lodos. Actualmente se están recirculando al sistema, con lo que los diferentes elementos de proceso se están colmatando.
- Poner en operación facilidades para remoción de lodos en CPIs y Celdas de flotación y establecer frecuencia de retiro
- Revisar el diseño de los lechos de secado: Se carece de un sistema de espesamiento de lodos
- Evaluar la conveniencia de segregar lodos: no mezclar los lodos del CPI con los lodos flotados en la celda de flotación.

**Figura 6. Esquema de Operación Actual**



## **8.2 PROPUESTA PARA EL MANEJO DE LODOS EN EL AREA CASTILLA CHICHIMENE**

Con base en el diagnóstico realizado al sistema de tratamiento de lodos de Castilla y Chichimene se considera que en el corto plazo se instale en la Estación Castilla 2, un complemento al STAP que actualmente se encuentra operando. Este complemento, consiste en una Unidad Depuradora, un CPI y dos espesadores, los cuales permitirán incrementar la capacidad de tratamiento del Sistema, conforme a los volúmenes incrementales de producción. La instalación de los espesadores conlleva a eliminar, dos de los lechos de secado actuales, para facilitar el área de instalación requerida.

De acuerdo con lo anterior, se realizó una revisión del sistema actual de manejo de lodos, con el fin de determinar la mejor alternativa para el aprovechamiento de los equipos instalados y definir las facilidades y equipos nuevos requeridos con la mejor relación costo beneficio.

El alcance de la propuesta consiste en el diseño básico para la adaptación de dos lechos de Secado, la construcción de dos tanques de espesamiento, la habilitación de un área para el recibo de lodos provenientes de los Depuradores (Celda de Flotación), el mejoramiento del punto de acopio de lodos y la recomendación de aprovechar los lodos como materia prima para el pavimento de vías secundarias y terciarias en el área de Castilla y Chichimene.

Adicionalmente se presenta la recomendación de estudiar la viabilidad de comercializar los lodos con terceros a fin de establecer una línea de negocio para Ecopetrol S. A.

Teniendo en cuenta los resultados presentados por el ICP con respecto al manejo de lodos de Castilla, las observaciones a la visita de los Lechos de Secado en la Refinería de Cartagena y la proyección de actividades de Proyectos dentro de las instalaciones de Castilla se presenta la siguiente propuesta para el tratamiento de los lodos del área Castilla y Chichimene.

Esta propuesta, servirá como base para la definición de especificaciones técnicas, en futuros procesos de contratación de servicios, así como en la actualización de los manuales operativos de las Estaciones de Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene.

**8.2.1 Generalidades:** Dentro de los análisis realizados y con base en el benchmarking y los diagnósticos del sistema actual, se considera que las mejoras en el sistema de tratamiento deben contemplar los siguientes puntos:

- a) Recolección de lodos en las diferentes fuentes de generación, como: Tanques de proceso (Surgencia, Lavado y almacenamiento), CPI, Depuradores, Piscinas, sitios de contingencia, pozos y áreas operativas de las Estaciones;
- b) Aprovechar los lodos aceitosos, en la elaboración de mezcla fría para pavimento, con lo cual se podrían reducir los gastos operativos en el mantenimiento de vías y ayudar a mantener en buen estado las vías de las Estaciones de recolección y vías internas del campo;
- c) Disposición en los puntos definidos para su acopio, lechos de secado, áreas de bioremediación y áreas de mezclado para la preparación de pavimentos;
- d) Transporte de los lodos recolectados a los puntos definidos para su acopio, lechos de secado, áreas de bioremediación y áreas de mezclado para la preparación de pavimentos;
- e) Monitoreo y control de equipos de drenaje de lodos, lechos de secado, áreas de proceso de bioremediación y mezclado para la preparación de pavimentos;
- f) Retiro de material bioremediado y disposición en puntos previamente definidos.
- g) Preparación de pavimento con mezcla en frío, Recolección de pavimento preparado, transporte y disposición en los sitios definidos para tal fin.
- h) Mantenimiento, limpieza y recuperación de puntos de acopio de lodos, lechos de secado, áreas de bioremediación y áreas de mezclado para la preparación de pavimentos, de tal manera que se garantice continuidad en su operación.
- i) Suministro de materiales, equipos, personal, herramientas y demás elementos necesarios, para garantizar la continuidad del proceso de tratamiento de lodos aceitosos del área Castilla y Chichimene, de acuerdo con los literales anteriormente mencionados.

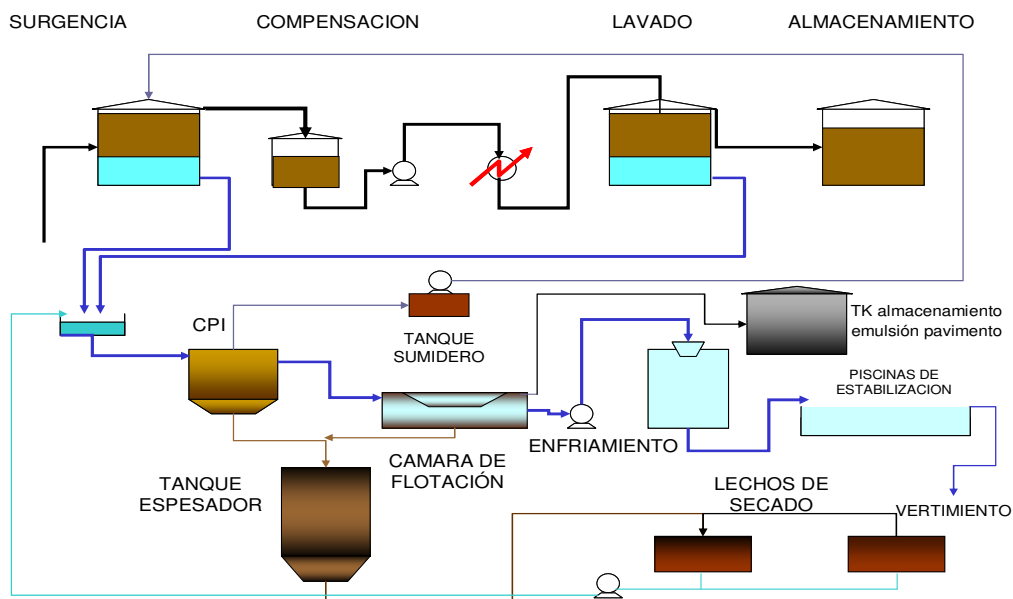
**8.2.2 Descripción del proceso:** La Estrategia para el Sistema de Tratamiento Integral de Lodos, contempla la segregación de los lodos, provenientes de diferentes procesos y la adecuación de los mismos para su disposición final.

El Sistema de Tratamiento de Lodos, en la Estación Castilla 2, contempla dos mecanismos de manejo: El primero, consiste en llevar los lodos de los CPI a una etapa de espesamiento, que tiene el fin de aumentar la concentración de sólidos para más adelante ser deshidratados en los lechos de secado. Posteriormente, estos lodos pueden ser mezclados con lodos provenientes de otros procesos para su disposición final.

El segundo mecanismo de manejo de lodos, corresponde a los lodos provenientes de los Depuradores o Unidades de Flotación, los cuales son llevados a un punto de acopio, donde se puede retirar el agua libre. Los lodos provenientes de ambos mecanismos de manejo, para su disposición final, pueden ser mezclados y utilizados como ligante en la elaboración de pavimentos de vías secundarias y terciarias.

El manejo de los lodos, en la Estación 1, Chichimene y demás áreas operativas, provenientes de actividades de limpieza de tanques, equipos de proceso, manejo de contingencias, consiste en recolectarlos y transportarlos al área de acopio, para su disposición final.

**Figura 7. Esquema de Operación Propuesto**



### **8.2.3 Recomendaciones**

- **Localización**

Los trabajos serán ejecutados en el área de tratamiento de agua en las instalaciones de la Estación Castilla 2 y en el área de acopio La Vara.

- **Adecuaciones del Área**

Se debe tener en cuenta que el área de los Lechos de Secado LS 3 y 4, no hace parte de las modificaciones a implementar en el Sistema de tratamiento de lodos, debido a que esta área será utilizada para la instalación de nuevos equipos (dos espesadores) en el STAP de Castilla 2.

Se ha establecido como punto central de acopio para la Estación 1, Chichimene y demás áreas las facilidades que se encuentran en el área de La Vara.

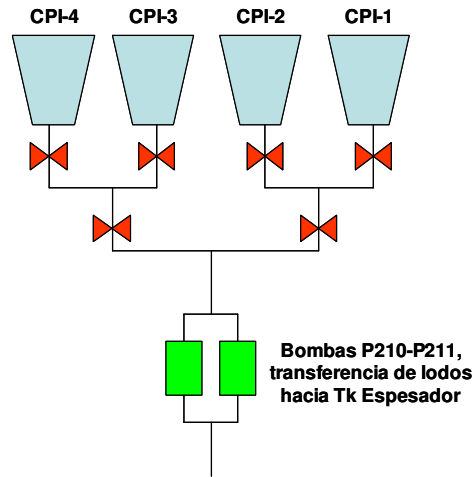
- **Drenaje de los CPI**

Los lodos provenientes de los CPI, serán enviados a través de las bombas P210 y P211, hacia dos tanques espesadores nuevos, que se ubicarán en el área cercana a los lechos de Secado 1 y 2.

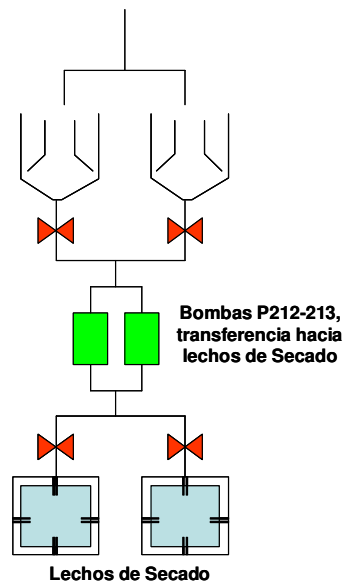
Para tal fin, es necesario, adecuar un cabezal común para los CPI, como se muestra la figura 8. Este cabezal, deberá contemplar una facilidad para la conexión del quinto CPI.

Las bombas P212 y P213, deberán ser reubicadas en el área de los Tanques Espesadores, para ser utilizadas como equipos de transferencia hacia Lechos de Secado, como se muestra en la figura 9.

**Figura 8. Distribución del Proceso de CPI hacia Tanques espesadores**



**Figura 9. Distribución del Proceso entre Tanques Espesadores y Lechos de Secado**



- **Espesamiento de los Lodos**

Para el espesamiento de los lodos, se recomienda construir dos tanques en forma cónica, los cuales se ubicarán en forma continua a cada uno de los lechos de secado. Se recomienda para su fabricación, el uso de tanques de almacenamiento de ACPM disponibles.

En su interior, cada tanque dispondrá de un cono invertido, el cual servirá para direccional el flujo de agua, hacia el vertedero ubicado en la corona superior del tanque, el cual rebosará hacia el sumidero de la Estación Castilla 2. (Ver Figura 10)

**Figura 10. Ejemplo de configuración interna de un tanque Espesador**



Los lodos con mayor concentración de sólidos, que se depositarán en el fondo del Tanque Espesador, serán transferidos por las bombas P212 y P213 (reubicadas), hacia los Lechos de Secado 1 y 2, para su deshidratación. Los anteriores detalles, se pueden apreciar en la Figura 11.

**Figura 11. Distribución del Proceso entre Tanques Espesadores y Lechos de Secado**



- **Drenaje de los lodos flotados del depurador o celdas de flotación (Wenco)**

Separar del cabezal general que llega a los lechos de secado, las líneas de las bombas FL 213-14 las cuales se deben direccionar al antiguo lecho de secado LS-4, el cual será habilitado como un tanque receptor y de adecuación de los lodos de flotación para su posterior uso como ligante en la fabricación de pavimentos para vías secundarias y terciarias.

El agua asociada a este lodo verterá al sumidero para ser recirculada al sistema por las bombas P215 –16.

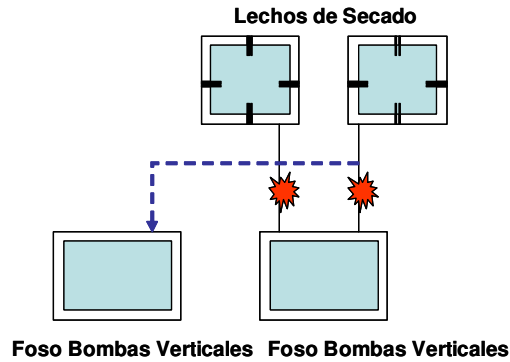
- **Deshidratación de los lodos del CPI**

Alrededor de los Lechos de Secado 1 y 2, se construirá un cabezal que distribuya de manera simétrica, en cuatro puntos, la descarga de las bombas P212 y P213, que transfieren los lodos desde los Tanques Espesadores. Adicionalmente se deberá construir una pasarela perimetral, en cada lecho de secado, que permita el acceso y la fácil maniobrabilidad para el retiro de los lodos. Adicionalmente se debe demoler la canal de rebose y la columna central en su tercio superior, la cual debe ser tapada.

Una vez adecuados los lodos (secos), se evacuarán por medio de volqueta (una vez por semana) al sitio de acopio, para posteriormente mezclarlos con lodos de flotación para su posterior disposición.

El agua drenada de los filtros, será direccionada hacia el Sumidero de la Estación Castilla 2, a partir de un punto de intercepción de la tubería existente que va al foso de las bombas verticales que funcionarán como el punto de almacenamiento para la emulsión de pavimento. (Ver figura 12).

**Figura 12. Proceso entre Lechos de Secado y Foso Bombas Verticales**

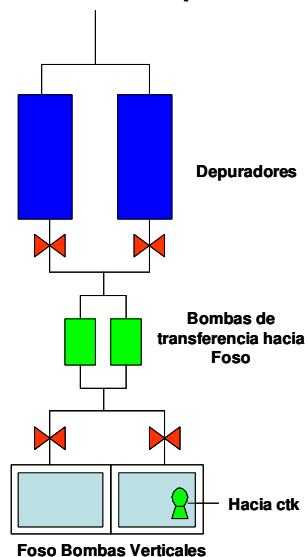


- **Drenaje de lodos de los Depuradores**

Los lodos provenientes de los Depuradores, se direccionará hacia el Foso de Bombas Verticales, el cual se utilizará como almacenamiento y punto de cargue de carrotanques para su disposición.

Para lo anterior y flexibilizar la operación del sistema con las bombas actuales FL213 y FL214, se debe construir un cabezal común, de acuerdo con lo expuesto la figura 13. Este cabezal debe considerar la facilidad para conexión del tercer Depurador.

**Figura 13. Distribución del Proceso entre Depuradores y Foso de Bombas Verticales**



El cabezal de descarga de las bombas FL 213 y FL214, deberá ser reacondicionado para llevar el fluido hasta el Foso de las bombas verticales.

- **Adecuación de Foso de Bombas Verticales**

Este foso, se adaptará como Tanque de Almacenamiento y cargue de los lodos provenientes de los Depuradores. Para tal fin, deberá ser independizado de las líneas que actualmente llegan de diferentes partes del proceso de Tratamiento de la Estación Castilla 2, como drenajes de los lechos de secado y aguas de tanque de compensación.

- **Evacuación de los lodos de Depuradores para disposición final**

Para este proceso se contará con una de las dos bombas sumergibles existentes, las cuales anteriormente enviaban el fluido hacia el Tanque de Distribución. Es necesario adecuar la descarga de la bomba a un brazo de carga para carrotanques que incluya la plataforma para una operación segura.

La otra bomba sumergible, estará disponible para su uso en el manejo de lodos en el área de la piscina de acopio La Vara

- **Manejo de lodos provenientes de actividades de limpieza y contingencias**

Los lodos provenientes de actividades de limpieza de tanques, equipos de proceso y contingencias, en las Estaciones Castilla 1, Castilla 2, Chichimene y pozos, serán transportados a la Piscina de Acopio, para su adecuación y disposición final.

- **Facilidades para la disposición final de los lodos**

Para el tratamiento y disposición final de los lodos se cuenta con una piscina de acopio y un área disponible en La Vara, a las cuales se les realizarán las siguientes modificaciones para facilitar este proceso:

- a. División de la Piscina de acopio, en dos partes (60-40%), mediante la instalación de sacos de bolsacretos.
- b. Cubrimiento de la piscina con menor área, mediante una cubierta a dos aguas.
- c. Construcción de foso e instalación de bomba sumergibles (disponible del foso de bombas verticales de la Estación Castilla2), para la extracción de lodos a carrotanques.
- d. Adecuación de áreas para descargue y cargue de lodos, en carrotanques.
- e. Adecuación de plataforma, para acceder a las válvulas de rebose, hacia la piscina de contingencia.
- f. Encerramiento con malla eslabonada del área de acopio.
- g. Nivelación y adecuación del terreno aledaño a la piscina de acopio, para la conformación de una pista de mezcla de pavimento.

▪ **Adecuación de los lechos de secado**

Para la adecuación de los dos lechos de secado se debe demoler la canal de vertimiento y la tubería de entrada de lodos y los dos tercios superiores de la columna del vertedero. En la parte central de cada una de las paredes se construirá una placa en concreto de 30 x 30 cm x 10 cm de espesor, la cual servirá de pantalla de choque y distribución de lodos en el lecho.

Para evitar que la lluvia afecte el secado de los lodos se construirá un techo a dos aguas soportado por cerchas metálicas de acero estructural A 36. Se usaran dos tipos de tejas, el caballete y la primera fila será de teja de asbesto, mientras la segunda y tercera fila se utilizarán tejas plásticas traslúcidas, tipo Ajoover.

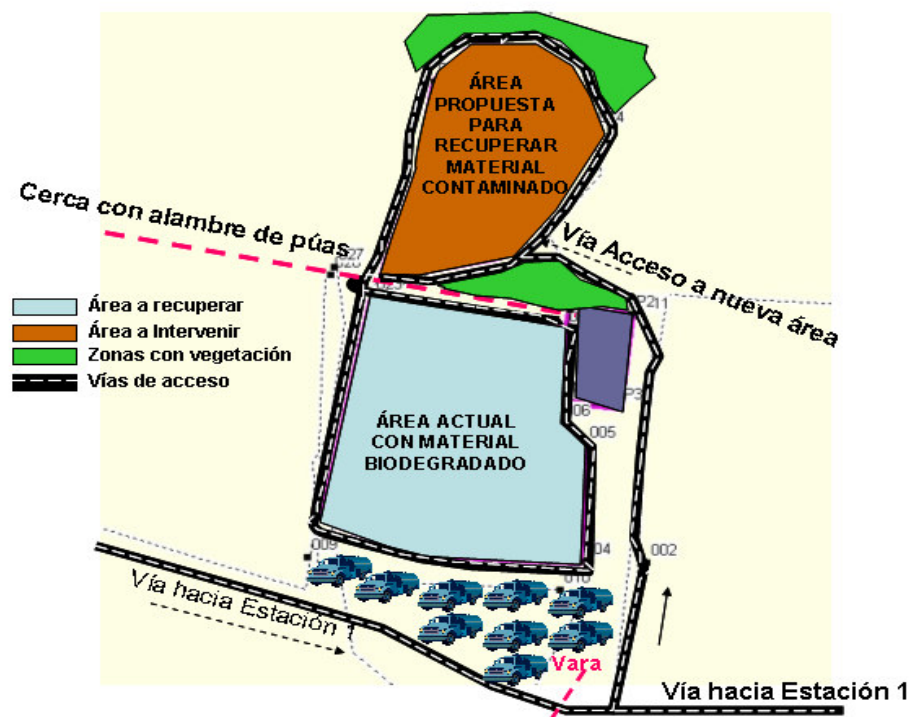
Para el manejo de la distribución de los lodos a lo largo y ancho de los lechos de secado se debe construir un anillo en tubería de 4" alrededor de los lechos de secado el cual será instalado sobre soportes contruidos en ángulos de acero carbón A 36 de 1"x1"x ¼". El montaje de tubería está relacionado con el cabezal de entrada de lodos a los lechos de secado en 4" de diámetro, para este montaje se emplearán tubería en acero carbón A 106 Gr B en diámetros SCH 40 soldada a tope.

### 8.3 PROPUESTA PARA EL ACOPIO DE LODOS DE PROCESO

Considerando los buenos resultados de la bioremediación obtenidos con el proceso adelantado en el área de La Vara, se propone ampliar el área posterior para realizar un tratamiento similar soportado en los siguientes argumentos:

- El terreno es de Ecopetrol S. A.
- Se tiene facilidad de acceso por dos vías
- Es un punto central para el transporte de lodos
- El terreno representa aproximadamente 2 Ha, que es suficiente capacidad para manejo del material contaminado. En el siguiente gráfico se muestra un esquema, del área de parqueadero de carrotanques, el área utilizada para la biodegradación y el área equivalente propuesta con el fin de recuperar el material contaminado.

Figura 14. Distribución de áreas aledañas a La Vara



### 8.3.1 Observaciones y recomendaciones de la propuesta de acopio de lodos

- a) El Departamento de Producción es el responsable de autorizar la realización de las obras de adecuación de tierras en el área de La Vara. Estas actividades deben realizarse de acuerdo con las recomendaciones del personal de soporte de la Dirección de Responsabilidad Integral - DRI.
- b) El Departamento de Producción debe diseñarse un procedimiento que permita coordinar el transporte de los lodos desde la Estación Castilla 2 y Castilla 1 hacia el área de La Vara, propuesta para recibir el material contaminado.
- c) Se debe hacer un trabajo conjunto con el área de proyectos para que ellos realicen junto con el material transportado desde Chichimene, la bioremediación de los lodos de las Estaciones Castilla 1 y 2.
- d) Implementar las acciones de movimiento de tierras para ampliar el área de La Vara.

## 8.4 ACCIONES DE MEJORAMIENTO

### 8.4.1 Acciones a Corto Plazo

- Definir e implementar programa de **remoción de lodos** acumulados en diferentes unidades de proceso: Tanques, CPI, Depuradores o Celdas de Flotación, Piscina de carga a Tanque Espesador, Piscinas de estabilización, etc. Definir esquema de **tratamiento y disposición** de estos lodos
- Implementar sistema de **espesamiento** de lodos:
  - Modificando diseño de lechos de secado 3 y 4
  - Adecuando tanque existente
- Poner en servicio facilidades de **retrolavado en CPI y Depuradores**, enviando lodos a espesamiento.

- Definir **proceso de secado de lodos**: lechos de secado y/o centrifugación
- Definir e implementar proceso de **disposición final** de los lodos aceitosos secos:
  - Biodegradación
  - Incineración
  - Ligante en el uso de pavimentos para vías terciarias.

#### **8.4.2 Acciones a Mediano Plazo**

- Preparación de **ingeniería básica** para construcción de facilidades definitivas de espesamiento, secado y disposición final de lodos en Estación Castilla 2.
- Revisar esquema propuesto para tratamiento y disposición de lodos en Estación Acacias 1.

#### **8.5 RAZON Y BENEFICIOS DEL CAMBIO**

Implementar las modificaciones en el Sistema de Tratamiento de lodos, mencionadas en el presente documento, contribuirá a garantizar la viabilidad técnico económica de mantener las metas de producción de crudo Castilla en 60 KBPD.

Con el anterior cambio se busca optimizar el manejo de lodos en el sistema de tratamiento de agua de la Estación Castilla 2; además realizar un tratamiento para la disposición final de los lodos producidos en la limpieza de tanques, equipos de proceso y contingencias de todo el campo.

Las modificaciones al Sistema de Tratamiento de lodos permitirá valorizar estos residuos mediante su aprovechamiento como ligante asfáltico para la elaboración de pavimentos en vías secundarias y terciarias.

## **8.6 COSTOS DE LA PROPUESTA**

La inversión inicial que debería realizarse en el STAP de Castilla 2 para implementar las acciones formuladas en el corto y mediano plazo, fue estimada por el ICP en col \$124.374.775; De igual manera se debe realizar la limpieza interna de todos los tanques del proceso y se recomienda realizar la evaluación de los costos correspondientes y obtener la autorización para iniciar la ingeniería de detalle.

## 9. CONCLUSIONES

- Los datos recopilados sobre de producción de crudo del año 2005 evidencian que en el proceso de extracción de crudo el 40% equivale a aceite y el 60% equivale a agua. Estos datos son significativos debido a que los requerimientos de comercialización exigen que en el proceso se tenga tiempos de residencia necesarios para reducir el porcentaje de agua y sedimentos (BS&W) por debajo de 0.5%, por lo tanto los tanques del tratamiento de crudo y el sistema de tratamiento de agua potable se convierten en fuentes principales de residuos como los lodos aceitosos.
- Los lodos obtenidos son el resultado del tratamiento del agua y el mantenimiento de equipos de proceso. Aunque su principal base es crudo, el lodo contiene además residuos sólidos, residuos químicos y un alto contenido de agua.
- El Sistema de Tratamiento de Agua Potable - STAP fue construido de tal manera que los lodos y material sólido que se presentara en los CPI y Depuradores fueran recibidos en los lechos de secado, por ello, en este punto se debería realizar un mantenimiento periódico de remoción del material contaminado para ser transportado a un punto de acopio y bioremediado.
- En el Campo Castilla no existe sistemas mecánicos para el acopio de lodos, un punto oficial de recibo de lodos y un área definida para su tratamiento, lo cual dificulta el manejo y disposición final de los mismos y aunque se tienen instalados lechos de secado no se pueden usar porque permanecen colmatados
- Actualmente se está utilizando un punto de acopio de material contaminado dentro de la estación 2, la piscina inevitablemente se ha convertido en un área de movimiento de canecas y otros elementos para los cuales no se tienen las facilidades apropiadas.

- La inexistencia de un punto para acopio de lodos ocasiona que estos se estén recirculando a los tanques de proceso (surgencia y de lavado), generando problemas de desestabilización de la interfase agua-aceite en dichos tanques así como la disminución de los tiempos de residencia para el tratamiento y a su vez la calidad del producto final.
- Se considera viable implementar las acciones mejorativas, que permitan optimizar el sistema de manejo de lodos en Castilla, copiando el esquema que mantiene la Refinería de Cartagena en este sentido.
- El lodo drenado de los tanques espesadores, debe ser dispuesto en los lechos de secado, en periodos de 10 días aproximadamente.
- Los lodos obtenidos de los Depuradores pueden ser utilizados directamente para la elaboración de pavimentos con mezcla en frío, obteniendo una estabilidad de 3.429 lbs, superior a las 1.800 lbs promedio que se pueden obtener, utilizando solamente crudo Castilla.
- La mezcla asfáltica empleando lodos provenientes de los CPI, presentaron una adhesión aceptable, pero se pueden mejorar mezclándolos con los lodos obtenidos de la celda de flotación.
- Desde el punto de vista técnico es factible hacer la disposición final del residuo utilizándolo como ligante de mezcla asfáltica para pavimentos de vías secundarias y terciarias, propuesta que está siendo analizada por medio de una prueba piloto con el fin de demostrar su eficiencia.
- Con el fin de centralizar las áreas de manejo, es conveniente definir la ubicación de un nuevo sitio, donde quedaría organizada el Sistema de Tratamiento de Lodos de Castilla (STL), el cual contaría con los siguientes elementos: Tanques espesadores, lechos de secado, área de mezclado para preparación de pavimento y área de mezclado para bioremediación

- Se considera viable disponer de los lodos en áreas especializadas ajenas al proceso de agua y aceite como tanques espesadores, áreas para mezcla de pavimento y áreas para bioremediación; esta alternativa permitirá reducir la concentración de lodos en el Sistema y se podrá optimizar la capacidad instalada de los equipos, en las Estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene. La opción para ubicar el Sistema de Tratamiento de Lodos (STL) por el método de Biorremediación es el área de La Vara.
- El tratamiento de lodos en Castilla y Chichimene, puede ser optimizado mediante la eliminación de la etapa de recirculación de los lodos hacia los tanques de proceso, reduciendo el impacto operacional que esta actividad representa. Si se continúan recirculando los lodos hacia tanques de proceso, el Sistema de Tratamiento alcanzará niveles de saturación, que obligarán al retiro forzoso de los equipos haciendo que la calidad del BSW del crudo, que se maneja sea superior al 1%.
- La propuesta considera la adquisición de dos nuevos Depuradores, CPI y espesadores para respaldar la capacidad de tratamiento de agua, por lo tanto es recomendable ceder parte del espacio que actualmente ocupan los lechos de secado para que sea utilizado como área de instalación de los nuevos equipos del STAP.
- El presupuesto estimado por el ICP, contempla la utilización de equipos que actualmente se encuentran fuera de línea y que pueden ser adecuados a las necesidades. Para la realización de las adecuaciones en el área de lechos de secado de la Estación Castilla 2 se estima es col \$ 124.374.775.

## 10. RECOMENDACIONES

- Adecuar el espesor de arena de los lechos de secado conforme a las pruebas realizadas y complementariamente cubrir con techo estas zonas del tratamiento
- Definir un sitio para la disposición de lodos con el propósito de hacer biorremediación
- Dentro de la prueba piloto que se desarrollará se recomienda ejecutar los ensayos definidos en las normas INVIAS para el control de calidad de ligantes y mezclas, con el objeto de confirmar la aptitud de dichos materiales y la aplicabilidad de los mismos.
- Analizar si es posible mezclar los lodos de depuradores y CPI (después de pasar por tanques espesadores), para hacer mezclas de pavimento.
- Definir un sitio para la disposición de lodos con el propósito de hacer mezcla en frío para pavimentos
- El Sistema de Tratamiento de Lodos debe considerar el manejo de los lodos del área Chichimene de manera integral.

Realizar limpieza interna a los tanques de proceso para no afectar la calidad del producto final.

## BIBLIOGRAFIA

- Adams S.R., Domínguez R. V., García H. L (1999). Potencial de la Biorremediación de Suelo y Agua Impactados por Petróleo en el Trópico Mexicano. Revista Terra Volumen 17 Número 2, abril - junio de 1999. En: <http://www.chapingo.mx/terra/con1999.html>.
- Álvarez, J. A, E. Ramos, B. Fernández, A. Núñez. (2004). Gestión de residuos sólidos petrolizados. Petróleo Internacional, Ciudad de la Habana, Cuba, Febrero 2004. En: <http://www.petroleo.com/pragma/documenta/petroleo>.
- Bollag W.B. y Bollag J.M. (1992), "Biodegradation", en Encyclopedia of Microbiology , Volume 1, Academic Press, Inc.
- CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL MEDIO AMBIENTE, Residuos Industriales, en: <http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/13Residu/120ResInd.htm#POBLACION>
- Companioni E. Álvarez, J. A, Díaz M. A. (Sin fecha). Sistemas de Tratamiento de Residuos Sólidos Petrolizados. En: <http://espanol.geocities.com/paginaverde/residuos-petrolizados.pdf>
- Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios del 22 de marzo 1989", en: <http://www.basel.int/text/textspan.html>
- Gordon D., (1977). Handbook of Solid Wasted Management. Ed. Van Nostrand Reinhold Company; Litton Educational publishing Inc. E.U. 1977.

- ICP, 2005. Propuesta para el sistema de tratamiento integral de lodos producidos en los campos Castilla y Chichimene, Junio de 2005.
- ICP, 2003. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas de producción de la Estación Castilla –G.L.L. División de Disciplinas Profesionales, Piedecuesta, Santander Mayo de 2003.
- ICP, Resultado pruebas de laboratorio sobre el espesamiento, secado y disposición de lodos producidos en Castilla.
- LaGrega M. D., Buckingham P.L., Evans J.C., 1996. Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. McGraw-Hill/ Interamericana de España S.A., Madrid, España, 1996.
- Ley 430 de 1998, Congreso de la República de Colombia
- Metcalf L., Eddy H. (1977). Tratamiento y Depuración de Las Aguas Residuales. Ed. Labor S.A. Madrid España, 1977.
- Miliarium Aureum, S.L. (2001, 2004).“Técnicas de limpieza”, en: <http://www.miliarium.com/Monografias/MareasNegras/Tecnicas/Tecnicas.asp>
- PINTO, Jhon Alexander. PPL2 – 020, Análisis condiciones para manejo de lodos en Castilla y Chichimene.
- Superintendencia de Operaciones Apiay, Ficha técnica del crudo Castilla. Departamento de Producción
- Superintendencia de Operaciones Apiay, Ficha de Seguridad Crudo Castilla. Dirección de Responsabilidad Integral – SOA
- Superintendencia de Operaciones Apiay, Manual de operación de las estaciones Castilla 1, Castilla 2 y Chichimene

- Superintendencia de Operaciones Apiay, Reportes diarios de producción crudo y agua.
- Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S.(1994). Gestion Integral de Residuos Solidos Volumenes I y II. Mc Graw Hill Madrid, España, 1994.
- Valderrama, B. Microbiología del petróleo y sus derivados. Instituto de Biotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México Publicado en:  
<http://biblioweb.dgsca.unam.mx/libros/microbios/Cap2/>
- [www.porquebiotecnologia.com](http://www.porquebiotecnologia.com)
- [www.acsmedioambiente.com](http://www.acsmedioambiente.com)
- [www.ambiente-ecologico.com](http://www.ambiente-ecologico.com)
- [www.vialidad.cl](http://www.vialidad.cl)
- [www.suratep.com](http://www.suratep.com)