

**FORMULACIÓN DE UNA PROPUESTA TECNOLÓGICA DE NO
COMBUSTIÓN PARA TRATAR Y ELIMINAR BIFENILOS
POLICLORADOS EN COLOMBIA**

María José Villalobos Saldaña

Universidad El Bosque

Ingeniería Ambiental

Bogotá, D.C, Noviembre de 2006

IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería Ambiental

Título del Proyecto : Formulación de una propuesta tecnológica de no combustión para tratar y eliminar bifenilos policlorados en Colombia

Línea de Investigación : Manejo Integrado de Residuos Sólidos

Área de Investigación : Residuos Peligrosos

Entidades Involucradas : Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Universidad el Bosque

Tipo de Investigación : Descriptiva

Director : Pedro Claver Morales. Profesor asociado Proyecto de Grado. Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad El Bosque.

Co - director : Orlando Quintero. Ingeniero Químico. Asesor técnico proyecto COP. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

“La Universidad El Bosque, no se responsabiliza de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia”

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi grupo de asesores, Orlando Quintero, Pedro Claver Morales y Marta Guardiola, por su dedicación, constancia y continua realimentación del trabajo; a personas como Yadira Carrión, Henry Dueñas y Juan Cárdenas por dedicarme parte de su tiempo para fortalecer este estudio; a Luis Fernando Cadena, Adriana Torres, Gustavo Peñuela, Isabel Cristina Pulgarín y José Evelio Amaya, por su participación y aportes a esta propuesta; a CYDEP (Consultoría y Dirección de Proyectos) y TRADELCA (Transformadores del Caribe) por facilitarme información; a la dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por el apoyo y la confianza que tuvieron en mí trabajo, al grupo de expertos internacionales que estuvieron dispuestos a colaborar en la realización de este proyecto y a mi familia por acompañarme y apoyarme en este valioso proceso.

*Para mi mamá que fue la fuente de inspiración, ganas
dedicación y constancia*

TABLA DE CONTENIDO

I. RESUMEN	15
II. INTRODUCCIÓN	16
III. JUSTIFICACIÓN	18
IV. HIPÓTESIS	20
V. OBJETIVOS	21
VI. MARCO REFERENCIAL	22
A. CONTAMINANTES ORGÁNICOS PERSISTENTES (COP)	22
B. BIFENILOS POLICLORADOS (PCB).....	22
<i>Transformadores</i>	24
<i>Condensadores</i>	27
<i>Sustitutos de los PCB</i>	27
C. LOS PCB EN EL MUNDO	30
<i>Problemas Ambientales y de Salud</i>	32
<i>Convenios Internacionales</i>	34
D. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA DESTRUCCIÓN DE PCB.....	36
<i>Tecnologías de Combustión o Descomposición Térmica</i>	37
<i>Tecnologías de no-Combustión</i>	40
E. TECNOLOGÍAS PROPUESTAS POR LA SECRETARÍA DE BASILEA PARA LA DESTRUCCIÓN DE COP	41
<i>Tecnologías directamente aplicables a la destrucción de pilas de COP, con experiencia considerable y ampliamente comercializadas</i>	42
Reducción con Sodio	43
Descomposición Catalizada por Bases	44
Arco de Plasma	44
Oxidación con agua súper crítica	45

F.	AMÉRICA LATINA Y LOS PCB	46
G.	LOS PCB EN COLOMBIA.....	48
	<i>Avances en el tema y solución a la problemática</i>	48
H.	PROSPECTIVA	50
	<i>Técnicas prospectivas</i>	50
	<i>Análisis estructural</i>	51
I.	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN	53
	<i>Tasa LIBOR</i>	54
VII.	METODOLOGÍA.....	55
A.	FASE I. IDENTIFICAR LA TECNOLOGÍA O GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE NO COMBUSTIÓN QUE PUEDEN SER APLICABLES EN COLOMBIA.....	55
B.	FASE II. SELECCIONAR UNA DE LAS TECNOLOGÍAS CUYOS CRITERIOS OPERATIVOS, ECONÓMICOS Y AMBIENTALES SEAN LOS MÁS FAVORABLES PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL PAÍS	57
C.	FASE III. EVALUAR LA POTENCIALIDAD DE IMPLEMENTAR LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA	60
VIII.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	65
A.	FASE I. IDENTIFICAR LA TECNOLOGÍA O GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE NO COMBUSTIÓN QUE PUEDEN SER APLICABLES EN COLOMBIA	65
B.	FASE II. SELECCIONAR UNA DE LAS TECNOLOGÍAS CUYOS CRITERIOS OPERATIVOS, ECONÓMICOS Y AMBIENTALES SEAN LOS MÁS FAVORABLES PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN EL PAÍS	93
	<i>FASE II. 1. Establecimiento de una metodología para la priorización de criterios</i>	103
C.	FASE III. EVALUAR LA POTENCIALIDAD DE IMPLEMENTAR LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA	108
	<i>Organización y análisis de los resultados obtenidos por el inventario preliminar de existencias de PCB</i>	108
	<i>Construcción de escenarios</i>	115
	Escenario 1. Exportación de todas las cantidades de PCB que hay en Colombia	116
	Escenario 2. Limpieza con solventes de los transformadores para su reutilización en el país y exportación de líquidos PCB y materiales porosos	119
	Escenario 3. Implementación de la RSM para el tratamiento de los líquidos en el país y limpieza con solventes de los equipos. Exportación del PCB puro y de los materiales porosos	126

Requerimientos de la tecnología y estimaciones para las condiciones del país	126
Análisis de proceso para la identificación de aspectos ambientales	129
Análisis de costos	133
Marco Legal e Infraestructura Nacional para la Implementación de la RSM.....	136
<i>Comparación entre los escenarios</i>	148
<i>Divulgación del proyecto al sector directamente involucrado y trabajos similares en Colombia</i>	152
IX. CONCLUSIONES.....	153
X. RECOMENDACIONES.....	155
XI. LISTA DE REFERENCIAS	156
XII. GLOSARIO	162

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Propiedades fisicoquímicas de los PCB</i>	23
Tabla 2.	<i>Sustitutos de los PCB</i>	29
Tabla 3.	<i>Principios de análisis para cada uno de los criterios</i>	67
Tabla 4.	<i>Criterios operativos, ambientales y económicos de la tecnología arco de plasma</i>	69
Tabla 5.	<i>Criterios operativos, ambientales y económicos de la tecnología reducción química en fase gaseosa</i>	70
Tabla 6.	<i>Criterios operativos, ambientales y económicos de la tecnología descomposición catalizada por bases</i>	72
Tabla 7.	<i>Criterios operativos, ambientales y económicos de la tecnología reducción con sodio metálico</i>	74
Tabla 8.	<i>Criterios operativos, ambientales y económicos de la tecnología oxidación en agua supercrítica</i>	76
Tabla 9.	<i>Demanda y costo energético para el tratamiento de una tonelada de residuo</i>	80
Tabla 10.	<i>Relación de toneladas de sustancias reductoras por tonelada de residuo a tratar</i>	82
Tabla 11.	<i>Resultados del proyecto “Formulación de alternativas ambientalmente apropiadas para la disposición final de plaguicidas en desuso incautados por el Estado”. Cárdenas, 2006</i>	89
Tabla 12.	<i>Información obtenida por fuentes primarias y opinión de expertos sobre la tecnología Reducción con Sodio Metálico</i>	94
Tabla 13.	<i>Información obtenida por fuentes primarias y opinión de expertos sobre la tecnología Descomposición Catalizada por Bases</i>	95
Tabla 14.	<i>Definición de criterios para una tecnología óptima</i>	97
Tabla 15.	<i>Tecnologías que más se acercan a criterios óptimos</i>	98
Tabla 16.	<i>Organización de criterios de mayor a menor importancia por un grupo de expertos</i>	103
Tabla 17.	<i>Matriz de evaluación para el grupo de expertos</i>	105
Tabla 18.	<i>Resultados del inventario preliminar de existencias de bifenilos policlorados en Colombia</i>	108
Tabla 19.	<i>Cantidades de PCB por tipo de materiales del inventario directo y proyección de las estimaciones totales</i>	110
Tabla 20.	<i>Distribuciones del aceite mineral contaminado por concentraciones</i>	111
Tabla 21.	<i>Distribución total de transformadores estimados a nivel nacional</i>	112
Tabla 22.	<i>Distribución de transformadores contaminados en el país</i>	112

Tabla 23. <i>Distribución de transformadores con PCB puro en el país</i>	113
Tabla 24. <i>Distribución de los costos de transporte y eliminación para la exportación</i>	117
Tabla 25. <i>Costos asociados a la fase de pretratamiento para las partes metálicas de los transformadores</i>	121
Tabla 26. <i>Costos por tonelada de la chatarra de hierro o acero en el mercado nacional</i>	124
Tabla 27. <i>Requerimientos de la tecnología RSM y estimaciones para las condiciones del país</i>	128
Tabla 28. <i>Análisis de costos para el tratamiento del aceite mineral contaminado entre 50 ppm y 500 ppm con la tecnología RSM</i>	134
Tabla 29. <i>Análisis económico de los escenarios</i>	150

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. <i>Estructura molecular de un bifenilo policlorado</i>	23
Gráfico 2. <i>Distribución de las aplicaciones de PCB en el mundo</i>	24
Gráfico 3. <i>Resultados de Inventarios Parciales de PCB en América Latina</i>	48
Gráfico 4. <i>Matriz de Análisis Estructural</i>	52
Gráfico 5. <i>Variación del costo de energía por tonelada de residuo tratado</i>	80
Gráfico 6. <i>Eficiencias de Remoción y PCB Liberados</i>	84
Gráfico 7. <i>Distribución del número de criterios óptimos a los que se acercan las tecnologías descomposición catalizada por bases y sodio metálico</i>	102

LISTA DE ESQUEMAS

Esquema 1. <i>Esquema metodológico</i>	64
Esquema 2. <i>Esquema general del escenario 2. Limpieza con solventes de los transformadores para su reutilización en el país y exportación de líquidos PCB y materiales porosos</i>	120
Esquema 3. <i>Valor agregado del escenario 2</i>	124
Esquema 4. <i>Balance de masas para el proceso de tratamiento con la tecnología RSM a una tasa máxima de tratamiento mensual</i>	130
Esquema 5. <i>Esquema general del escenario 3. Implementación de la RSM para el tratamiento de los líquidos en el país y limpieza con solventes de los equipos. Exportación del PCB puro y de los materiales porosos.</i>	135
Esquema 6. <i>Valor agregado del escenario 3</i>	147

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. <i>Tecnologías propuestas por la Secretaría de Basilea para la descontaminación y destrucción de COP</i>	166
ANEXO 2. <i>Costos actuales de los servicios públicos en Colombia</i>	167
ANEXO 3. <i>Grupo de expertos escogidos para la metodología de priorización de criterios</i>	168
ANEXO 4. <i>Lista de criterios para la selección de tecnologías</i>	169
ANEXO 5. <i>Matrices evaluadas por el grupo de expertos</i>	170
ANEXO 6. <i>Tasas de cambio y tasa de interés LIBOR para los cálculos del análisis económico</i>	172
ANEXO 7. A. <i>Precios internacionales para el tratamiento de PCB en el exterior</i> B. <i>NOTICIA: “Habilitan en La Plata planta para el tratamiento de PCB”</i>	173
ANEXO 8. <i>Descripción de los laboratorios existentes para el análisis de PCB</i>	174

LISTA DE ABREVIATURAS

RESPEL	Residuos Peligrosos
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
PCB	Bifenilos Policlorados
DE	Eficiencia de Destrucción
DRE	Eficiencia de Destrucción y Remoción
SCB	Secretaría del Convenio de Basilea
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ISC-UNIDO	Centro Internacional de Ciencia y Alta Tecnología –Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia
RSM	Reducción con Sodio Metálico
DCB	Descomposición Catalizada por Bases
PLASCON	Arco de Plasma
OASC	Oxidación en Agua Super Crítica
RQFG	Reducción Química en Fase Gaseosa
HDC	Hidrodeclorinación Catalítica
TRBP	Planta Procesadora de Reducción Térmica
LWPS	Sistema de Pre calentamiento de Residuos Líquidos
SI	Sin Información

I. RESUMEN

Se estima que Colombia tiene alrededor de 12.867 toneladas de aceites y transformadores contaminados con bifenilos policlorados (PCB) que deben ser eliminados para el año 2028. Con el fin de contribuir en la toma de decisiones respecto a los mecanismos mas adecuados de eliminación que se adapten a las condiciones del país se desarrolló el presente proyecto. El análisis cualitativo y la confirmación de resultados mediante una evaluación cuantitativa previa, permitieron establecer que de las tecnologías de no combustión, de mayor grado de desarrollo y experiencia comercial en el mundo, propuestas por la Secretaría de Basilea, la descomposición catalizada por bases y la reducción con sodio metálico son tecnologías promisorias para el tratamiento de estos residuos en el país. De estas dos tecnologías, se pudo concluir, mediante la opinión de expertos y la aplicación de la metodología de análisis estructural, que la reducción con sodio metálico tiene mayor potencial para ser implementada en el país, por su estado de desarrollo y experiencia en varios países del mundo y algunos de Latinoamérica. Esta tecnología de tratamiento químico junto con la exportación, es un escenario costo - eficiente para que el sector poseedor lleve a cabo la eliminación de los residuos de bifenilos policlorados en el tiempo establecido por el Convenio de Estocolmo.

II. INTRODUCCIÓN

Después de casi 50 años de producción, los bifenilos policlorados fueron prohibidos en el mundo entero. Las alternativas para su eliminación hace 20 años estaban limitadas a la descomposición térmica en incineradores y eran muy pocas las empresas poseedoras conscientes, que se encargaron de destruir sus existencias. La necesidad de encontrar nuevas posibilidades, asesorar a los países en vía de desarrollo y reglamentar la eliminación de estos residuos peligrosos, hizo que la Secretaría del Convenio de Basilea, encargada de garantizar el cumplimiento del convenio sobre el manejo ambientalmente adecuado y el control de los movimientos transfronterizos de estos residuos, y otras organizaciones internacionales, elaboraran documentos para mostrar todas las alternativas de solución a este problema y permitir a los países, cumplir con los compromisos asumidos por el Convenio de Estocolmo; convenio que regula 12 Contaminantes Orgánicos Persistentes prioritarios dentro de los cuales se encuentran los PCB.

Para los países en vía de desarrollo, se han propuesto las tecnologías de no combustión por ser más simples que las tecnologías de combustión y demandar menor cantidad de recursos. La Secretaría del Convenio de Basilea, encontró 27 tecnologías, clasificadas en 5 categorías, dependiendo del grado de aplicabilidad a la destrucción de pilas de contaminantes orgánicos persistentes, el grado de desarrollo y la fase de comercialización en la que se encuentran. Teniendo en cuenta que algunas de las tecnologías de la categoría A han sido experimentadas en países de Latinoamérica y su grado de desarrollo, comercialización y aplicabilidad directa al tratamiento de pilas de contaminantes orgánicos persistentes, incrementan la confiabilidad para su aplicación en Colombia, fueron estas las tecnologías evaluadas para la selección de una de ellas que fuera considerada como promisoría para el país.

Colombia, a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, ha trabajado el tema de los PCB desde 1998 cuando se hizo el primer intento de hacer un inventario y ya, con la firma del convenio, existe el “Plan de Acción para el Manejo de Existencias y Eliminación de los

PCB” que establece las directrices para hacer el manejo integral de los PCB en el territorio nacional; desde un inventario consolidado hasta la eliminación segura de estos residuos.

Las tecnologías de no combustión propuestas por la Secretaría de Basilea, son alternativas que han sido planteadas para los países en vía de desarrollo porque su simplicidad les permite ajustarse a las limitaciones de infraestructura, personal capacitado y recursos de estos países. La formulación de una propuesta tecnológica que cumpla con criterios económicos y ambientales, constituye un primer acercamiento a soluciones tangibles para determinar si tecnologías ya comercializadas y con experiencia considerable en otros países, tienen aplicabilidad en Colombia, si sus costos se encuentran por debajo de los costos de exportación que está asumiendo actualmente el sector eléctrico para la eliminación segura de estos contaminantes y si cumplen con criterios de ecoeficiencia que garanticen su sostenibilidad en el largo plazo.

III. JUSTIFICACIÓN

Una de las manifestaciones del acelerado proceso industrial de mediados de siglo XX fue la producción masiva de sustancias químicas. Estos compuestos colmaron las necesidades productivas del momento y mejoraron el funcionamiento de máquinas y equipos que debían alcanzar desempeños máximos. No obstante, con el paso de los años, se fueron presentando efectos adversos sobre la salud y el ambiente, en zonas donde jamás se habían manufacturado estas sustancias. Los bifenilos policlorados (PCB), hacen parte de este grupo de compuestos que por sus propiedades químicas y alta estabilidad han permanecido en el ambiente sin ser degradados, acumulándose en los tejidos grasos de animales y del hombre.

En Colombia, como en el resto de países de Latinoamérica, existen estas sustancias porque fueron importadas hace 40 años aproximadamente, para ser utilizadas como refrigerantes dentro de transformadores eléctricos. Por efectos de la contaminación cruzada, muchos equipos en operaciones de mantenimiento adquirieron concentraciones de PCB y hoy en día, la comunidad internacional ha generado alerta en el gobierno de los países para eliminar estas sustancias y sustituirlas por otras cuya persistencia no represente un riesgo para la población.

El Convenio de Estocolmo es el instrumento que reúne los programas de eliminación de 12 contaminantes orgánicos persistentes prioritarios donde se encuentran los PCB. Colombia, firmó el convenio el 23 de Mayo de 2001 y aún cuando no ha sido expedida la ley que ratifica dicho convenio, el país está comprometido a eliminar todas las existencias de PCB para el año 2028. En el país existen alrededor de 16.000 toneladas de PCB, de acuerdo con lo estimado a través del inventario preliminar realizado este año, cuya única alternativa de eliminación actual es la exportación y destrucción mediante tecnologías de descomposición térmica.

Sin embargo, la exportación por sí sola no representa una alternativa costo- eficiente en el largo plazo. La tendencia actual del modelo de desarrollo, apunta hacia una mayor eficiencia del uso de materiales en los procesos productivos por el evidente agotamiento de los recursos naturales cuyo sostenimiento se ha convertido en la base para el desarrollo. Frente a esta situación, los residuos han ido adquiriendo valor, porque no se consideran desechos sin ningún tipo de utilidad, sino insumos

con excelentes oportunidades de mercado, dadas las cantidades que se generan anualmente en el mundo. Sólo Colombia genera alrededor de 500.000 toneladas al año de residuos peligrosos, que se liberan al ambiente, se almacenan o se envían al exterior para su eliminación, sin tener ningún tipo de aprovechamiento económico; las cantidades que entran nuevamente en los ciclos productivos son pocas, debido a la limitada concepción del ciclo de materiales.

Teniendo en cuenta lo anterior, este proyecto es una búsqueda de alternativas de no combustión para el tratamiento de los aceite minerales y los transformadores contaminados con PCB en Colombia. Las tecnologías de combustión además de destruir materiales que pueden ser incorporados nuevamente en el sector industrial no son recomendadas para la descomposición térmica de compuestos orgánicos clorados, porque a las temperaturas que se manejan los compuestos pueden revertirse en síntesis de dioxinas y furanos, los compuestos más tóxicos del mundo.

Los resultados, buscan ser una herramienta de toma de decisiones para el gobierno, el sector público y privado, en la eliminación de los residuos peligrosos dentro de un plan de manejo integral, de tal manera que se trabaje por la protección de la salud y el ambiente y por el aprovechamiento, reciclaje o reutilización, en la medida de lo posible, de residuos peligrosos para que sean vistos como productos con oportunidad de mercado. Los recursos naturales no son ilimitados y en la medida en que los materiales existentes sean aprovechados, se reduce la presión sobre los recursos naturales y se materializa el tan discutido concepto de desarrollo sostenible.

IV. HIPÓTESIS

La incineración en el exterior no puede ser la única alternativa de eliminación de contaminantes orgánicos persistentes en Colombia, al representar un gasto significativo en la economía nacional. La implementación de una de las tecnologías de no combustión propuesta por la Secretaría de Basilea, en complemento con la eliminación en el exterior, sería una solución adecuada para la eliminación de PCB en el país, por ser una alternativa aplicable a los países en transición por su simplicidad, costos moderados y su eficiencia ambiental, técnica y económica. De ser aceptada por la comunidad y vista por los inversionistas como una oportunidad de negocios, se podrá convertir en la solución a la eliminación segura de los residuos peligrosos en el país.

V. OBJETIVOS

Objetivo General

Formular una propuesta para la implementación de una de las tecnologías de no combustión, considerada por la Secretaría de Basilea, en el tratamiento de aceites PCB y descontaminación de transformadores eléctricos en Colombia.

Objetivos Específicos

1. Identificar la tecnología o grupo de tecnologías de no combustión que pueden ser aplicables en Colombia.
2. Seleccionar una de las tecnologías cuyos criterios operativos, económicos y ambientales sean los más favorables para su implementación en el país.
3. Evaluar la potencialidad de implementar la tecnología seleccionada.
4. Establecer una metodología para la priorización de criterios en el proceso de selección de tecnologías**.

** Objetivo extra derivado como aporte del estudio.

VI. MARCO REFERENCIAL

A continuación se hace una revisión de los aspectos más relevantes sobre los bifenilos policlorados en Colombia y en el mundo, buscando establecer una línea base para el desarrollo de este proyecto.

A. Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) (1)

Los COP, son sustancias químicas producidas por el hombre que se caracterizan por:

1. Persistencia: Debido a su extrema estabilidad química se resisten a la degradación causada por el sol, a la transformación química y a la descomposición biológica.
2. Gran movilidad ambiental: Debido a su persistencia y a su volatilidad parcial tienen la capacidad de desplazarse grandes distancias. Se movilizan de zonas cálidas a zonas frías del planeta.
3. Biomagnificación: Son sustancias que incrementan su concentración cuando pasan de un nivel trófico a otro (34).
4. Toxicidad: Son sustancias que tienen efectos nocivos sobre los seres humanos y animales.

B. Bifenilos Policlorados (PCB)

Son sustancias químicas que cumplen con las características de los contaminantes orgánicos persistentes y están constituidas por dos anillos de benceno unidos entre sí, por un enlace carbono-carbono cuyos átomos de hidrógeno pueden ser sustituidos hasta por 10 átomos de cloro (40). Debido al enlace doble y sencillo intermedio o al enlace π multicentrado de los anillos de benceno y en consecuencia a su alta estabilidad, es resistente a la degradación química, térmica y biológica. Existen 209 congéneres de este compuesto químico, dependiendo del número y la ubicación de los átomos de cloro, 150 de los cuales tienen aplicaciones comerciales.

Las características que los convierten en compuestos químicos de uso industrial son su capacidad de ser aislantes eléctricos, permitiendo cambios en el campo eléctrico con la menor pérdida energética y su capacidad para ser refrigerantes, enfriando el aceite que esta absorbiendo las pérdidas de energía y produciendo calor (26) (38). Además de su uso industrial, los PCB son compuestos de generación no

intencional, debido a que se pueden formar de manera involuntaria por algunos procesos de combustión.

Gráfico 1. Estructura molecular de un bifenilo policlorado

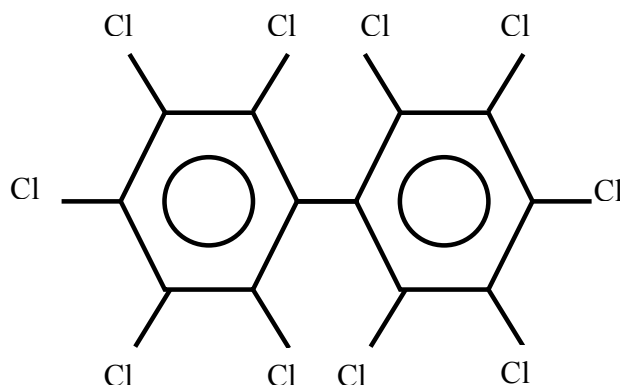


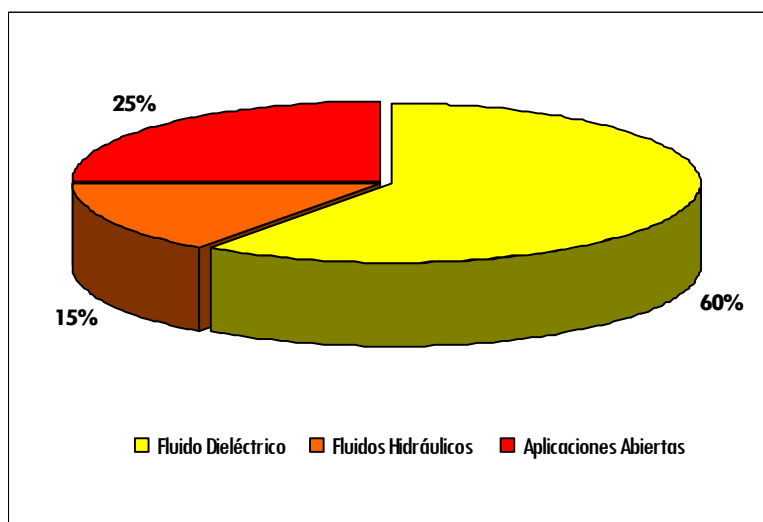
Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los PCB. (19) (38)

PROPIEDADES FÍSICAS	PROPIEDADES QUÍMICAS
Apariencia: Desde líquidos aceitosos móviles de color amarillo hasta resinas transparentes dependiendo del grado de sustitución de la molécula	Altamente estables
Bajas presiones de vapor (baja volatilidad)	Constante dieléctrica baja
Densidad: Peso/Volumen 1.2 – 1.6 mg/cm ³	Punto de destello bajo
Insolubles en agua	No posee punto de ignición o llama
Solubles en solventes orgánicos	No inflamables (Resistentes al calor)
Solo se queman al contacto con la llama directa. Esta propiedad ha sido de gran utilidad, puesto que pueden absorber cambios rápidos en el campo eléctrico sin subir considerablemente su temperatura, y en consecuencia, con bajas pérdidas energéticas	

Aplicaciones

Aunque los PCB tienen aplicaciones cerradas, abiertas y semiabiertas, su uso principal es en aplicaciones cerradas, transformadores y condensadores, como fluido dieléctrico. Algunas de las aplicaciones abiertas corresponden a uso en pinturas, materiales de recubrimiento, plastificantes en cloruro de polivinilo, neopreno y otras resinas artificiales, en tintas y papel de autocopia, adhesivos, diluyentes de plaguicidas, lubricantes y selladores, retardador de llama en telas, alfombras y espumas de poliuretano y cosméticos (40). En las aplicaciones semiabiertas, se utilizan como líquidos de transferencia de calor en los aceites hidráulicos de bombas e interruptores (37). El gráfico 2 muestra la distribución de estas aplicaciones en el mundo.

Gráfico 2. *Distribución de las aplicaciones de PCB en el mundo*



Basado en: IOMC. (2000) *Proceedings, UNEP Chemicals Workshop on the Management of Polychlorinated Byphenyls and Dioxins/Furans*. Montevideo, Uruguay. Pág. 161.

Transformadores

Son dispositivos encargados de la generación y distribución de electricidad a través del aumento o disminución del nivel de voltaje de una corriente eléctrica. La cantidad de aceite dieléctrico que contienen, depende de su capacidad en una relación 1 a 1 de Kilovatios a Litros y de 1 a 1.5 de Litros a Kilogramos. No obstante, no es una relación lineal ya que la curva de peso aumenta menos lentamente que la de capacidad (39). La vida útil en condiciones ideales de un transformador es de 400 años, si se tienen en cuenta las condiciones reales, se puede estimar en 50 años¹.

Los transformadores se pueden tratar para remover el PCB contenido en su interior y ser reutilizados posteriormente (38). El residual de aceite PCB que queda en los transformadores se puede encontrar de dos formas²:

1. Absorbidos por los elementos porosos del núcleo como maderas y superficies:
El PCB se libera con el tiempo dependiendo de la velocidad de difusión del medio poroso.
2. En forma libre mojando las superficies de la carcasa y el núcleo:
Este puede ser retirado con ayuda de un solvente.

Partes de un transformador

Están constituidos por una carcasa externa de hierro, un núcleo magnético de acero, cables de cobre cubiertos por una capa aislante de papel o resina, soportes de madera (que absorben el 50% de su propio peso) y el líquido dieléctrico. Su tamaño varía en una escala proporcional al voltaje que tenga que manejar (38). En términos generales, la distribución en peso de las partes en un transformador es 34% del aceite dieléctrico, 58% las partes metálicas y 8% los materiales porosos³. En los componentes porosos queda impregnado un 5% del contenido inicial de PCB que hay en el transformador (39).

Tipos de Transformadores

¹ Heilbron, M. Comunicación personal. Octubre 17 de 2005.

² KIOSHI. *Descripción Técnica del Proceso de Declorinación y Reclasificación de Aceites de Transformador*. Documento electrónico. Enviado por Magda Patricia Díaz. Mayo 16 de 2006.

³ González, L. *Kinectrics Low-Temperature PCB Disposal Technologies*. Documento electrónico. Enviado por Luciano González. Julio 12 de 2006

Los transformadores se pueden clasificar según su capacidad en transformadores de potencia, cuando superan los 500 kV y transformadores de distribución cuando su capacidad es menor a ese valor (24). Sin embargo, para el interés de este proyecto, la clasificación que se presenta a continuación es por el tipo de aceite dieléctrico que contienen.

Transformadores de Askarel

Son los equipos eléctricos con mayor concentración de PCB. El Askarel, es el fluido dieléctrico constituido por PCB en concentraciones de un 40% a un 80% y un solvente de mezcla que es el clorobenceno (26). Debido a la concentración elevada de PCB, el tratamiento para su reutilización es difícil y el retrolleado (drenaje del aceite mineral contaminado y sustitución por aceite mineral limpio de menos de 2ppm), no es una medida costo-eficiente para este tipo de equipos. No obstante, se puede utilizar el lavado con solventes para retirar el PCB remanente de las partes metálicas y llevar a cabo reciclaje y eliminación. Para el tratamiento del líquido Askarel la decloración química es muy costosa, así que se recomienda la incineración a altas temperaturas (3).

Transformadores de Aceite Mineral Contaminado

Son equipos que operan inmersos en aceite mineral y durante actividades de mantenimiento por contaminación cruzada han sido impregnados por PCB en concentraciones que no llegan a 1000 ppm (24). Estos transformadores se pueden descontaminar por diferentes métodos para ser reutilizados. Entre las técnicas de descontaminación esta el retrolleado y la descontaminación en línea (para tratar tanto el aceite como el interior de transformadores grandes, todo en una sola operación).

La experiencia de empresas grandes de servicios públicos en Canadá y Estados Unidos (4) permite hacer una clasificación aproximada de las categorías de los transformadores que están contaminados con PCB, que sirve como referente para las existencias inventariadas en Colombia. A continuación se presenta la información:

- 7-15% de sus transformadores de aceite mineral están contaminados con más de 50 ppm

- 90% de los transformadores de aceite mineral tienen niveles de PCB de 50-500 ppm
- 10% de los transformadores de aceite mineral tienen niveles de PCB de 500-1000 ppm
- <1% de los transformadores de aceite mineral tienen niveles de PCB superiores a 1000 ppm.

Condensadores

Son dispositivos que pueden acumular y soportar electricidad (38) lo que les permite dar potencia inicial a motores monofásicos y proteger equipos eléctricos y electrónicos contra picos de voltaje. Se diferencian de los transformadores en que son equipos totalmente sellados y su núcleo, que constituye la mayor porción en peso de este equipo (24), está constituido por láminas delgadas de papel aluminio separadas entre sí por una capa aislante de polipropileno o papel impregnado con PCB (37). Todo el espacio libre es ocupado por aceite eléctrico PCB de alta volatilidad debida al bajo número de cloros en la conformación de la molécula (38).

Los condensadores que están constituidos por aceite dieléctrico de alta concentración de PCB pueden llegar a tener hasta un 100% del contaminante. A diferencia de los transformadores, los condensadores generalmente deben ser destruidos para eliminar el PCB que contienen; existen tecnologías que permiten la recuperación de algunas partes metálicas (38). La distribución de las partes de un condensador es de un 31% a un 42% de aceite dieléctrico, de un 18% a un 20% las partes metálicas y de un 38% a un 51% que constituyen los materiales porosos⁴.

Sustitutos de los PCB

⁴ Ibid.

Los aceites sustitutos se pueden utilizar para llenar transformadores nuevos y para rellenar transformadores viejos. Cuando se utilizan para la primera aplicación, los transformadores deben estar diseñados teniendo en cuenta algunas características de los aceites, como la gravedad específica, la viscosidad y el coeficiente de expansión térmica en particular. En la segunda opción, al seleccionar el aceite, se debe tener en cuenta el diseño del transformador para asegurar que el nuevo aceite, con sus propiedades físicas, pueda operar (38).

Las características que deben tener los sustitutos para el relleno son (38):

- ✓ Características eléctricas: Constante dieléctrica baja
- ✓ Propiedades de resistencia al fuego
- ✓ Densidad: Debe ser menor a la del aceite original.
- ✓ Coeficiente de expansión térmica: El transformador debe estar diseñado para cambios de volumen por los cambios de temperatura.
- ✓ Viscosidad: Entre menor viscosidad mayor eficiencia de movimiento del líquido por el transformador.
- ✓ Subproductos de combustión: Se debe conocer el comportamiento del aceite en caso de combustión.
- ✓ Consideraciones ambientales: Debe ser biodegradable, no tóxico.

A continuación se presenta la tabla 2 donde se muestran las ventajas, desventajas y biodegradabilidad de los sustitutos de los PCB. (38) (39)

Tabla 2. Sustitutos de los PCB

Sustitutos (Tipo de Dieléctrico)	Ventajas	Desventajas	Biodegradabilidad
Aceite Mineral o Convencional (Hidrocarburos).	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Líquidos levemente tóxicos y muy conocidos. ✓ Económicos. 	Presentan mayor inflamabilidad que los aceites PCB	6% Después de 28 días. DBO (ppm)= 6
Aceites Pesados	Aceite Mineral	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta viscosidad (Arreglos especiales para enfriamiento del transformador) ✓ Menor rigidez dieléctrica que aceite normales ✓ Disponibilidad baja en el mercado. 	DBO (ppm)= 6
Aceites de Siliconas (Compuestos organosilíceos)	Líquido no tóxico	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Costo elevado ✓ Coeficiente de expansión alto. (Necesita un tanque de almacenamiento especial). ✓ Alta viscosidad. ✓ Alta sensibilidad al agua. ✓ El transformador debe operar a menor potencia. ✓ Es más difícil eliminar este aceite que el aceite PCB ya que durante la incineración se forma sílice alrededor de los combustores lo que origina problemas en el lavado del gas. ✓ No son compatibles con aceites convencionales 	DBO (ppm)= 0. No son biodegradables
Esteres (Naturales y sintéticos)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No son fácilmente inflamables. ✓ No son irritantes. ✓ Buenas propiedades dieléctricas. No requieren de una disminución del nivel de potencia después de la conversión. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Riesgo de atacar el aluminio de las bobinas. ✓ Deben protegerse de la humedad. ✓ Costo elevado. 	83% después de 28 días. Natural DBO (ppm)= 250 Sintético DBO (ppm)= 25

C. Los PCB en el mundo

Debido a la variedad de usos industriales y a la necesidad de sustituir algunas sustancias que tenían riesgo de incendio en los transformadores eléctricos, en el año de 1929 se disparó la producción de PCB en el mundo (1). Estas sustancias fueron descubiertas en el siglo XIX, pero tuvieron su auge de 1929 a 1978. Algunos de los países productores más importantes fueron Francia, Alemania, Italia, Rusia, España, Japón, Reino Unido, Checoslovaquia, Austria y Estados Unidos que generaba más de la mitad de la producción mundial de PCB (26).

La manufactura duró casi 50 años, hasta que los efectos de estas sustancias se hicieron evidentes. Desde 1937, ya se habían reportado algunos casos de cloracné de personas que trabajaban con PCB (1), pero no se le dio mucha importancia al hecho hasta que en 1968 se enfermaron alrededor de 1800 personas en Yusho, Japón, por el envenenamiento causado por la ingestión de alimentos cocinados con aceite de arroz contaminado con PCB, que escurrió accidentalmente de un compresor y estuvo presente en una concentración de 2000 ppm (39). Algunas de las manifestaciones de la enfermedad fueron el salpullido, desórdenes digestivos y oculares y el entumecimiento de los miembros. Posteriormente, en 1979, más de 2000 personas se enfermaron nuevamente por la misma causa en Yu-Cheng, Taiwán, cuando la población estuvo sometida durante 6 meses a estas sustancias (1).

Estos accidentes, fueron difundidos internacionalmente y generaron respuestas de los países productores hacia la seguridad de la salud de sus poblaciones. De manera paulatina los países se fueron retirando del mercado. Primero Japón en 1974 y luego Estados Unidos en 1976 mediante un acta de control de sustancias químicas. En años consecutivos, el resto de países detuvo la producción, hasta 1990 cuando Rusia cesó definitivamente su actividad (39).

Aunque los países productores fueron los países desarrollados, la comercialización de PCB llegó a los países de América Latina y otros del tercer mundo. Allí, por efectos de contaminación cruzada se incrementaron considerablemente los residuos PCB. Se estima que las existencias totales de PCB en el mundo son superiores a 1.5 millones de toneladas teniendo en cuenta la producción entre 1929 y 1989 de las cuales el 35% han sido liberadas al ambiente, el 60% está todavía en uso o almacenada y tan solo un 5% ha sido destruido (41).

Como respuesta a este problema global en los años 80's y 90's se incrementó la reglamentación relacionada con PCB. Surgió toda la información con respecto a inventarios, manipulación, almacenamiento, transporte, tratamiento y destrucción de PCB. A comienzos de 1990, se tuvo en cuenta la problemática de los COP en varios foros internacionales y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) estableció el Comité Intergubernamental de Negociación para preparar un instrumento jurídicamente vinculante para los doce contaminantes orgánicos persistentes considerados como prioritarios. Estos fueron los primeros adelantos para la formulación del Convenio de Estocolmo que contó con la participación y recomendaciones del Programa Interinstitucional para el Manejo Adecuado de los Productos Químicos (IOMC), el Programa Internacional de Protección Frente a los Productos Químicos (ICPS) y el Foro Intergubernamental sobre Seguridad Química (FISQ) (20) y cuyas bases fueron los Convenios de Basilea (1989) y Rotterdam (1998).

Desde entonces, cada país ha formulado políticas locales para el manejo integral de los COP dentro de las cuales se encuentran los PCB. Japón y Australia, por ejemplo, debido a su rigurosa reglamentación no permiten la incineración como una alternativa ambientalmente aceptable para la eliminación de COP. Otros países prefieren enviar sus desechos a países europeos que cuentan con la infraestructura adecuada para hacer la incineración.

Actualmente, con los compromisos asumidos por la firma del Convenio de Estocolmo las tecnologías de innovación están tomando fuerza para ser implementadas en los países desarrollados no solo por su desempeño y los bajos costos comparados con la incineración, sino también por la aceptación de la comunidad que durante 20 años ha estado en contra de los procesos de incineración.

Problemas Ambientales y de Salud

Debido a su estabilidad, persistencia, capacidad de biomagnificación y tendencia a desplazarse y acumularse en zonas frías, la disposición inadecuada de los PCB genera consecuencias que trascienden los límites locales. Algunos estudios realizados en especies del Polo Norte han demostrado la existencia de pequeñas concentraciones de PCB en el tejido graso de osos polares, ballenas y delfines e investigaciones como la realizada por el Instituto Polar Noruego han encontrado efectos adversos en el desarrollo de dichos mamíferos (8).

La contaminación del ambiente por estas sustancias ha sido fundamentalmente por cuatro factores. En el aire por la vaporización de plastificantes y la vaporización durante la incineración, en el agua, por el escape y evacuación de líquidos industriales donde se adhieren a la materia orgánica y finalmente al sedimento del fondo y la deposición en vertederos y en el suelo (y consecuentemente el agua) por la filtración desde equipos que se encuentran almacenados de forma inadecuada (3). La vida media de los PCB es de 4.2 días en el aire, 5.7 años en el agua y 1.14 años en el suelo y se ha encontrado que peces y crustáceos pueden acumular altas concentraciones (19).

En los seres humanos, la mayoría de exposiciones ocurren por vía alimentaria, ya que por ingestión, pueden entrar al organismo, acumularse en tejidos grasos así como en el hígado (órgano blanco), permanecer en estos tejidos entre 25 y 75 años debido a que resisten la transformación metabólica (1) y son eliminados vía materia fecal o leche materna (25). Algunos estudios han demostrado que tan sólo se elimina un 30% de los PCB con 1,2 y 3 átomos de cloro y un 10% o menos para los PCB con un mayor número de cloros (3).

Los PCB que se encuentran en uso, pueden ser liberados por grietas, fallas o daños en los equipos y entrar al cuerpo humano por inhalación o contacto dérmico. Entre los efectos más comunes de los COP por estas vías, están la irritación de las vías respiratorias, las lesiones en la piel y las mucosas, como irritaciones y quemaduras y los PCB específicamente, generan enfermedades como la dermatitis y el cloracné. Otros COP son sensibilizantes y pueden generar fotosensibilización o hiperpigmentación (25).

Cuando se generan incendios o chispas internas en los equipos y se llega a una temperatura entre 300°C y 600°C, se forman las dioxinas y los furanos que son productos de la degradación de los PCB y es conocido que son más peligrosos que estos. Tales compuestos de generación involuntaria, tienen un grado de toxicidad tan elevado, que la dioxina 2,3,7,8 TCDD (tetraclorodibenzodioxina) es considerada el compuesto más tóxico del mundo, porque a niveles ubicados en nanogramos por kilogramos o partes por trillón ya se conocen efectos adversos en la salud (1). Estas sustancias son dos millones de veces más tóxicas que el cianuro de potasio y 500 veces más que los PCB. Investigaciones médicas demuestran que estos compuestos son promotores de cáncer (17).

Otros efectos conocidos de los COP son desordenes neurológicos, evidenciados en la afectación neuroconductual en niños, efectos hepáticos, efectos gastrointestinales, alteraciones en el metabolismo de la Vitamina A y de lípidos, alteraciones en el sistema inmunológico, en el sistema nervioso y productores de disrupción endocrina. En este aspecto, se conocen afecciones en el metabolismo de las hormonas reproductivas y alteraciones en el metabolismo de las hormonas tiroideas, causando problemas en la fertilidad, los ciclos menstruales, la gestación, la mortalidad perinatal y características sexuales secundarias (25). Algunos casos documentados de estos efectos son los de Holdke, et.al., (1998) y Lovett, et.al., (1998) (7) sobre la detección de niveles de PCB elevados en la sangre en 7 de cada 10 niños que vivían cerca de un incinerador en Alemania y sobre el descubrimiento de niveles elevados de dioxinas en suelos y huevos de la zona aledaña a un incinerador en Inglaterra.

Según la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer (IARC), estas sustancias químicas son consideradas probables carcinógenos humanos con evidencia menos sólida de carcinogenicidad (39). La evidencia clara de cáncer se ha manifestado en animales y el órgano principalmente afectado ha sido el hígado. Algunos de los efectos no cancerígenos encontrados en hijos de madres sometidas a PCB han sido bajo peso al nacer, problemas de aprendizaje y variaciones en los niveles de hormonas tiroideas cuyos cambios afectan el crecimiento y desarrollo normal de los niños (38).

Según el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de los Estados Unidos, el valor límite de exposición a PCB en el ambiente laboral (TWA⁵) es de 0.001 mg/m³ teniendo en cuenta los riesgos potenciales de cáncer. Otras fuentes como el ACGIHA⁶ proponen un TWA entre 0.5 mg/m³ y 1 mg/m³ dependiendo del porcentaje de cloración de la molécula (25).

En Colombia, los grupos humanos de mayor riesgo son poblaciones cercanas a las fuentes generadoras, especialmente mujeres en edad fértil, niños y adolescentes. La principal fuente de exposición a PCB se debe a la chatarrización y disposición inadecuada de los transformadores, la exposición ocupacional se presenta por contacto e inhalación de vapores en actividades de mantenimiento, almacenamiento y manipulación inadecuada de los PCB, como el retrolleado y la comercialización de chatarra y la exposición por vía alimentaria ocurre por ausencia o malas prácticas de higiene y seguridad (25).

Actualmente Colombia está trabajando en la aplicación de planes de acción a la vigilancia epidemiológica de COP para evaluar la salud pública con respecto a los problemas asociados a estas sustancias, de la mano con la formulación de acciones específicas en lo relacionado con entidades responsables, normativa, capacidad analítica y formación del recurso humano sobre el conocimiento de los COP. Lo anterior, con el fin de hacer efectivo el Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo, en el seguimiento de los impactos generados en la salud de estos residuos peligrosos.

Convenios Internacionales

Aunque existen una serie de acuerdos internacionales, que en términos generales buscan la protección de la salud y el ambiente, los convenios que se describen a continuación, son los que están directamente relacionados con residuos peligrosos o específicamente con los Contaminantes Orgánicos Persistentes.

⁵ Time Weighted Average. Concentración promedio ponderada en el tiempo para una jornada de trabajo diaria de 8 a 40 horas semanales.

⁶ American Conference of Governmental Industrial Hygienists

Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente Humano, Estocolmo, Suecia. (1992)

Es el primer convenio internacional para el manejo adecuado de los residuos peligrosos. En el principio 6 declara que se debe poner fin a la descarga de las sustancias tóxicas en concentraciones tales que el medio no las pueda neutralizar para no causar daños irreparables en el ambiente.

Convenio de Basilea (1989)

Se encarga del control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación y surge como respuesta a la preocupación de movilizar residuos peligrosos desde países industrializados hacia países en desarrollo que no cuentan con la capacidad para eliminarlos. En el artículo 4, numeral 2d sobre Obligaciones Generales, establece que las partes deben velar porque el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos y otros desechos, se reduzca al mínimo, compatible con un manejo ambientalmente racional y eficiente de esos desechos. Menciona a los PCB como uno de los desechos peligrosos cubiertos por la convención. Colombia ratificó este convenio mediante la Ley 253 de 1996.

Convenio de Rotterdam (1998)

Disposiciones pertinentes para la aplicación del proceso de consentimiento fundamentado previo a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional. El convenio promueve la responsabilidad compartida en el comercio de residuos peligrosos para la protección de la salud y el ambiente frente a posibles daños y contribuir a su utilización ambientalmente racional. Este convenio se encuentra en proceso de ratificación en Colombia.

Convenio de Estocolmo (2001)

Es el primer instrumento internacional jurídicamente vinculante para la aplicación de medidas específicas a los COP y por ello es el marco general para la realización de este proyecto. Su objetivo es proteger la salud humana y el ambiente contra los 12 COP prioritarios que incluye la convención; 8 de ellos plaguicidas (dieldrín, clordano, DDT, mírex, endrín, aldrín, toxapreno y heptacloro) los PCB, los HCB (hexaclorobencenos), las dioxinas y los furanos. Este convenio exige que las partes identifiquen alternativas de tratamiento y disposición final de los COP que eviten en la medida de lo posible la generación de dioxinas y furanos.

En la parte II del Anexo A, establece que cada parte deberá eliminar el uso de PCB en equipos a más tardar en el 2025 y realizar esfuerzos decididos para lograr una gestión ambientalmente racional de desechos de los líquidos que contengan bifenilos policlorados y de los equipos contaminados con ellos, tan pronto como sea posible, pero a más tardar en el 2028. El convenio de Estocolmo entró en vigor el 17 de mayo de 2004 y en Colombia, se encuentra actualmente para revisión por parte de la Corte Constitucional la ley que ratifica el convenio.

D. Tecnologías utilizadas para la destrucción de PCB

El tema de los PCB es bien reciente y por ello las medidas tomadas para su manejo están aún en desarrollo. La primera fase en el manejo de PCB (y aun hoy en día en la mayoría de países es lo que se hace) se limitó a un almacenamiento seguro de los residuos, la disposición en rellenos de seguridad y/o la destrucción en sistemas de combustión como los incineradores, los hornos cementeros y los hornos industriales y en algunos países se permitió la inyección en pozos profundos.

Los rellenos de seguridad o rellenos cubiertos han sido utilizados para la disposición de los materiales producto de la combustión de tal manera que no representen un peligro para el hombre. Este tipo de sistemas de retención no ha sido muy efectivo, puesto que la capacidad de evaporación de las cenizas aumenta en forma proporcional a la humedad del suelo, lo que indica que puede haber

contacto con el ambiente. Además, se pueden filtrar hacia las aguas subterráneas o volatilizar para liberarse al aire (28).

La tecnología mas utilizada y con mayor aceptación por la comunidad internacional ha sido la incineración a altas temperaturas gracias a sus elevadas eficiencias de destrucción, a su disponibilidad y a su capacidad para destruir diferentes tipos de residuos peligrosos; no obstante, no son tecnologías aplicables a la condiciones de muchos países que no cuentan con los recursos económicos para implementarlas, ni para exportar sus residuos para tratarlos en los países de Europa y Norteamérica que las tienen.

Ahora, en los últimos 20 años, ha comenzado la segunda fase en el manejo de los PCB. La investigación y el desarrollo de tecnologías innovadoras, de bajo costo que mediante tratamiento químico, físico y biológico permiten transformar compuestos tóxicos en sustancias libres de contaminante que pueden ser utilizadas en otros procesos industriales o disponerse de forma segura en rellenos sanitarios. Se espera que con el impulso de estas nuevas formas de destrucción de PCB, los países tengan la capacidad de eliminar sus existencias para proteger la salud de sus habitantes y el ambiente. A continuación, se hace una revisión de las tecnologías existentes para la eliminación de COP en el mundo.

Tecnologías de Combustión o Descomposición Térmica

Son aquellas tecnologías que necesitan de temperaturas elevadas para destruir la mayor proporción de COP en condiciones de oxidación. Cuando no se controlan factores como la temperatura y el tiempo de residencia durante la combustión y los sistemas de control y monitoreo son defectuosos se pueden generar compuestos como las dioxinas y los furanos (10). Son tecnologías que tienen experiencia y han sido perfeccionadas en los países de Europa y Norteamérica, de las cuales muchas no han sido construidas sólo con el propósito de destruir PCB y compuestos halogenados, sino para la destrucción de los residuos generados al interior de industrias químicas (20). Dentro de este grupo de tecnologías se encuentran la incineración y la co-incineración.

Incineración

Consiste en la destrucción de compuestos tóxicos a altas temperaturas (entre 870°C y 1.200°C) con la manipulación adecuada de ciertas variables como la temperatura y el tiempo de residencia. Para la destrucción de PCB se recomienda un tiempo de residencia mínimo de dos segundos a una temperatura de 1.200°C y un 3% en exceso de oxígeno. Los resultados han sido satisfactorios con eficiencias de destrucción de hasta un 99.9999%, gracias a la incorporación de dispositivos de control de emisiones, que aunque su costo corresponde al 30-40 % de la inversión inicial, garantizan que no se formen nuevamente las dioxinas y los furanos. Es importante tener en cuenta que algunas pruebas han demostrado eficiencias superiores que se pueden lograr con algunas tecnologías de no combustión (28).

Dentro de sus limitaciones además de ser una tecnología estacionaria (lo que aumenta los riesgos de exposición por el transporte de residuos)⁷, están sus costos elevados, ya que pueden superar los 50 millones de dólares⁸ (valor que corresponde a lo que vale la incineración, el montaje de una instalación para hacerlo, la adecuación de una instalación y los sistemas de control de emisiones). Esto se evidencia en que los incineradores son diseñados con base en tecnologías que permiten tratar grandes cantidades de material, no sólo de desecho sino material industrial de plantas químicas. En la medida que las cantidades sean elevadas se hace una tecnología costo-eficiente, por ello para países en desarrollo, cuyas cantidades son limitadas y capacidad técnica y normatividad hace imposible la importación para tratar residuos de otros países, es una opción totalmente irrealizable (39). A esto se suma la inexistencia de equipos de monitoreo y laboratorios certificados para el control, análisis y fiscalización de dioxinas y furanos (16).

⁷ DCB Technology. Documento Electrónico. Enviado por Thomas Opperman. Junio 8 de 2006.

⁸ Karstensen, K. *Manejo de residuos peligrosos y de COP, un reto a nivel mundial. Principales tecnologías de destrucción*. En el marco del Panel Académico sobre Experiencias Internacionales en la eliminación de residuos peligrosos, incluyendo COP. Lugar. Auditorio MAVDT Fecha: Septiembre 30 de 2005.

Coincineración o Coprocesamiento

El coprocesamiento, debe su nombre a que es un proceso simultáneo a la producción de clinker, que consiste en ingresar al horno cementero un residuo para su disposición final o segura, de tal manera que no se generen nuevos residuos en el proceso. Los residuos se introducen en el horno de preparación del clinker y, bajo condiciones alcalinas los residuos orgánicos clorados se descomponen en compuestos inorgánicos como los cloruros. La inyección de los materiales debe cumplir con una serie de especificaciones para que se logren eficiencias aceptables (4).

Esta técnica se utiliza teniendo en cuenta el potencial energético que tienen los pesticidas y otro tipo de residuos, los cuales se mezclan con el combustible y disminuyen significativamente los costos de energía. Algunos residuos requieren tratamientos previos como la desorción térmica para lograr eficiencias superiores al 99% sin efectos adversos en el gas de salida. El material puede entrar seco o en forma de lodo y ser sometido a una temperatura de 1.450°C. Esta entrada de residuos debe ser limitada manteniendo una proporción equilibrada con el combustible original para evitar disminuciones en el rendimiento del proceso principal (28).

Aun cuando la coincineración se ha considerado como una solución ambientalmente segura de destrucción de COP, por las temperaturas que maneja (entre 1.100°C y 2.000°C), el prolongado tiempo de residencia y la turbulencia elevada a la que están sometidos los materiales (4), no se considera una opción correcta para la destrucción de PCB. Esto se debe a que en el caso de estas sustancias, la toxicidad aumenta con el grado de oxidación de la molécula y concentraciones elevadas de líquidos PCB serían y son imposibles de destruir sin generar impactos mayores en el ambiente (28).

Algunas dificultades que tiene esta tecnología para su implementación en países del tercer mundo, es la antigüedad de los hornos cementeros en estos países que no cumplen con las especificaciones técnicas para hacer la coincineración y los que cumplen, deben asumir costos elevados para la instalación de dispositivos de control de emisiones y de equipos de inyección. A esto se suma, el requerimiento de personal especializado para sus operaciones y el rechazo de la comunidad por su percepción negativa frente a la tecnología (28).

Tecnologías de no-Combustión

Las tecnologías de no combustión son el resultado de 20 años de oposición de la sociedad (7) frente a la incineración como alternativa de destrucción de desechos peligrosos y hacen parte de una propuesta de la comunidad internacional para la solución al problema del manejo de COP en países en desarrollo o para aquellos cuya legislación no permite la incineración.

Según el Panel Consultivo de Ciencia y Tecnología (STAP) de las Naciones Unidas se definen como “las tecnologías donde la mayor proporción (99.99 %) de destrucción de COP toma lugar bajo condiciones de reducción”⁹. Sin embargo, debido a la introducción de otras tecnologías en este grupo, la definición adoptada por el GEF se refiere a los procesos que operan en ambientes carentes de oxígeno, diferenciados de los procesos de combustión u oxidativos en su simplicidad para la remoción de los compuestos químicos contaminantes. Esta característica hace estas tecnologías apropiadas a las limitaciones de infraestructura, conocimiento técnico y especialidad de los países con economías en transición. Tienen costos moderados y tienden a tener mayor aceptación por parte de la sociedad y de las ONG’s porque de cierta forma evitan la formación de subproductos como las dioxinas y los furanos (41).

En un primer momento las tecnologías de tratamiento químico, físico y biológico fijaron su atención para el tratamiento de COP en matrices complejas como el suelo y las fuentes de agua, sin tener en cuenta que la gran mayoría de existencias de estos residuos, estaban almacenados en pilas, en espera de una única alternativa de destrucción que era la descomposición térmica (41). Ahora, las tecnologías de innovación propuestas, han demostrado la detoxificación de estos residuos, con resultados exitosos, no sólo por ser ambientalmente aceptables, efectivas y accesibles, sino porque por medio de muchas de ellas se pueden obtener nuevas sustancias que pueden ser reutilizables o reciclables como materias primas para otros procesos industriales con características químicas que no representan un riesgo para la población.

⁹ Mc Dowall, 2002, Vol C, p.38

Se espera que estas tecnologías tomen fuerza con los planes de implementación nacionales que los países deben llevar a cabo para cumplir sus compromisos internacionales y con toda la documentación y capacitación que instituciones como la UNEP, la Secretaría del Convenio de Basilea y el ISC-UNIDO han puesto a disposición pública, para mostrar alternativas que no copien la complejidad de los países desarrollados sino que se acomoden a las necesidades de los países del tercer mundo y sean para ellos una fuente de ingresos y una alternativa económica para la generación de empleo.

E. Tecnologías propuestas por la Secretaría de Basilea para la destrucción de COP (32)

Dependiendo del grado de experiencia y desarrollo que tienen las tecnologías de no-Combustión, han sido clasificadas por la Secretaría del Convenio de Basilea en 5 categorías.

1. Tecnologías directamente aplicables a la destrucción de pilas de COP, con experiencia considerable y ampliamente comercializadas.
2. Tecnologías aplicables a la destrucción de pilas de COP en una fase cercana a la comercialización.
3. Tecnologías promisorias.
4. Tecnologías que aún requieren investigación.
5. Tecnologías que no son aplicables a la destrucción de pilas de COP.

La primera categoría es objeto de análisis por la fase de desarrollo en la que se encuentra. Las 4 categorías restantes albergan alrededor de 21 tecnologías que por procesos químicos, físicos o biológicos, destruyen no solo PCB sino gran cantidad de compuestos orgánicos persistentes. No se considera el análisis de estas tecnologías porque aun están en su fase de investigación, pocas han sido operadas en plantas piloto y en su mayoría hace falta evidencia de su potencial para destruir COP. En el anexo 1 se listan estas tecnologías.

Tecnologías directamente aplicables a la destrucción de pilas de COP, con experiencia considerable y ampliamente comercializadas

Dentro de esta categoría se encuentran las tecnologías de reducción química en fase gaseosa (RQFG), la descomposición catalizada por bases (DCB), la reducción con sodio metálico (RSM), la oxidación en agua súper-crítica, el arco de plasma y la pirólisis. Se desprecia la pirólisis teniendo en cuenta que su aplicación en la eliminación de líquidos PCB es incipiente y su experiencia esta basada, según la información disponible, en residuos de pesticidas (41).

Reducción química en fase gaseosa (RQFG) (19, 46, 28)

Es una tecnología desarrollada por ELI, Eco Logic Internacional Inc. Consiste en la reducción química en fase gaseosa de compuestos orgánicos clorados por sustitución con hidrógeno a una temperatura de 850°C o más. El agua participa como agente de transferencia de calor y como fuente de hidrógeno. Los productos de la reacción son metano, ácido clorhídrico y pequeñas cantidades de hidrocarburos de bajo peso molecular como benceno y etileno.

El proceso completo, requiere de un pretratamiento que consiste en incorporar los desechos sin triturar en una Planta Procesadora de Reducción Térmica (TRBP) bajo condiciones libres de oxígeno y son sometidos a 600°C de temperatura. Los componentes orgánicos se volatilizan y son llevados al reactor RQFG donde la reacción se completa entre los 850°C y 900°C. El gas liberado pasa por un lavador y se almacena para su reutilización posterior como combustible.

Algunas eficiencias reportadas por las plantas instaladas en Australia son de 99.9999% para el tratamiento de PCB, DDT y HCB. Algunas pruebas realizadas con HCB demuestran que el 98% de material de desecho introducido es efectivamente transformado en el TRBP y el resto se lleva a cabo en el RQFG. La capacidad depende de la escala de las plantas y de la concentración de PCB en los residuos. En plantas de gran escala la capacidad puede estar por encima de 200 toneladas al mes (2400 t/año), en plantas semimóviles 70 t/mes y en las plantas portables puede estar entre 50 y 250 t/mes.

El riesgo asociado más importante de esta tecnología es el transporte de cantidades considerables de hidrógeno que es inflamable o explosivo cuando se mezcla con aire, oxígeno, cloro y en general con sustancias oxidantes. Según Karstensen (2005) los costos de esta tecnología por tonelada pueden ser del orden de 1.200 a 2.000 US\$/t dependiendo del contenido de PCB en el aceite.

Reducción con Sodio

Se basa en la declorinación de las moléculas de PCB con el uso de sodio metálico para obtener un aceite que puede ser reutilizado en los transformadores o como insumo en otros equipos (37). El tratamiento químico, cuyo mecanismo se explica por medio de la reacción de Wurtz, consiste en la reacción del sodio metálico con el cloro para la formación de cloruro de sodio y un residuo no halogenado. El proceso se lleva a cabo a presión atmosférica y a una temperatura entre los 100°C y los 180°C. Los desechos no deben contener agua, ya que el sodio es un metal reactivo que se oxida fácilmente y reacciona violentamente con el agua (32).

Es una tecnología aplicada fundamentalmente al tratamiento de aceites de transformador aunque puede destruir algunos plaguicidas. Su eficiencia esta comprendida entre 99% y 99.9% para aceites PCB libres de agua y ha sido utilizada comercialmente durante 25 años aproximadamente con resultados satisfactorios en aceites contaminados con PCB por encima de 10.000 ppm y en transformadores de Askarel. Los costos de esta tecnología están entre US\$150 y US\$500/t¹⁰ dependiendo de la concentración de PCB en el aceite. Dentro de este valor se contemplan los costos del pretratamiento.

¹⁰ Op cit. 10

Descomposición Catalizada por Bases (DCB) (45)

El proceso consiste en tratar desechos líquidos y sólidos en presencia de una mezcla de hidrocarburos (aceites de combustibles pesados o aceites refinados parafínicos), una base (hidróxido de sodio) y un catalizador (formulación de polietilenglicol) a 300°C. Esta mezcla genera átomos de hidrógeno altamente reactivos que se adhieren a los enlaces químicos que confieren toxicidad al compuesto. Se han reportado eficiencias de un 99.99% a un 99.9999% para DDT, HCB, PCB, dioxinas y furanos (ya que no excluye del tratamiento ningún tipo de COP) y capacidades entre 1.000 y 7.000 t/año dependiendo de la concentración del líquido PCB.

Los residuos producidos por la reacción son compuestos de carbono y sales de sodio. Estos residuos de carbono no son tóxicos y por ello pueden disponerse de forma segura. Los aceites se pueden recuperar y reutilizar en un 90% a 95% al igual que el catalizador. Las emisiones de vapor deben pasar por dos condensadores, un enfriador, y un filtro doble de carbón activado antes de ser emitido al aire. Según Karstensen (2005), sus costos se encuentran entre los US\$1.200 y US\$1.500 por tonelada para compuestos con una cantidad de cloro del 50% a una tasa de tratamiento de 3.000 t/año.

Arco de Plasma

Es una tecnología que se basa en someter los desechos orgánicos a una descarga eléctrica de alta energía mediante la ionización del argón a temperaturas muy elevadas por encima de los 10.000 °C a las cuales los compuestos orgánicos se disocian fácilmente. Para evitar la formación de coproductos de desecho (como el hollín) a estas temperaturas, se deben inyectar cantidades controladas de oxígeno para convertir cualquier carbono en monóxido de carbono. Al final del tubo de escape, gracias a un condensador, el gas a 1.500°C es rápidamente llevado a 100°C utilizando una solución alcalina pulverizada. Luego, el gas entra en una torre empacada, donde se enfría y se lava para retirar cualquier residuo de gases ácidos. Los gases de salida se oxidan nuevamente para obtener dióxido de carbono. Otros residuos del proceso son agua y ácido clorhídrico.

Para este proceso los residuos deben ser líquidos o gaseosos y los líquidos no pueden contener partículas con tamaños superiores a 0.5 mm de diámetro. Bajo estas condiciones se han conocido eficiencias de destrucción superiores a 99.999999%. Este valor de remoción es el mas alto dentro de las tecnologías evaluadas. La gran limitación de esta tecnología son sus elevadas demandas energéticas. Los costos pueden estar entre US\$1000 y US\$1500 por tonelada¹¹ sin importar el grado de clorinación de las moléculas. Otras fuentes estiman el costo entre US\$1500 y US\$ 2000 por tonelada (41) para el año 2003 lo que indica que muy probablemente los costos planteados por Karstensen están subestimados. Las actividades que incrementan los costos son la demanda de electricidad, los costos del argón y del oxígeno, los requerimientos de espacio y los equipos de control de emisiones.

Oxidación con agua súper crítica (41, 47)

Es una tecnología que utiliza un agente oxidante como oxígeno o peróxido de hidrógeno para destruir compuestos tóxicos en condiciones de presión y temperaturas elevadas, que superan el punto crítico del agua (374°C y 2218 atmósferas). Bajo estas condiciones, los compuestos orgánicos se solubilizan en el agua y reaccionan rápidamente para generar como productos dióxido de carbono, agua, ácidos inorgánicos y sales. La planta consta de un reactor, inyectores y de un sistema de tratamiento para el efluente, generalmente un separador de gas y líquido. Existe información limitada sobre la formación de coproductos tóxicos, generación de otros COP y análisis detallados de la reacción.

Tiene aplicación en compuestos como clordano, mezclas de 2,4-D, HCB, aldrín, dieldrín y PCB pero no toda bibliografía disponible confirma su aplicabilidad en el tratamiento de PCB y su aplicabilidad se limita a residuos con menos de un 20% de contenido orgánico. Algunas de sus limitaciones son el potencial de formación de dioxinas y los problemas asociados con la corrosión y la precipitación de sales que pueden limitar parte del tratamiento.

¹¹ Ibid.

F. América Latina y los PCB

Si para el mundo el tema de los PCB es reciente, en América Latina se están dando hasta ahora los primeros pasos hacia el manejo adecuado de estas sustancias con la elaboración de inventarios preliminares. Estos inventarios han sido una buena aproximación para dimensionar el problema aún cuando las cantidades están subestimadas probablemente por la falta de participación de los sectores poseedores y de las entidades responsables; es más, ningún país de Latinoamérica tiene un inventario nacional riguroso de reservas y usos de PCB¹², no solo por la falta de colaboración, sino por la falta de conocimiento sobre estos contaminantes, la escasez de recursos humanos y económicos y la ausencia de legislación.

En el gráfico 3 se pueden observar algunos resultados parciales, no oficiales, de los inventarios que se han realizado en la mayoría de los países latinoamericanos. Brasil con 80.000 toneladas es el país con mayor cantidad de PCB pero también uno de los más avanzados en su tratamiento y/o destrucción con la capacidad técnica para utilizar no solo la incineración (3 instalaciones con una capacidad 8 ton/día (36)) como alternativa de destrucción, sino también tecnologías de no combustión para su tratamiento. Colombia ocupa el segundo lugar con un valor promedio de 16.000 toneladas y el resto de países han reportado cantidades muy por debajo de este valor, probablemente debido a la falta de participación anteriormente mencionada o debido a que son resultados del inventario directo y no se tienen en cuenta estimaciones estadísticas que hacen mas aproximada la información; otros resultados no están incluidos porque aun no son públicos.

Los inventarios hacen parte de los planes nacionales de implementación para la gestión de COP y sus resultados oficiales, han permitido diseñar planes y políticas de eliminación para cumplir los compromisos internacionales y eliminar estos productos químicos. Dentro de los planes de eliminación ya se están tomando acciones en varios países. Aunque muchos están exportando sus existencias hacia países de Europa como Alemania y Francia para la eliminación por descomposición térmica, otros como México, Brasil y Argentina están explorando las nuevas tecnologías de no

¹² Información OCADE. Según el reporte del Informe Regional de América Central y el Caribe, realizado en diciembre de 2002 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y denominado "Productos Químicos - Evaluación Regional sobre Sustancias Tóxicas Persistentes"

combustión para hacer el tratamiento en sus países, ahorrar costos y aplicar tecnologías que se acomoden mejor a sus condiciones particulares.

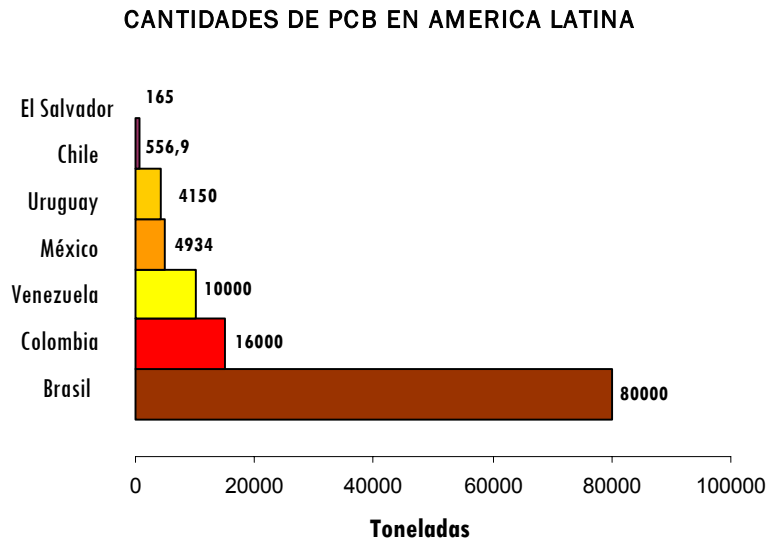
Argentina¹³ está utilizando una tecnología de decloración aprobada que puede descontaminar aceites hasta de 5000 ppm y su planta tiene una capacidad de tratamiento de 250000 litros anuales que equivale a descontaminar 500 transformadores. De la experiencia que han tenido se puede decir que para transformadores con una concentración entre 1000 y 5000 ppm se debe hacer un pretratamiento de enjuague y un tratamiento final de descontaminación; para concentraciones entre 50 ppm y 500 ppm un tratamiento único es suficiente. Bajo estas condiciones se puede decir que la efectividad es del 100%, ya que las concentraciones obtenidas son inferiores a 50 ppm y en el 75% de los casos en la descontaminación de transformadores con una concentración inicial inferior a 500 ppm, se pueden obtener concentraciones finales de 2ppm.

Otros países como México y Brasil ya tienen instaladas algunas plantas para el tratamiento de los líquidos de PCB por técnicas de no combustión. Según la empresa SD Myers existe una planta para la reducción con sodio en Brasil. México ha utilizado la tecnología de Descomposición Catalizada por Bases (DCB) desde 1998.

Además de sus avances en tecnología, Brasil, México, Argentina y otros países de Latinoamérica han formulado y expedido legislación relacionada con el manejo adecuado de los COP que han sido herramientas facilitadoras para su gestión y futura destrucción. Estas experiencias, además de las que ya tienen los países desarrollados hace unos años, fueron parte de los talleres regionales realizados en Uruguay y Brasil gracias a los cuales se ha podido generar una cooperación regional o multilateral entre los países participantes y formular estrategias para compartir laboratorios e infraestructura, de tal forma que se pueda hacer un esfuerzo conjunto en la gestión de los COP.

¹³ Op cit. 2

Gráfico 3. Resultados de Inventarios Parciales de PCB en América Latina



Basado en: OCADE-LITO-SANIPLAN. (2006) *Inventario Preliminar de Compuestos Bifenilos Policlorados – PCB – Existentes en Colombia*. Primer informe. Capítulo 5

G. Los PCB en Colombia

Avances en el tema y solución a la problemática (24)

En 1998 Colombia dio su primer paso para trabajar en el tema de PCB con el intento de elaborar un inventario. El Ministerio de Minas fue el responsable y la información fue recolectada a través de encuestas a empresas del sector eléctrico, la ANDI y ECOPETROL para determinar las cantidades de PCB en sistemas cerrados. Lamentablemente, la participación fue de tan solo el 22% de las empresas consultadas y por ello se subestimó en gran medida el volumen de las existencias. El total estimado fue de 2.000 toneladas.

Luego, en el año de 1999, el gobierno de Canadá por medio del proyecto CERI-COLOMBIA-ACDI en cooperación con el Ministerio de Medio Ambiente, elaboró el “Manual de Manejo de PCB para Colombia” que además de dar a conocer las características generales de los PCB y los problemas asociados por su manejo inadecuado en la salud y el ambiente, dio los lineamientos sobre la forma de identificar equipos posiblemente contaminados, el almacenamiento adecuado, la toma y análisis de

muestras y los planes de respuesta a emergencias. Algunos resultados de estos estudios fueron el programa de capacitación en muestreos para PCB realizado por el IDEAM y desarrollos locales como el del Valle del Cauca de capacitación, sensibilización y expedición de normativa local de carácter preventivo sobre la contaminación con estas sustancias.

Desde entonces, son varios los esfuerzos que se adelantan en torno a los COP. Algunas empresas del sector eléctrico han enviado existencias de PCB a Europa para su eliminación y el MAVDT mediante la Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible ha realizado y asistido a talleres de manejo de COP regionales e internacionales, conferencias sobre experiencias en otros países y actividades relacionadas, que han permitido establecer criterios para la toma de decisiones y acciones conducentes a un manejo adecuado de estas sustancias.

Los adelantos mas destacados en los últimos años (2005 – 2006) han sido el “Inventario Preliminar de Compuestos Bifenilos Policlorados – PCB - existentes en Colombia” elaborado por la unión temporal OCADE-LITO-SANIPLAN y el trabajo elaborado por el CAEMA (Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente) titulado “Evaluación de la capacidad institucional e infraestructura disponible y evaluación del marco regulatorio para la gestión de COP en Colombia” cuyos resultados se han convertido no solo en la base para la realización de otros proyectos sino en el insumo fundamental para perfilar el “Plan de Manejo de Existencias y Eliminación de los PCB” que se encuentra dentro del “Plan Nacional de Aplicación” (PNA) del Convenio de Estocolmo que tiene que presentar el país a la Secretaría del Convenio de Estocolmo, en un periodo no superior a dos años después de que el país haya ratificado el convenio (20).

H. Prospectiva

El concepto nació con Gaston Berger en los años 50 en Francia y se define como una metodología utilizada por el hombre para reducir la incertidumbre del futuro. El futuro, entendido como el producto de la acción del hombre ya que él, es el único responsable de su propio destino (22). El mayor representante de esta corriente, el francés Michel Godet, define la prospectiva como “una forma de reflexión orientada a la acción” (30), es decir, la percepción del futuro como una realidad múltiple, cuya estimación de escenarios probables y deseables reducen la incertidumbre de situaciones futuras.

Para determinar esos futuros probables, la prospectiva se vale de (22):

- ✓ Expertos: Son las personas que conocen a cabalidad los problemas.
- ✓ Actores: Son las personas que toman las decisiones claves
- ✓ Leyes matemáticas de la probabilidad: Es la herramienta que permite ordenar y manejar la opinión de expertos.

Técnicas prospectivas (22) (30)

Son herramientas utilizadas en el proceso de toma de decisiones, que fortalecen la política de participación incorporando la opinión de diferentes tipos de actores sobre el futuro de un fenómeno y que a diferencia de muchos métodos, privilegian la información cualitativa, complementando métodos clásicos para hacer proyecciones. Algunas de estas técnicas se enumeran a continuación:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Tempestad de ideas | 8. Método de estructuras de árbol |
| 2. Análisis estructural | 9. Método Delphi |
| 3. Juego de actores | 10. Método Concensor |
| 4. Método de escenarios | 11. Método Electra II |
| 5. Ábaco de Regnier | 12. Método Múltiplo |
| 6. Método de análisis morfológico | 13. Método Queso |
| 7. Matrices de impacto cruzado | 14. Método Interax |

Estas técnicas están fundamentadas en principios del funcionalismo, estructuralismo y posestructuralismo. La función definida según Spencer, es la contribución que aporta un elemento a la organización del conjunto del cual hace parte y la estructura, según Levi Strauss, es la realidad que se estudia como un sistema, cuyos elementos guardan relaciones de interdependencia.

Análisis estructural

Es una técnica estructural- funcionalista, cuyos objetivos son (30):

1. Obtener una representación completa del sistema a través de la identificación de sus elementos constituyentes.
2. Reducir la complejidad sistémica de las variables principales, mostrando las relaciones más importantes, de unas con otras e identificar variables esenciales.

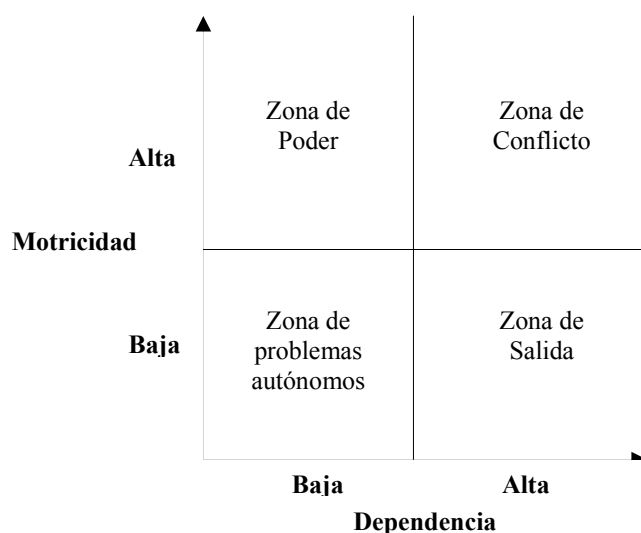
Las variables se explican por la influencia que ejercen sobre otras y por las variables de las cuales depende. Este principio, hace de esta metodología una herramienta útil que detecta variables claves (las que ejercen mayor influencia sobre el resto) utilizando el juicio de expertos (22). Las variables claves son sobre las cuales debe basarse la reflexión sobre el futuro (15).

La influencia entre estas variables puede ser directa, indirecta, real o potencial. La influencia directa ocurre cuando un cambio en la variable A modifica la variable B, la indirecta ocurre cuando un cambio en A, modifica la variable C, la real es cuando sin importar si es directa o indirecta, la influencia ocurre en el momento y la influencia potencial es cuando una variable *debería* influir sobre otra (22).

Las ventajas de esta metodología prospectiva es que además de ser una excelente herramienta para el proceso de toma de decisiones, no describe cómo trabaja un sistema, sino identifica los elementos más importantes en la organización del sistema. Sus limitaciones se reflejan en la subjetividad en la elaboración de la lista de variables y en que la organización de la matriz no representa la importancia

relativa entre ellas (30). La matriz resultante que interconecta todos los componentes del sistema se presenta en la el gráfico 4.

Gráfico 4. Matriz de Análisis Estructural



Tomado de: Mojica, F. (1991) *La Prospectiva. Técnicas para visualizar el futuro*. Editorial Legis. Bogotá. Pág 48

Zona de poder

Las variables que se ubiquen en esta zona de la matriz son muy fuertes y poco vulnerables porque tendrán una motricidad alta y una dependencia baja. Las variables de esta zona influyen sobre la mayoría y dependen poco de ellas, lo que significa, que una modificación en cualquiera, tendrá repercusiones en todo el sistema. Lo anterior explica la razón por la cual se les denomina *variables claves*.

Zona de conflicto

Tienen una motricidad y una dependencia alta. Influyen sobre otras variables pero son así mismo influidas por ellas. Las variables de esta zona son también *variables claves* ya que cualquier variación en ellas tiene efectos en la zona de salida y en ellas mismas.

Zona de salida

Son las variables que son producto de las anteriores, su dependencia es alta y su motricidad baja.

Zona de problemas autónomos

Las variables de esta zona no influyen significativamente sobre las otras variables, ni son influidas por ellas.

I. Evaluación económica de proyectos de inversión (44)

Relaciones de equivalencia entre una suma presente (P) y una suma futura (F)

$$F = P(1 \pm i)^n$$

Esto indica que P, los pesos invertidos en el presente y dejados durante n periodos en un fondo a la i % por periodo, es equivalente a un suma futura (F) al final de los n periodos.

$$P = \frac{F}{(1 \pm i)^n}$$

Esto indica que una cantidad F de dinero ubicada n periodos en el futuro a una tasa de interés i % por periodos, equivalen a la cantidad de dinero actual designada con el símbolo P.

Tasa LIBOR (18)

La tasa LIBOR (Tasa de interés Interbancaria Ofrecida en Londres), es una tasa de interés utilizada como punto de referencia para basar las cotizaciones de operaciones internacionales, que es más flexible que la tasa preferencial de Estados Unidos y que es utilizada, incluso por este país, para préstamos en el exterior y transacciones domésticas.

Se define como la tasa de interés en el mercado de Londres a la cual los bancos ofrecen a otros bancos depósitos a corto plazo y se escogió esta tasa como referencia internacional, por ser Londres el mercado más activo para tales transacciones y cotizar las tasas más confiables del mercado.

VII. METODOLOGÍA

Descripción Metodológica

Este proyecto, es una investigación de carácter descriptivo que se encuentra dividido en tres fases. La primera de recopilación de información y preselección de tecnologías, la segunda de profundización de la información y consulta con expertos para la elección de una tecnología considerada como promisoría para su aplicación en Colombia y la tercera fase de evaluación de la tecnología seleccionada. A continuación se describe la metodología de cada una de las fases y las actividades asociadas para el cumplimiento de los objetivos específicos planteados.

A. Fase I. Identificar la tecnología o grupo de tecnologías de no combustión que pueden ser aplicables en Colombia

Se recopiló información secundaria que permitiera hacer un primer barrido de las tecnologías disponibles para la eliminación de PCB, se organizó la información en tablas y mediante comparación cualitativa y resultados cuantitativos previos de un estudio similar, se seleccionaron las dos tecnologías que tuvieran mayor aplicabilidad en Colombia.

A.1 Identificación de sectores y actores involucrados

Como primera actividad de este proyecto, se identificaron los grupos interesados en el uso de la tecnología, ya sea porque son poseedores de PCB o por su interés social y ambiental en la eliminación de estas sustancias. Los poseedores vistos como responsables de asumir el manejo y costos relacionados con la implementación y otros actores, como instituciones, organizaciones y empresas, cuyas actividades están relacionadas con alguna fase del manejo integral de residuos peligrosos e intervienen en el proceso de transferencia tecnológica.

A.2 Revisión teórica del estado del arte de los PCB y de las tecnologías para su eliminación

Con esta actividad se hizo una verificación del problema, respondiendo a interrogantes como ¿qué son los PCB?, ¿cuáles son sus aplicaciones?, ¿cuál es su historia?, ¿por qué se convirtieron en un problema?, ¿cuáles son los problemas en la salud y en el ambiente?, ¿cuál es el marco legal internacional que regula este tema?, ¿qué grado de desarrollo tiene el manejo de los PCB en el mundo, en América Latina y en Colombia?, ¿qué tipo de tecnologías existen para la eliminación de PCB, en que consisten y cuáles son sus ventajas y desventajas?.

A.3 Selección de fuentes de información objetivas

Se escogió la información proveniente de organizaciones de carácter internacional que desde una perspectiva objetiva, clara y transparente, muestran, sin ningún tipo de interés, un abanico de alternativas para dar solución a un problema.

A.4 Revisión teórica de las tecnologías de no combustión propuestas por la Secretaría de Basilea

Se hizo una revisión de cuáles eran estas tecnologías y su grado de desarrollo. Dependiendo de la fase de desarrollo, se profundizó en el grupo de tecnologías catalogadas como las de mayor viabilidad para ser implementadas en los países en desarrollo y que se podían aplicar al tipo de residuos objeto de análisis.

A.5 Identificación de los criterios de selección

A partir de la información disponible, se hizo una selección de los criterios que permitían evaluar la aplicabilidad de la tecnología a las condiciones del país y los criterios que evaluaban la capacidad del país para cumplir con los requerimientos de la tecnología y se establecieron principios de análisis contextualizados para cada criterio.

A.6 Construcción de tablas informativas de cada criterio para las tecnologías objeto de análisis y comparación de la información de manera cualitativa

En estas tablas se hizo una descripción detallada de cada tecnología con respecto a los criterios técnicos, ambientales y económicos previamente seleccionados.

A.7 Análisis cualitativo

Se comparó la información para cada uno de los criterios y del cruce de criterios para cada tecnología, se establecieron los primeros supuestos para hacer la selección de dos de las tecnologías.

A.8 Consulta de un estudio similar, análisis cuantitativo y confirmación de resultados

Teniendo en cuenta que en la etapa de realización de este estudio se llevó a cabo una investigación en la Universidad de la Salle sobre la formulación de alternativas ambientalmente adecuadas para la eliminación de plaguicidas en desuso, los resultados cuantitativos obtenidos en la etapa de selección de tecnologías, fueron analizados y utilizados para complementar, fortalecer y confirmar los resultados del análisis comparativo realizado previamente.

B. Fase II. Seleccionar una de las tecnologías cuyos criterios operativos, económicos y ambientales sean los más favorables para su implementación en el país

Conociendo las dos tecnologías que podían ser promisorias en el país, se consultaron fuentes de información primarias para profundizar en la información de cada una de ellas, se obtuvieron opiniones de expertos, se definieron los criterios para una tecnología óptima, se evaluaron las dos tecnologías con respecto a la óptima, con ayuda de la metodología de análisis estructural de la prospectiva, se encontraron los criterios críticos de mayor importancia para la selección adecuada de una tecnología que se ajustara a las condiciones del país y a partir de estos resultados, se eligió una tecnología.

B.1 Conformación de la base de datos de fuentes de información primaria

Después de la revisión bibliográfica, se construyó una base de datos donde se encontraban principalmente el correo electrónico y los sitios web de quienes han desarrollado las tecnologías resultantes o han tenido experiencias con ellas.

B.2 Construcción de información secundaria

Se hizo una descripción detallada de las dos tecnologías, en criterios como estado y experiencia en el mercado, pretratamiento mínimo que deban tener los residuos, descripción de la tecnología, especificaciones del proceso y de los equipos, reacciones químicas, eficiencia de destrucción, capacidad, versatilidad, requerimientos de energía, agua, combustible, espacio y personal, ubicación y diseño de la tecnología, volúmenes y costos del reactivo o los insumos, impactos ambientales, residuos generados, emisiones, vertimientos, riesgos, ventajas, desventajas y costos de inversión y operación.

B.3 Consulta de fuentes de información primaria, vía e-mail

Todas las dudas y preguntas resultantes del análisis de la información anterior, se organizaron en un formato que fue enviado a las fuentes de información primaria, quienes, con su respuesta, alimentaron el documento. Adicionalmente, se solicitó por este medio más información que permitiera tener como resultado un documento con la mayor cantidad de información disponible sobre las tecnologías objeto de análisis.

B.4 Construcción de tablas complementarias

Se construyeron con información adicional, obtenida en las actividades anteriores y los comentarios del grupo de expertos sobre algunos aspectos de cada tecnología.

B.5 Definición de los criterios ideales para una tecnología óptima

Teniendo en cuenta que era necesario un parámetro de comparación para escoger sólo una tecnología, se definieron los criterios ideales para la eliminación de aceites PCB y transformadores eléctricos, contextualizados a la situación de Colombia. Esta definición fue posible, gracias a la identificación de los criterios con mejor desempeño de las tecnologías sujetas a análisis de la primera fase.

B.6 Comparación de las dos tecnologías con cada criterio óptimo

Con las tablas informativas del punto 2.1.6 y las tablas complementarias del punto 2.2.4, se pudo determinar cuál de las dos tecnologías se acercaba en mayor medida a cada uno de los criterios óptimos definidos.

B.7 Establecimiento de una metodología de priorización de criterios

En la actividad anterior se pudo determinar cuál de las tecnologías se acercaba a un mayor número de criterios óptimos pero era necesario encontrar cuáles de esos criterios se consideraban como críticos o de mayor importancia para la adaptación de la tecnología al país. La metodología para hacer esta priorización de criterios se describe a continuación:

B.7.1 Juicio de expertos

De los contactos que se hicieron en las fases anteriores, se escogió un grupo de 9 expertos, 7 de talla internacional y 2 de talla nacional para que desde su experiencia, organizaran, de mayor a menor importancia, 17 criterios escogidos durante la actividad 2.1.5, de acuerdo con algunas condiciones específicas del país.

B.7.2 Selección de criterios

Con la respuesta de los expertos, se evaluaron las coincidencias de la organización y se seleccionaron los 7 criterios que los expertos consideraron como los de mayor importancia para la adaptabilidad de una de las tecnologías a las condiciones del país.

B. 7.3 Construcción y evaluación de la matriz

Se construyó una matriz de 7x7 con los criterios seleccionados en la actividad anterior que fue evaluada por el grupo de expertos de acuerdo con la relación entre los criterios.

B.7.4 Metodología de Análisis Estructural

Los resultados de las matrices fueron ingresados a un software para aplicar la técnica del análisis estructural y de acuerdo con la motricidad y dependencia, se hizo la clasificación y priorización de los criterios.

B.8 Selección de la tecnología

Con los resultados de esta priorización de criterios se pudieron encontrar las relaciones entre ellos y la influencia de unos sobre otros. El análisis anterior permitió seleccionar una de las tecnologías.

C. Fase III. Evaluar la potencialidad de implementar la tecnología seleccionada

La información de la tecnología seleccionada, se relacionó con las condiciones específicas del país para hacer estimaciones, se hizo una revisión de los procesos y la capacidad nacional para su implementación y se construyeron escenarios alternativos de comparación que sirvieran como argumento para la toma de decisiones.

C.1 Organización y análisis de los resultados obtenidos por el inventario preliminar de existencias de PCB

Se tomó la información que pudiera ser útil del inventario y a partir de algunos supuestos y cálculos, se consolidaron las cifras que se iban a utilizar para hacer las estimaciones en cada uno de los escenarios.

C.2 Construcción de escenarios

Con el fin de tener un abanico de posibilidades para la eliminación de los aceites PCB y la descontaminación de los transformadores eléctricos, se construyeron tres escenarios, bajo las mismas condiciones, para que pudieran ser comparados en la fase final del proyecto y se pudieran tomar decisiones acertadas frente al problema.

Los tres escenarios escogidos y las actividades asociadas para la construcción de cada uno de ellos se presentan a continuación:

C.2.1 Escenario 1. Exportación de todas las cantidades de PCB existentes en Colombia.

A. Se diseñó un escenario que parte del supuesto que se exportan todas las cantidades de PCB en el año 2006 y se estimaron las cantidades que podrían ser exportadas en el tiempo de eliminación propuesto.

C.2.2 Escenario 2. Limpieza con solventes de los transformadores para su reutilización en el país y exportación de líquidos PCB y materiales porosos.

A. Se hizo un análisis de costos de pretratamiento y eliminación.

B. Se hicieron estimaciones y se plantearon situaciones esperadas.

C.2.3 Escenario 3. Implementación de una de las tecnologías de no Combustión para el tratamiento de los líquidos en el país, limpieza con solventes de los equipos y exportación de PCB puro y materiales porosos.

A. Se identificaron los requerimientos de la tecnología y se hicieron estimaciones para las condiciones del país

En esta actividad, se relacionó la información de cantidades, concentraciones y distribución de PCB en Colombia con la tecnología resultante de la Fase 2. El objetivo de esta actividad, era hacer la primera parte de la contextualización de la tecnología al país y del análisis en el proceso de transferencia tecnológica mediante la correlación de variables que evalúan y determinan la viabilidad del proyecto.

B. Se hizo un análisis de proceso para la identificación de aspectos ambientales de la tecnología

C. Se hizo un análisis de costos a partir de toda la información disponible.

D. Se revisó información sobre el marco legal y la infraestructura nacional para la implementación de la tecnología.

C.3 Comparación entre los Escenarios

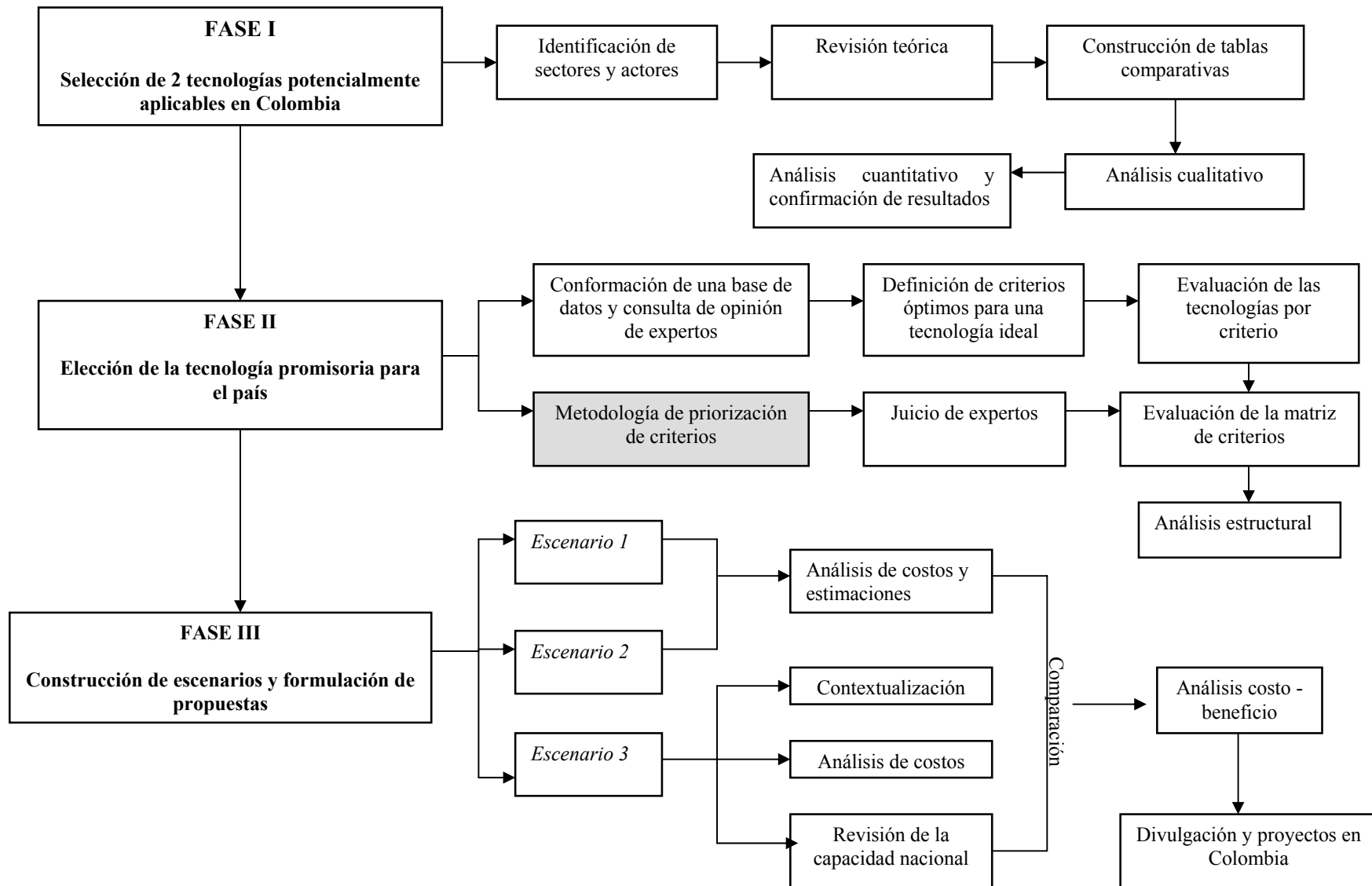
C.3.1 Análisis costo - beneficio

Toda la información anterior se consolidó en un análisis comparativo sobre la viabilidad económica y ambiental de los escenarios, los costos y beneficios de cada uno de ellos y los logros a alcanzar en el plazo de eliminación, para presentar un panorama general de las opciones que tiene el país frente al problema.

C.4 Divulgación de los primeros resultados al sector directamente involucrado y trabajos similares en Colombia

Se hizo un evento de socialización de los resultados en la Universidad de Antioquia, Medellín y se conoció un proyecto en marcha para el desarrollo de una alternativa local.

Esquema 1. Esquema metodológico



VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados corresponden a cada una de las tres fases en las que se dividió la metodología de este proyecto. El cumplimiento de las actividades de cada una de las fases, garantizaron el logro de los objetivos específicos planteados.

A. FASE I. Identificar la tecnología o grupo de tecnologías de no combustión que pueden ser aplicables en Colombia

Para el cumplimiento del primer objetivo se debieron escoger algunos criterios operativos, ambientales y económicos que describieran de una manera integral las tecnologías y permitieran construir tablas informativas de cada una de ellas para hacer la comparación respectiva entre los criterios. En la tabla 3 se presenta la lista de criterios y los principios de análisis que serán utilizados para la discusión de los resultados.

Las tablas 4, 5, 6, 7 y 8, recopilan la información disponible sobre las 5 tecnologías escogidas. Para algunos de los criterios, la información se encontró en unidades de volumen y teniendo en cuenta la necesidad de hacer comparaciones posteriores, algunos datos que se encontraban en unidades de volumen fueron convertidos a peso. Para ello, se parte de la información que el aceite mineral tiene una densidad de $0,85 \text{ g/cm}^3$, el aceite mineral contaminado entre 50 y 1000 ppm de $0,9 \text{ g/cm}^3$ y el PCB puro, por encima de 1000 ppm, de $1,25 \text{ g/cm}^3$.¹⁴ Los criterios que no aparecen en algunas de las tablas, se omitieron por la ausencia de información. Las conversiones realizadas se presentan a continuación:

¹⁴ Gavrilova, H. Comunicación Personal. Octubre de 2006

Tabla 7. *Criterios operativos, ambientales y económicos de la tecnología Reducción con Sodio Metálico*

Requerimiento de agua

Planta fija = 80 L agua / 1000 L de aceite mineral contaminado

1000 L aceite mineral contaminado x 0,9 kg/L = **900 kg**

Requerimiento energía

350 kWh para el tratamiento de 1000 L de residuo con una concentración de 1000 ppm

1000 L residuo con concentración de 1000 ppm x 1,25 kg/L = **1250 kg**

Capacidad

Planta móvil, aceites de transformador (500 ppm) = 3800 L/h

3800 L/h x 0,9 kg/L = 3,420 kg/h = **3,4 t/h**

Tabla 3. Principios de análisis para cada uno de los criterios

Criterios	Principios
Versatilidad	Hace referencia a la flexibilidad de la tecnología. En la medida que una tecnología se adapte a la eliminación de diferentes tipos de residuos, su campo de aplicabilidad va a ser más amplio y consecuentemente existirá una asignación de recursos mayor para su implementación.
Experiencia	La experiencia en otros países es un referente para evaluar el desempeño de la tecnología y su desenvolvimiento en países en desarrollo, la adaptabilidad a condiciones de infraestructura, personal y recursos limitados.
Pretratamiento	En esta fase es donde se llevará a cabo la descontaminación del 69% de los residuos PCB que existen en el país; por esta razón esta fase debe estar incluida en el sistema propuesto por la tecnología y en los costos de tratamiento de los residuos.
Requerimientos de agua, energía, combustible y espacio	Los requerimientos condicionan la ubicación y los lugares de operación de las plantas. Cuando las tecnologías demandan determinados recursos, se limita su capacidad para operar en ciertas zonas.
Requerimientos de reactivos	Es importante tener en cuenta sus características de toxicidad, consultando sus fichas de seguridad y las cantidades demandadas, para determinar el efecto en la generación de residuos.
Requerimientos de personal	Determina el grado de complejidad en el manejo de la tecnología y las posibilidades de generación de empleo.
Eficiencias de Destrucción (DE)	Para que una tecnología sea aceptada y aprobada para la destrucción de plaguicidas obsoletos ¹⁵ debe tener una DE superior al 99.99%. Teniendo en cuenta el grado de toxicidad de los compuestos que se liberan durante la destrucción de COP, se espera que la DE sea del 100%.

¹⁵ En el análisis, se asume este porcentaje para la destrucción de COP.

Criterios	Principios
Capacidad	Es importante tener en cuenta la capacidad anual de las plantas fijas y portátiles para estimar el tiempo aproximado de eliminación. Sin embargo, el único parámetro de comparación que se tiene en este aspecto es la capacidad de las plantas fijas, lo que deja de lado los sistemas móviles que muy probablemente se ajustan en mayor medida a las condiciones del país.
Residuos Sólidos Generados	Las características y cantidades de los residuos determinan su capacidad de reutilización, las necesidades de postratamiento y las alternativas para su disposición final.
Emisiones	Caracterizar los gases de salida permite identificar riesgos y evaluar la necesidad de implementar sistemas de control de emisiones de acuerdo con la regulación nacional.
Vertimientos	El límite máximo permitido depende de la legislación de cada país. Para efectos del análisis, se tomarán los límites máximos permitidos en Canadá que se encuentran en la ficha toxicológica de los PCB disponible en la página del MAVDT. Agua: Concentración permitida para la protección de los peces: 1ppt
Costos	En los costos de operación se deben incluir los costos asociados con pretratamiento, postratamiento y disposición final, para tomar decisiones costo-eficientes en el tiempo.
Riesgos	La valoración de los riesgos permite identificar aspectos críticos que dan confiabilidad a la tecnología.
Valor agregado	Productos que pueden ser reutilizables, ahorros energéticos y reciclaje de materiales incrementan la eficiencia de la tecnología. El análisis de este criterio va ligado al análisis de los residuos generados.

Tabla 4. Criterios descriptivos de la tecnología arco de plasma (28,33,37,41)

Experiencia			Versatilidad				
Operación desde 1992			Pesticidas, dioxinas, furanos, CFC, compuestos clorados y otros compuestos como halógenos de la industria química				
9 Plantas comerciales: 4 en Australia, 1 en Inglaterra y 4 en Japón.			Askarel concentraciones superiores a un 60% de PCB. No aplica a sólidos.				
Criterios Operativos	Requerimientos	Pretratamiento	Agua	Energía	Reactivos	Espacio	Personal
		Absorción térmica o limpieza con solventes	Enfriamiento/Deionización= 1.4 m ³ /h	Un PLASCON de 150 kW requiere entre 1000 y 3000 kWh de electricidad por tonelada de residuo	Argón = 15 m ³ /h	A=12m ² H= 2m	Simple de operar. No requiere habilidades especiales de los operarios
				Entre 250 kWh y 400 kWh para operaciones de enfriamiento	Oxígeno = 0.8 t/t de residuo concentrado		
Desempeño	Capacidad		DE		Configuración		
	Entre 240 t/ año y 720 t/ año ¹⁶		DE= Mayor a 99.9999% DRE= Entre 99.9999% y 99.999999%		Fija y Móvil		
Criterios Ambientales	Residuos sólidos generados			Emisiones		Vertimientos	
	Características		Disposición Final				
	Cantidad = 0.5 g		No se requiere postratamiento de los residuos	79% Argón 18.5% CO ₂ 2% CO 0.5% Agua		Aguas ligeramente alcalinas (Sales de Sodio) pH = 8	
	Esta cantidad no es destruida sólo en caso de que se apague el sistema			Dioxinas y Furanos menores a 0.01 ng-TEQ/Nm ³			
Soluciones Cáusticas			Cantidades		Cantidades		
			Menores a 1ug/Nm ³ a una tasa de 0.5 Nm ³ /h		1m ³ /h con 50 g de NaCl y 5 g de NaCO ₃		
Riesgos		Valor Agregado		Costos Operación		Costos Inversión	
Se considera segura por su funcionamiento eléctrico		Tiempo de residencia de los residuos en la cámara: 20 a 50 milisegundos.		Entre US\$ 1500/t y US\$ 2000/t. Máximo de US\$ 3000/t ¹⁷		US\$ 1 Millón para una planta de 150 kW	

¹⁶ Asumiendo trabajo de la planta por 5 días a la semana, 12 meses en el año. Valor original :1 a 3 t/d

¹⁷ El costo no depende del contenido de cloro. Depende de la estructura molecular y el peso de los residuos, demanda de electricidad, de argón, de oxígeno, de soda cáustica y de la localización del proyecto.

Tabla 5. Criterios descriptivos de la tecnología reducción química en fase gaseosa (28,33,37,41,46)

Experiencia			Versatilidad					
Operación comercial trabajó por 5 años en Australia con eficiencias del %99.9999. Algunos problemas estuvieron relacionados con recuperación del ácido y bloqueo de los intercambiadores de calor.			No es excluyente, cualquier compuesto halogenado					
Tratamiento de residuos PCB en Canadá, Eslovaquia, USA y Japón			Pesticidas como hexaclorobenceno, DDT, Aldrin, Dieldrin, HCB, PCB, agentes químicos, residuos militares, dioxinas y furanos					
Participación en el Programa de Armas químicas de USA para destrucción de armas químicas								
Criterios Operativos	Requerimientos	Pretratamiento	Agua	Energía	Combustible (Gas Natural)	Reactivos	Espacio	
		LWPS= líquidos TRBP=sólidos (Se someten al calor en un ambiente libre de oxígeno a 600°C)	Para el sistema de lavado 48 m ³ /mes		900 kWh por tonelada de sustancias orgánicas puras tratadas	Uso Normal= 20 t/mes	Nitrógeno= 3800 m ³ /mes	Full-escala= 4000 m ² 8 y 10 remolques
		Los compuestos orgánicos se volatilizan y son arrastrados hacia el reactor	Agua enfriamiento ¹⁸ 96 m ³ /h			Uso Máximo= 122 t/mes	Soda Cáustica= 38 t/mes	Semimóvil 1000 m ² 4 remolques
	Remoción de agua innecesaria	CO ₂ = 2260 kg/mes		Móvil 74.4 m ²				
	Desempeño	Capacidad		DE		Configuración		
TRBP = 70 a 90 t/mes LWPS = 86/172 m ³ /m Gran Escala = 840 t/año Portátil = 2 a 50 t/año		DE= 99.9999% DRE> 99.999999% Para una destrucción del 90% de PCB		Escala completa, semimóviles y portátiles				
Criterios Ambientales	Residuos sólidos generados			Emisiones				
	Características	Capacidad de reutilización	Disposición final	Los coproductos sólidos generados se pueden disponer en un relleno				
	Residuos del lavado del gas, agua, y partículas del lavador que luego pueden ser retratadas o enviadas a disposición.	El gas que se libera del reactor se le retira el agua y se almacena para ser reutilizado como combustible	Metano y ácido clorhídrico					
	Hidrocarburos de bajo peso molecular (benceno y etileno)	El agua se recicla en el proceso	Para PCB puro, el proceso genera un exceso de metano					
	Lodo	El sistema de filtro entra al TRBP y luego se reutiliza	Los gases de salida son tratados en un lavador cáustico					
Sistema de filtro	No hay posibilidad de formación de dioxinas y furanos.							

¹⁸ El agua de enfriamiento es considerado un volumen de recirculación.

Riesgos	Valor Agregado	Observaciones	Costos Operación
Transporte y liberaciones de H ₂ .	De un 30% a un 50% del gas generado se utiliza como combustible en las unidades auxiliares.	El nitrógeno es utilizado como amortiguador entre el oxígeno y el hidrógeno	US\$ 1200/t a US\$ 1500/t (Karstensen)
Se debe evitar el contacto con el oxígeno o el aire	El sistema puede operar sin una fuente externa de hidrógeno		US\$ 4000 a US\$ 8000/Ton (Australia)

Tabla 6. Criterios descriptivos de la tecnología descomposición catalizada por bases (28,33,37,41,45)

Experiencia				Versatilidad		
Utilización en: Australia, México, España, Japón, Nueva Zelanda y parte de Europa Central y Occidental.				Todo tipo de COP, no es selectivo		
Desde 1990 se han tratado en usA alrededor de 50.000 t y se han reducido las concentraciones de 10.000 ppm y 5000 ppm a 2000 ppm.				Aplicabilidad en el tratamiento de PCB con concentraciones superiores al 30%.		
Accidentes reportados: 3 Incendios en México y 1 evento explosivo en Melbourne, Australia.				Puede tratar residuos con una concentración de 10.000 ppm		
Criterios Operativos	Requerimientos	Pretratamiento	Agua	Reactivos	Espacio	Personal
		Deshidratación	Enfriamiento 10-15 m ³ /h	Hidróxido de Sodio = Entre 200 y 800 kg/t de residuos a tratar		
		Fase de termodesorción para residuos como el suelo		Aceite donante de hidrógeno = De 150 t/año a 200 t/año de combustóleo No 6		
			Energía	Catalizador = 1% sobre el aceite donante de hidrógeno=0.5 t/año		
	De 100 kWh a 125 kWh ¹⁹					
	Desempeño	Capacidad			DE	Configuración
		Aceites con moderadas o bajas concentraciones de PCB = 7000 t/año			DE= Entre %99.99 y %99.9999	Plantas modulares, fijas y móviles. Diseñada para operar de modo estacionario.
		Para un contenido de cloro elevado (50%) = 1000 t/año				
		Filtros contaminados con polvo = 2.000 t/año				
	Residuos sólidos generados					
Criterios Ambientales	Características	Cantidades	Capacidad de reutilización	Disposición Final	Emisiones	
	Lodo (agua, sales, aceite donante de hidrógeno y compuestos de carbono)	Residuos de carbono salinos= 900-1100 t/1000 t de compuestos clorados (50%)	Si se utilizan aceites refinados (combustóleo No 2) tienen una capacidad de reutilización del 95%	Compuestos alcalinos: Neutralización aguas residuales o relleno sanitario	90% Nitrógeno 10% Hidrógeno Gaseoso	
	Aceite donante de hidrógeno			Aceite donante de hidrógeno y sales: Combustible en hornos cementeros	Cantidad= 3.5 m ³ /h	
	Exceso de reactivo					

¹⁹ Para efectos de comparación, se asume esta demanda energética en el tratamiento de una tonelada de residuo.

Riesgos	Costos Operación	Costos de Inversión
Puede haber autoignición de la fase aceitosa en caso de contacto con aire. Fases de calentamiento y presión	Entre US\$ 1200/t y US\$ 1500/t	Entre US\$ 800.000 y US\$ 1.400.000

Tabla 7. Criterios descriptivos de la tecnología reducción con sodio metálico (28,33,37,41,48)

Experiencia			Versatilidad				
Utilización comercial por más de 20 años			Fundamentalmente aceites de transformador, entre 50 ppm y 10.000 ppm				
Experiencias en países como Alemania, Estados Unidos, Canadá, Francia, España, Inglaterra, Japón y otros países de Europa, Asia y África.			También aplica para la destrucción de SF ₆ contaminado, CFC, clorobenzenos, clorofenoles y pesticidas halogenados como clordano y hexaclorobenceno				
Experiencias en Latinoamérica			La fase de pretratamiento descontamina las carcasas de transformadores y condensadores				
Criterios Operativos	Requerimientos	Pretratamiento	Agua	Energía	Reactivos	Espacio ²⁰	Personal
		Extracción con solventes	Planta móvil = No demanda agua	350 kWh para el tratamiento de 1000 L de residuo con una concentración de 1000 ppm	100 - 500 kg Sodio Metálico /t de PCB	A=17m ² H=2.5m	2 Personas capacitadas
		Caracterización del aceite					
		Deshidratación y desgasificación del aceite	Planta fija 80 L de agua por cada 1000 L de aceite contaminado		Queroseno Alcohol Isopropílico	Área para el acceso de personal 50 m ²	1 Ingeniero Químico. 1 Auxiliar
	Capacidad = 40 t/d, dependiendo de la concentración						
Desempeño	Capacidad	DE		Configuración			
	Planta Móvil, aceites de transformador (500 ppm) = 3800 L/h Planta Fija = 7000 t/año	DE= Entre 99% y 99.9%		Plantas fijas (Cantidades por encima de 2.000.000 L /año) o plantas móviles			
Criterios Ambientales	Residuos sólidos generados			Emisiones	Vertimientos		
	Características	Capacidad de reutilización	Disposición final				
	Cloruro de Sodio, Hidróxido de Sodio, Polibifenilos, Agua, Lodos	El aceite mineral libre de cloro se puede reutilizar como dieléctrico en transformadores	Incineración de materiales porosos	Nitrógeno e Hidrógeno	80 L de agua residual/t de residuo tratado		
Residuos con pH elevados	Se pueden reciclar partes como el cobre, los tanques de acero y las cerámicas	Dioxinas y furanos se pueden formar en condiciones alcalinas a 150°C					

²⁰ Las medidas son para un solo módulo de proceso. Pueden ser 3.

Riesgos	Valor Agregado	Observaciones	Costos Operación	Costos Inversión
Inflamabilidad del hidrógeno	El módulo de regeneración del aceite dieléctrico hace parte del equipamiento de la tecnología	El sistema opera en una atmósfera de nitrógeno para prevenir reacciones del sodio metálico	Entre US\$125/t y US\$ 700/t	Entre US\$ 250.000 y US\$ 1.000.0000
Corrosividad del hidróxido de sodio	Las tierras de Fuller utilizadas para el postratamiento del aceite son regenerativas, lo que elimina la necesidad de disponerlas			
Manejo de voltajes elevados				

Tabla 8. Criterios descriptivos de la tecnología oxidación en agua supercrítica (28,33,37,41,47)

		Experiencia	Versatilidad	
		USA y Japón, eliminación de reactivos de guerra y algunos COP	Todo tipo de COP	
		Sistema piloto en Utah para el tratamiento de compuestos halogenados	Clordano, agentes y armas químicas, residuos orgánicos, explosivos, lodos y suelos contaminados, pesticidas, PCB, compuestos alifáticos y aromáticos halogenados.	
		Las plantas comerciales de gran escala son las del Programa de Armas químicas de los Estados Unidos y una en Japón		
Criterios Operativos	Requerimientos	Pretratamiento	Energía	
		La tecnología se limita al tratamiento de residuos líquidos o un tamaño de partícula menor a 200 µm de diámetro	Consumo elevado por altas temperaturas y presiones	
		Se deben diluir los residuos para lograr un contenido orgánico menor al 20%	Cuanto mas contenido de hidrocarburos haya en el tanque de alimentación, menor energía demanda el proceso	
	Desempeño	Capacidad²¹	DE	Configuración
		Por encima de 400 kg/h	DRE= Mayor a 99.999% para PCB, pesticidas y solventes clorados	Las plantas existentes son fijas pero pueden ser móviles
Para plantas de gran escala 64.8 t/día				
Criterios Ambientales	Residuos sólidos generados		Emisiones	
	Características	Disposición Final		
	Agua, gas y compuestos orgánicos	Para el polvo y la salmuera generada	No contienen óxidos de nitrógeno o gases ácidos	
No hay información de generación de otros COP o concentraciones de dioxinas	Genera menos de 10 ppm de CO			
Observaciones				
Se han formulado nuevos diseños y métodos para que el sistema opere a costos moderados, tenga mayor confiabilidad, supere los problemas de corrosión originados por iones de halógeno y los problemas de encendido, generados por la precipitación de sales				

²¹ No se especifica el tipo de residuo.

Análisis cualitativo por comparación de criterios

Además de hacer una comparación entre los criterios de cada tecnología se hizo una primera contextualización de ellas a las condiciones del país, a partir de los costos actuales de agua y energía para el sector industrial en Colombia (Ver anexo 2). Lo anterior, permitió hacer unas estimaciones de carácter comparativo para dimensionar la demanda de recursos de las tecnologías.

Versatilidad

- ✓ Este criterio no representa mayor importancia respecto a la capacidad de tratar cualquier tipo de COP, dentro de esta primera evaluación, en razón a que la mayor cantidad de COP que hay en Colombia son los PCB. Existen 436 toneladas de plaguicidas en desuso en el país, que comparadas con las 16.000 toneladas de PCB estimadas, es despreciable su aporte como insumo al sistema de tratamiento. Por lo tanto, el aspecto que se tendrá en cuenta, es el rango de concentraciones de PCB que puede tratar.
- ✓ Las tecnologías RQFG, DCB y OASC se pueden utilizar en el tratamiento de todo tipo de COP.
- ✓ Las tecnologías DCB y RSM tienen la capacidad de tratar residuos PCB en concentraciones superiores a las 10.000 ppm a temperaturas moderadas.
- ✓ Existe muy poca documentación respecto a la aplicación de la tecnología OASC en el tratamiento de PCB.

Experiencia

- ✓ Las tecnologías con mayor expansión son la DCB y la RSM ya que han trabajado en más de 5 países y han tenido experiencias en países de Latinoamérica como México y Argentina.
- ✓ La tecnología con mayor experiencia comercial es la RSM con un tiempo que supera los 20 años.

- ✓ La experiencia comercial de la tecnología OASC es limitada. Sólo se conocen dos plantas cuyos contaminantes objetivos han sido agentes y armas químicas y reactivos de guerra.
- ✓ Las tecnologías DCB y RSM tienen accidentes reportados.

Criterios Operativos

Requerimientos

Capacidad

- ✓ Las tecnologías de mayor capacidad son la DCB, la RSM y la OASC. La capacidad anual de las plantas fijas en estas tecnologías está en el orden de 7000 a 10000 t/año.
- ✓ Sólo se cuenta con datos de capacidad de pretratamiento para la RQFG. Esta limitación de información no permite hacer las estimaciones necesarias sobre el tiempo de eliminación.

Pretratamiento

- ✓ Las tecnologías RSM, RQFG y PLASCON incluyen dentro del proceso la limpieza con solventes, como una fase de pretratamiento para la remoción del líquido PCB adherido a las paredes de partes metálicas de transformadores.
- ✓ Se conoce un pretratamiento de termodesorción para suelos contaminados en la tecnología DCB. La información disponible, no evidencia pretratamiento para la limpieza de las partes metálicas de los transformadores.
- ✓ La tecnología OASC se limita al tratamiento de residuos líquidos y a residuos con un contenido orgánico menor al 20%. No puede ser aplicada en el tratamiento de PCB en Colombia, ya que el 68% de los residuos PCB son residuos sólidos.

- ✓ Las tecnologías DCB y RSM requieren de un pretratamiento adicional para la remoción de agua.
- ✓ El agua contenida en los residuos, favorece el tratamiento de la RQFG.

Agua

- ✓ Entre las tecnologías RQFG, DCB y PLASCON que utilizan agua de recirculación para enfriamiento, la que demanda mayor cantidad de agua en esta actividad, por cada hora de operación, es la RQFG. 7 veces más que DCB y 69 veces más que PLASCON. Esto, sin contar con la demanda de agua adicional de esta tecnología para el sistema de lavado.

Energía

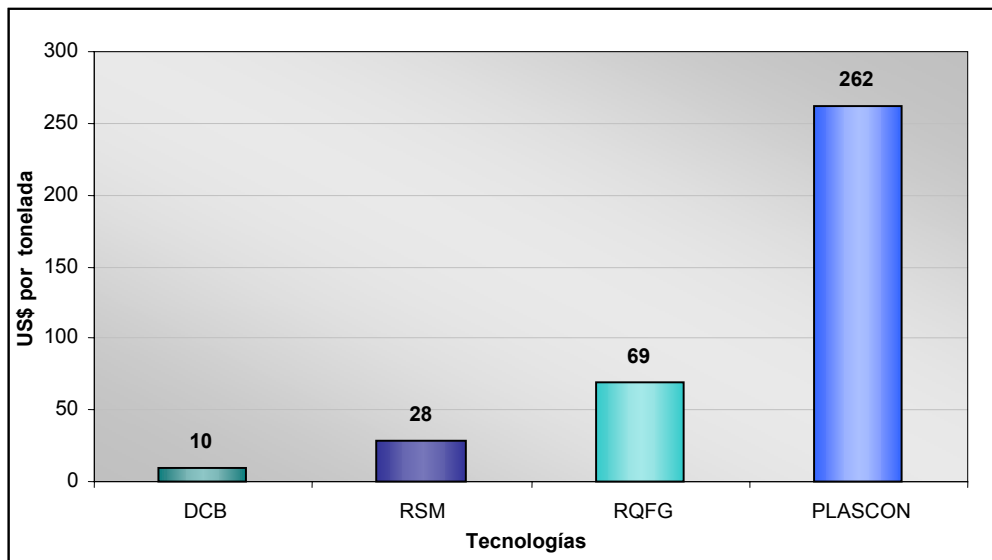
- ✓ El PLASCON es la tecnología que demanda mayor cantidad de energía, no sólo por el consumo del reactor, sino también por el consumo asociado con operaciones de enfriamiento.
- ✓ Las tecnologías PLASCON, RQFG y OASC son las que demandan mayor cantidad de energía, ya que deben alcanzar presiones elevadas y temperaturas en el orden de 10.000°C, 950°C y 400°C, respectivamente.
- ✓ Las operaciones de enfriamiento en el PLASCON consumen la misma cantidad de energía, en el tratamiento de una tonelada de residuo, que lo que consume todo el proceso de RSM y la mitad del proceso de DCB.
- ✓ En la tabla 9 se muestra en orden ascendente la demanda energética de las tecnologías y el costo correspondiente para el tratamiento de una tonelada de residuo, de acuerdo con el costo por kWh para el sector industrial en Colombia.

Tabla 9. Demanda y costo energético para el tratamiento de una tonelada de residuo

Tecnología	Demanda energética máxima (kWh)	Costo (US\$)
DCB	125	10
RSM	370	28
RQFG	900	69
PLASCON	3400	262
		US\$ 0.077/kWh

- ✓ El PLASCON demanda 28 veces más energía por tonelada de residuo tratado que la DCB, 9 veces más que la RSM y 4 veces más que RQFG.

Gráfico 5. Variación del costo de energía por tonelada de residuo tratado



DCB = Descomposición Catalizada por Bases
 RSM = Reducción con Sodio Metálico

RQFG = Reducción Química en Fase Gaseosa
 PLASCON = Arco de Plasma

- ✓ El costo de la energía por tonelada de residuo tratado para el PLASCON y la RQFG es significativamente alto. La gráfica muestra que los costos del PLASCON se elevan significativamente.

Combustible

- ✓ Según la información disponible, la única tecnología que demanda combustible es la RQFG. Teniendo en cuenta que el costo por m³ de gas natural en Colombia para el sector comercial e industrial es de US\$ 3.84, el costo mensual del combustible estaría entre US\$126.000 y US\$ 772.000 dependiendo del uso de la planta.

Reactivos

- ✓ Todas las tecnologías utilizan una sustancia reductora como parte de sus reactantes, para declorinar el residuo y formar sales inocuas que puedan disponerse de forma segura en un relleno o puedan ser utilizadas para la neutralización de aguas residuales de carácter ácido.
- ✓ La relación entre la cantidad de residuo a tratar y la cantidad de sustancias reductoras que demanda cada tecnología se presenta en la tabla 10. Estos valores condicionan la generación de residuos sólidos.

Tabla 10. *Relación de toneladas de sustancias reductoras por tonelada de residuo a tratar*

Tecnología	Relación
RSM	1 : 0,3
DCB	1 : 0.5
RQFG	1 : 1,05
PLASCON	1 : 1,4

- ✓ Aunque las tecnologías RQFG y PLASCON muestran los valores más altos de demanda de sustancias reductoras, generan menor cantidad de residuos sólidos porque los otros insumos utilizados son gaseosos. Las tecnologías DCB y RSM generan residuos adicionales, por la utilización de otras materias primas como los combustóleos (donante de H₂) y el catalizador (acelerador de la reacción) para la DCB y el queroseno (donante de H₂) y alcohol isopropílico (promotor de la reacción), para la RSM, que no están contemplados en la relación y muy probablemente superan las cantidades totales de residuos generados.
- ✓ Los reactivos que requieren mayor cuidado son el sodio metálico en la RSM y los combustóleos 2 y 6 en la DCB. El sodio metálico, reacciona violentamente con el agua en cantidades mínimas liberando gases inflamables (H₂) y puede generar un efecto perjudicial en el ambiente por variación del pH. Aunque los combustóleos (fuel oil) 2 y 6 no se consideran compuestos tóxicos, sus productos de descomposición (óxidos de azufre, dióxido de carbono, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno) tienen efectos nocivos en el ambiente) (13).
- ✓ El catalizador (polietilenglicol), utilizado en la tecnología DCB, es un producto no peligroso, soluble en agua que tiene una biodegradabilidad superior al 80% (13).
- ✓ El nitrógeno y el argón utilizados en las tecnologías RQFG y PLASCON no tienen riesgos asociados por liberaciones incontroladas si se garantizan condiciones de ventilación.

Configuración y Espacio

- ✓ Las tecnologías de no combustión evaluadas se ajustan a las limitaciones de espacio y localización de los contaminantes, en los países en vía de desarrollo, ya que ocupan áreas reducidas y su configuración puede ser fija o móvil.
- ✓ La tecnología que demanda mayor área es la RQFG. Una planta fija puede ocupar 4000 m² y una móvil 75 m², a diferencia del PLASCON, por ejemplo, que sólo demanda 12m² en una unidad móvil.

Personal

- ✓ Los requerimientos de personal para operar las tecnologías son pocos. Se necesitan como máximo 5 trabajadores capacitados en una planta. Esto evidencia que el grado de complejidad no es elevado y la implementación de las tecnologías como fuentes de generación de empleo directo, no tiene efectos importantes en la economía; los beneficios adicionales de su utilización, están relacionados con el mercado de los residuos que pueden incorporarse nuevamente al sector industrial y los que se valorizan para su reutilización.

Desempeño

Eficiencias de Destrucción

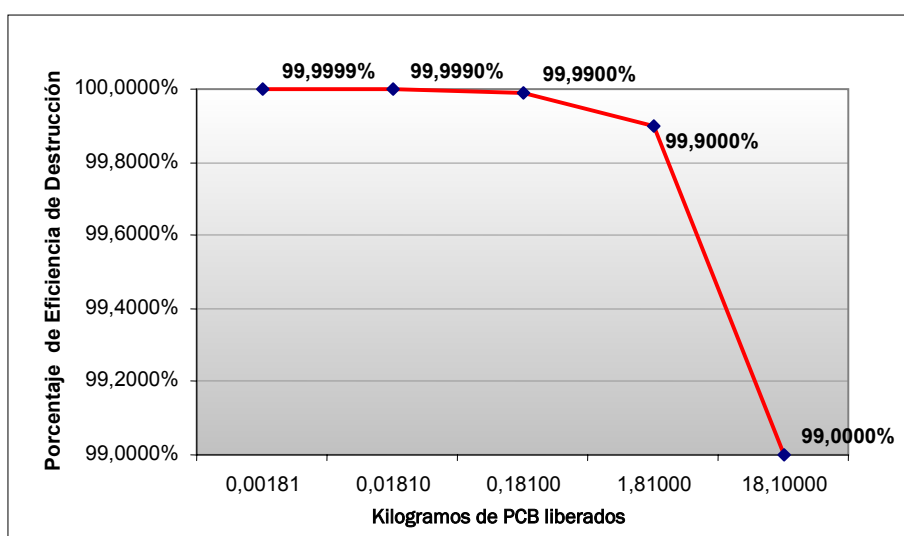
Este criterio es determinante para la selección de una tecnología, ya que evalúa el grado de destrucción de COP y la remanencia de sustancias tóxicas en el ambiente. El análisis se concentrará en la DE, teniendo en cuenta que considera todas las descargas ambientales en su fórmula.

- ✓ Las mayores DE las tienen el PLASCON y la RQFG con eficiencias en el orden de 99.9999%.
- ✓ La tecnología que presenta una menor DE es la RSM cuyo rango se encuentra entre 99% y 99.9%.

- ✓ En el Gráfico 6 se evidencia la importancia del 0.009 o 0.0009 de diferencia entre las eficiencias de destrucción de las tecnologías, mostrando la relación entre la eficiencia de destrucción (%) y las cantidades de PCB liberados al ambiente para la situación de Colombia. De las 16.731 toneladas de PCB estimadas en el país, el 22% se encuentra en aceite mineral contaminado por encima de las 50 ppm y por debajo de 1000ppm. Suponiendo que todo el aceite tiene una concentración de 500 ppm o del 0.05%, las cantidades de PCB que hay en este aceite se encuentran alrededor de 1,81 toneladas. La gráfica se construyó asumiendo que la remoción de las 1,81 toneladas es una DE= 100%.

Gráfico 6. Eficiencias de Destrucción y PCB Liberados

DE (%)	Kg PCB Liberados
99,9999%	0,00181
99,9990%	0,01810
99,9900%	0,18100
99,9000%	1,81000
99,0000%	18,10000



- ✓ La diferencia entre eficiencias de un 99% y un 99.9% incrementa considerablemente las cantidades de COP que se liberan del sistema. Si la eficiencia de una tecnología es del 99%, la eliminación de 3621 toneladas de aceite mineral contaminado (total de aceite contaminado que hay en el país), liberaría alrededor de 18 kg de PCB. Eficiencias del 99.9%, tan sólo liberarían 2 kg de PCB. El 0.9% de diferencia, aparentemente irrelevante, libera 9 veces más de PCB fuera del sistema.
- ✓ Si se comparan las tecnologías de mayor y menor DE evaluadas, es mucho más evidente la tendencia exponencial a la generación de residuos. Una diferencia en la DE de 0.0999%, entre el PLASCON (DE= 99.9999%) y la RSM (99.9%), para la situación de Colombia, liberaría 1000 veces más de COP.

Criterios Ambientales

Residuos Sólidos Generados

- ✓ La tecnología que genera menos residuos es el PLASCON.
- ✓ Las tecnologías DCB, RSM y PLASCON generan residuos de pH elevados por la utilización de bases en la reacción. Estos residuos pueden ser utilizados para la neutralización de aguas residuales o disponerse de forma segura en un relleno sanitario.
- ✓ Todas las tecnologías generan lodos, de pH elevados, con un contenido variado de residuos, que deben ser caracterizados para determinar las necesidades de postratamiento y hacer una disposición final adecuada de ellos.
- ✓ Residuos comunes de las tecnologías son hidrocarburos libres de cloro, que pueden ser utilizados como suplemento de combustibles en otros procesos industriales como los hornos de fabricación de cemento.

- ✓ La tecnología DCB genera una cantidad de productos que sobrepasa la cantidad de residuos tratados. Los productos que pueden ser reutilizados, deben tener especificaciones de calidad que incrementan considerablemente los costos del reactivo.
- ✓ Las tecnologías RSM y RQFG son las que reutilizan y aprovechan en mayor medida los residuos de la reacción, disminuyendo significativamente las necesidades de disposición final. La utilización del gas resultante como combustible en el mismo proceso de la RQFG y la reutilización del aceite como dieléctrico en la RSM, aumenta el valor agregado de estas tecnologías.

Emisiones

- ✓ Como son tecnologías que operan en condiciones de reducción, no liberan óxidos de nitrógeno o azufre que son contaminantes atmosféricos. Los gases emitidos dependen de los insumos de la reacción.
- ✓ Las tecnologías DCB y RSM liberan nitrógeno e hidrógeno gaseoso. El nitrógeno en su forma gaseosa no es tóxico, pero la liberación de grandes cantidades en lugares confinados puede desplazar la concentración de oxígeno y generar problemas de asfixia²². El hidrógeno se considera una sustancia peligrosa ya que es sumamente inflamable y tiene peligro de incendio y explosión.
- ✓ El argón liberado en el PLASCON tiene el mismo efecto del nitrógeno gaseoso, puede generar asfixia, ya que es más denso que el oxígeno y se concentra en zonas bajas. No se conocen efectos toxicológicos de este gas.
- ✓ Como se explicó anteriormente parte del metano liberado por la RQFG puede ser utilizado como combustible en las unidades auxiliares. Se libera entre un 50% y un 70% del gas. Se deben tener las respectivas precauciones ya que es inflamable.

²² Hoja de Seguridad Nitrógeno Gaseoso. Recuperado de: [http://www.aga.com.ar/international/web/lg/ve/likelgagave.nsf/repositorybyalias/pdf_msds_n/\\$file/Nitrogen.pdf#search=%22ficha%20de%20seguridad%20nitrogeno%20gaseoso%22](http://www.aga.com.ar/international/web/lg/ve/likelgagave.nsf/repositorybyalias/pdf_msds_n/$file/Nitrogen.pdf#search=%22ficha%20de%20seguridad%20nitrogeno%20gaseoso%22). Octubre de 2006

Vertimientos

- ✓ La información disponible sobre este parámetro es limitada. Sin embargo, se puede decir que las aguas residuales de la DCB, RSM y PLASCON tienen pH elevados.
- ✓ La tecnología RSM generaría aproximadamente 259 m³ de agua residual para tratar las 3229.44 toneladas de aceite mineral contaminado que se estima, hay en Colombia. Este valor no se considera un volumen significativo, debido a que el periodo de tiempo es prolongado.
- ✓ La tecnología PLASCON generaría alrededor de 8.600 m³ de agua residual para tratar las cantidades de aceite mineral contaminado que hay en Colombia, asumiendo una capacidad de 1 a 3 toneladas al día, con un tiempo de operación diario de 8 horas. Esto significa que el PLASCON genera 30 veces más agua residual que la RSM.

Criterios Económicos

- ✓ Los costos de operación de la tecnología RSM son 4 veces menores que los de las tecnologías DCB y PLASCON y están hasta 15 veces por debajo de los de la tecnología RQFG.
- ✓ Los costos de inversión de las tecnologías son similares. Este costo puede estar en 1 millón de dólares.

Riesgos

- ✓ En términos de riesgos, se considera como la tecnología más segura el PLASCON, puesto que su funcionamiento netamente eléctrico, permite apagarla en caso de cualquier irregularidad o inestabilidad del proceso.
- ✓ Los riesgos asociados de mayor importancia de las tecnologías RSM y RQFG, están relacionadas con el manejo de los reactivos.

Análisis Cuantitativo

Gracias a los resultados de un estudio paralelo elaborado en la Universidad de la Salle por el Ingeniero Ambiental y Sanitario Juan Cárdenas, entregados en el mes de Mayo del presente año, titulado “Formulación de alternativas ambientalmente apropiadas para la disposición final de plaguicidas en desuso incautadas por el Estado”, se pudieron alimentar los análisis cualitativos del presente estudio. Cárdenas, utilizó una metodología propuesta por el Panel Consultivo Técnico y Científico del GEF para la selección de tecnologías y la adaptó a la información disponible mediante una escala binaria, para hacer una valoración cuantitativa de criterios técnicos, ambientales y económicos de tecnologías para la eliminación de plaguicidas en desuso y con una ponderación, obtuvo con los resultados mas bajos, las tecnologías promisorias para el país.

Aunque las tecnologías evaluadas por Cárdenas no son las mismas que evalúa este proyecto, las conclusiones son de gran utilidad para dar solución a la eliminación de COP en Colombia. A continuación se presentan los resultados y se hace un análisis complementario de ellos.

Tabla 11. Resultados del proyecto “Formulación de alternativas ambientalmente apropiadas para la disposición final de plaguicidas en desuso incautados por el Estado”. Cárdenas, 2006

CLASIFICACIÓN	TECNOLOGÍA	PONDERACIÓN TOTAL	VALORACIÓN
1	DCB	400	Tecnología promisoría
2	RSM	550	Tecnología promisoría
3	Co-incineración	800	Promisoría con revisions
4	Incineración	1000	Promisoría con revisions
5	RQFG	1050	Promisoría con revisions
6	PLASCON	1050	Promisoría con revisions
7	Subcrítica	1050	Promisoría con revisions
8	OASC	1150	No promisoría
9	HDC	1100	No promisoría

Discusión de resultados del análisis cuantitativo

- ✓ Según los resultados de Cárdenas, las tecnologías consideradas como promisorias para el país son la DCB y la RSM. La diferencia de 150 puntos entre las dos tecnologías, está dada por la versatilidad de la tecnología DCB frente a la RSM para tratar plaguicidas. Otros núcleos de ponderación cuyos valores incrementaron el puntaje de la RSM, fueron los requerimientos técnicos, de personal y de pretratamiento.

- ✓ Las tecnologías RQFG y PLASCON son consideradas promisorias con revisiones. La razón fundamental de esta categorización y de sus elevados valores en la evaluación, es que se castigan casi todos los criterios que se encuentran en el núcleo de recursos necesarios, fundamentalmente los relacionados con costos, requerimientos técnicos, energéticos, de reactivos, de laboratorio y de personal. Otros criterios con valoraciones altas, son el de experiencia en otros países para la RQFG y el de las cantidades requeridas para el PLASCON.

- ✓ La OASC no se considera promisorio fundamentalmente por su limitada experiencia. A esto se suman los recursos necesarios, el desempeño y el proceso de transferencia tecnológica.

Análisis de resultados de la fase I

- ✓ La tecnología OASC no se considera una alternativa promisorio para el tratamiento de las existencias de PCB en el país, no sólo porque cuenta con una experiencia comercial limitada, sino porque no es versátil para el tipo de residuos que se espera descontaminar. El tratamiento que realiza se reduce a compuestos líquidos y no cuenta con una fase de pretratamiento para limpiar las partes metálicas que constituyen el 69% de los residuos PCB que hay en Colombia. A esto se suma la falta de información respecto a la formación de otros COP, de subproductos y de la cinética de la reacción, el potencial para la formación de dioxinas y problemas asociados con corrosión y precipitación de sales.

- ✓ Además que la tecnología RQFG es la segunda con una mayor demanda energética, el consumo de combustible (gas natural) es el factor que incrementa considerablemente los costos de operación en el tratamiento de los residuos. Los requerimientos de la tecnología son muy elevados, lo que se verá representado en sus costos. No hay experiencias conocidas en países de América Latina.

- ✓ Para las tecnologías evaluadas, se trabaja con DEs elevadas teniendo en cuenta la toxicidad de las moléculas sujetas a destrucción. Se debe tener en cuenta que aunque la RSM libera 1000 veces más de residuos que el PLASCON, los residuos que salen del sistema no son necesariamente liberados al ambiente. Los residuos líquidos, son en su mayoría aceites minerales que pueden ser incorporados nuevamente al sector industrial como dieléctrico, en concentraciones por debajo de las 50 ppm, que no se considera tóxico. La gráfica muestra cómo mínimas variaciones en las eficiencias de destrucción, generan efectos importantes sobre el ambiente.

- ✓ Respecto a los residuos generados, la mayor cantidad de productos de estas tecnologías son residuos sólidos, como aceites, lodos, sales y excesos de reactivo. Las emisiones y vertimientos no se consideran significativo motivo de preocupación.

De acuerdo con el análisis cualitativo y cuantitativo se puede concluir que las tecnologías consideradas como promisorias para Colombia son:

- ✓ La tecnología RSM porque cuenta con una experiencia comercial de más de 20 años, tiene experiencias positivas en países en vía de desarrollo como Brasil, Argentina e Islas del Caribe, se adapta a las limitaciones de espacio y personal capacitado del país, demanda cantidades de energía y reactivo bajas, tiene costos muy por debajo de todas las tecnologías disponibles actualmente en el mercado y el aceite obtenido puede utilizarse nuevamente como dieléctrico en el sector industrial.
- ✓ Entre las limitaciones de la reducción con sodio metálico están los riesgos de seguridad en el almacenamiento y manejo del sodio metálico y los valores teóricos más bajos de eficiencia de destrucción entre las tecnologías analizadas. No obstante existen varias patentes en países desarrollados que han mejorado el desempeño de la reacción y con ello, muy probablemente las eficiencias de destrucción.
- ✓ La tecnología DCB porque cuenta con un porcentaje de remoción superior al límite mínimo, tiene experiencia en el tratamiento de grandes cantidades de líquidos PCB en México cuyos rendimientos han sido considerablemente altos, sus requerimientos energéticos son los más bajos de las tecnologías objeto de comparación por las temperaturas a las que opera, el catalizador que utiliza se puede recuperar y el aceite utilizado como donante de hidrógeno, si es de buena calidad, puede ser reutilizado con una recuperación de hasta el 95% y si no, puede servir como combustible en hornos de cemento. El residuo de carbono que se genera no es tóxico y puede disponerse de forma segura en un relleno sanitario. Entre sus limitaciones está que la cantidad de residuos sobrepasa la cantidad de residuos tratados.

B. FASE II. Seleccionar una de las tecnologías cuyos criterios operativos, económicos y ambientales sean los más favorables para su implementación en el país

Las tablas 12 y 13 corresponden a la información obtenida por fuentes primarias y la opinión de expertos acerca de las dos tecnologías consideradas como promisorias para el país. A partir de esta información, las tablas 6 y 7 y la definición de criterios para una tecnología óptima en el tratamiento de aceites PCB y transformadores en Colombia que se presenta en la tabla 2.3, se pudo determinar para cada uno de los 15 criterios, cuál de las tecnologías se acercaba a un mayor número de criterios óptimos. La formulación de criterios para la tecnología óptima, se basó en la selección de los criterios de mejor desempeño para el grupo total de tecnologías a partir del análisis realizado en la fase I. Los resultados de esta evaluación se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 12. Información obtenida por fuentes primarias y opinión de expertos sobre la tecnología Reducción con Sodio Metálico

REDUCCIÓN CON SODIO METÁLICO		
Experiencias	Cantidad de países	21
	Países de América Latina	9
	Comentario	
"La tecnología RSM fue la primera tecnología extranjera permitida para operar en Japón". (Comunicación personal, González, Mayo 21 de 2006)		
Cond. de Reacción	Temperatura	Entre 90°C y 165°C
	Sistema completamente cerrado	Lo que permite tener bajo control las condiciones de reacción
Residuos Sólidos	Cantidades	Capacidad de Reutilización
	20 kg/1000 L aceite tratado	En algunos casos se puede reutilizar el reactivo
	1kg lodo/t de residuo tratado	Para hacer reciclaje de los materiales constituyentes del transformador la concentración no debe superar las 500 ppm.
	Comentario	
"La ventaja mas grande de esta tecnología es la posibilidad de reutilizar el aceite después de la descontaminación" (Comunicación personal, Lee, Mayo 17 de 2006)		
Emisiones	Comentario	
	"No existe la posibilidad de formación de dioxinas y furanos" (Comunicación Personal, Seikel, Julio 24 de 2006)	
Minimización de Riesgos	Sistemas de Seguridad	Alarmas y monitoreo automático para hidrógeno, oxígeno y combustibles
		Atmósfera inerte
		Remoción de agua y alcoholes de los residuos
		Manejo especial del sodio metálico
	Equipos de Seguridad	Extintores y Manuales
		Materiales absorbentes y plásticos protectores

Tabla 13. Información obtenida por fuentes primarias y opinión de expertos sobre la tecnología Descomposición Catalizada por Bases

DESCOMPOSICIÓN CATALIZADA POR BASES		
Experiencias	Cantidad de países	11
	Países de América Latina	1
	SD Myers (Empresa que desarrolla la tecnología RSM), intentó comprar los derechos de la tecnología DCB y gastó cientos de millones de dólares intentando convertir la tecnología en una alternativa económicamente viable y ambientalmente amigable. Los estudios demostraron que no era posible. (Comunicación personal, Miller, Junio 4 de 2006)	
	Caso España: IHOBE hizo pruebas de laboratorio con la tecnología para la declorinación de residuos PCB 100%. (Comunicación personal, Herrera, Mayo 23 de 2006)	
	Comentario	
	"Desde nuestra experiencia la tecnología para el tratamiento de PCB puro, es de todo punto inviable" (Comunicación personal, Barquin, Julio 17 de 2006)	
Versatilidad	"...según otros países, la tecnología es útil para tratar PCB disuelto (Aceite Mineral Contaminado)." (Comunicación personal, Barquin, Julio 17 de 2006)	
	Comentario	
	"La tecnología DCB no permite descontaminar el aceite para su reutilización." (Comunicación Personal, Paquin, Mayo 17 de 2006)	
Cond. de Reacción	"La planta DCB puede ser implementada en el país y luego de terminar el tratamiento de PCB, ser utilizada para el tratamiento de otro tipo de residuos tóxicos." (Comunicación Personal, Opperman, Junio 8 de 2006)	
	El aceite utilizado como donante de hidrógeno es clave para la viabilidad de la reacción química	
	Comentario	
Residuos Sólidos	"Se produce una reacción exotérmica de complejo manejo con desprendimiento de gases a una temperatura de 350°C, que aunque se regula por la adición de catalizador y sosa, la respuesta no es siempre la misma, luego hay variables no controladas" (Comunicación Personal, Barquin, Julio 17 de 2006)	
	Características	Capacidad de Reutilización
	La masa de reacción es densa, espesa y viscosa. Compuesta por aceite, agua, sosa (se añade en exceso) cloruro de sodio, bifenilo, coque (aparece durante la reacción) y otros hidrocarburos.	Reutilización del catalizador y del aceite
	Comentarios	
	Cantidades Generadas	
"La cantidad de residuos puede <i>triplicar</i> en masa a la cantidad inicial de PCB procesado, por las sales generadas" (Comunicación Personal, Miller, 4 de Junio de 2006)		

Residuos Sólidos	<p>“..... la masa de reacción fácilmente puede triplicar en masa a la cantidad inicial de PCB procesado. Nosotros fuimos incapaces de encontrar (y dudamos que exista) ningún procedimiento que permitiera separar esas fracciones para purificarlas por separado (extracción con solventes, centrifugación o disolución). Obteníamos por tanto, tras la reacción, un residuo peligroso (según la legislación vigente) que debíamos tratar utilizando vías similares que las que se utilizan para el propio PCB, pero además habíamos <i>triplicado</i> el volumen” (Comunicación personal, Barquin, Julio 17 de 2006)</p>
	<p>"El tratamiento no genera subproductos tóxicos". (Comunicación Personal, Opperman, Junio 8 de 2006)</p>
	<p>Separación del Residuo</p>
	<p>"En España, hubo problemas con la separación del residuo generado que hizo inviable su aplicación industrial en el país". (Comunicación Personal, Carrera, Mayo 23 de 2006)</p>
	<p>"No hay procedimiento capaz de separar las fracciones de la reacción para purificarlas por separado. Hubo intentos con extracción con solventes, centrifugación y disolución". (Comunicación personal, Barquin, Julio 17 de 2006)</p>
Emisiones	<p>Comentarios</p>
	<p>"El proceso DCB es más caro y por operar a temperaturas mayores tiende a la formación de dioxinas (Comunicación Personal, Lee, Mayo 17 de 2006)</p>

Tabla 14. Definición de criterios para una tecnología óptima

CRITERIO	CARACTERÍSTICAS DE UNA TECNOLOGÍA IDEAL PARA EL TRATAMIENTO DE ACEITES PCB Y TRANSFORMADORES EN COLOMBIA
1. Estado y experiencia	Tiempo de operación superior a 20 años, experiencias positivas en más de 15 países y expansión hacia América Latina
2. Requerimientos de pretratamiento	Remoción del aceite adherido a las partes metálicas de transformadores para reutilización del 100% de los equipos eléctricos
3. Requerimientos de postratamiento	Simples. Mejoramiento de la calidad del aceite y reducción de la toxicidad de los subproductos resultantes a costos mínimos
4. Eficiencia de destrucción	100%
5. Concentración final de PCB en los residuos	Inferior a 50 ppm de acuerdo con la legislación que acoge el país
6. Condiciones de reacción	Operación bajo temperaturas mínimas y ambientes inertes
7. Aplicabilidad a otro tipo de COP	Todo tipo de COP y en lo que respecta a PCB concentraciones superiores a las 1000 ppm
8. Requerimientos de agua, energía y combustible	Demanda mínima de recursos
9. Características y demanda de reactivo	Pocas cantidades, toxicidad nula y biodegradabilidad del 100%
10. Configuración de las plantas y demanda de espacio	Móvil para evitar el transporte de PCB por el país
11. Demanda de personal	Grado de especialización bajo y número de trabajadores alto
12. Residuos sólidos generados	Cantidades mínimas (1%), toxicidad baja, fácilmente incorporables a los ciclo bio-geo-químicos
13. Capacidad de reutilización o reciclaje de materiales	100%. Incorporación del reactivo y el residuo al proceso de tratamiento o a otros procesos industriales
14. Residuos líquidos	Cantidades mínimas. pH neutros.
15. Emisiones	Gases Inertes
16. Riesgos	Identificación de eventos que pueden generar accidentes y planeación de acciones para ejercer control sobre ellos.
17. Costos	Inferiores al costo por tonelada de la exportación

Tabla 15. *Tecnologías que más se acercan a criterios óptimos*

CRITERIO	TECNOLOGÍA QUE MÁS SE ACERCA A LA IDEAL
1	2
2	2
3	2
4	1
5	0
6	2
7	1
8	0
9	0
10	0
11	0
12	2
13	2
14	1
15	0
16	0
17	0

Donde:

0= Las tecnologías se encuentran en condiciones similares y no se considera una mejor que otra en el criterio evaluado

1= Descomposición catalizada por bases

2= Reducción con sodio metálico

Discusión de los resultados

De los 17 criterios evaluados, la tecnología RSM se acerca a 6 de los criterios óptimos y la DCB a 3.

Las razones se exponen a continuación:

1. Estado y experiencia (2)

La tecnología RSM es de todas las tecnologías la que tiene mayor experiencia comercial, con un tiempo superior a 20 años. Tiene experiencia en 9 países de Latinoamérica y 21 países del resto del mundo.

2. Requerimientos de pretratamiento (2)

Parte de la tecnología RSM es la limpieza con solventes de las partes metálicas de los transformadores. Para la DCB no se conoce pretratamiento para este tipo de residuos. El único conocido es la termodesorción para suelos contaminados.

3. Requerimientos de postratamiento (2)

La RSM es la única tecnología evaluada selectiva. Mejora la calidad del aceite y disminuye su toxicidad a concentraciones mínimas aceptables.

4. Eficiencia de destrucción (1)

La DCB sobrepasa en 0,099% la DE de la RSM y puede llegar a eficiencias del orden de 99.9999%.

5. Concentración final de PCB en los residuos (0)

Tanto la RSM como la DCB logran concentraciones finales inferiores a las 50 ppm. Se han reportado concentraciones finales mínimas para las dos tecnologías de 2 ppm.

6. Condiciones de la reacción (2)

La RSM opera a temperaturas máximas de 165°C. La DCB puede superar los 360°C. Con el incremento de la temperatura, aumenta la probabilidad de formación de dioxinas y furanos.

7. Aplicabilidad a otro tipo de COP (1)

La tecnología DCB no es selectiva para ningún tipo de COP y ha tenido experiencia con gran variedad de ellos. A diferencia, la RSM ha sido probada en su mayoría, para los aceites de transformador y las experiencias con otros compuestos sólo se conocen en Japón.

8. Requerimientos de agua, energía y combustible (0)

Aunque las tecnologías consideradas promisorias no demandan combustible durante su operación, tienen requerimientos de agua y energía que no son muy claros y por ello no se puede tomar una decisión de cual tiene un mejor desempeño para este criterio.

9. Características y demanda de reactivos (0)

La información disponible muestra algunos de los reactivos utilizados en cada una de las reacciones pero son varias las sustancias desconocidas, patentadas por las empresas, que impiden hacer un análisis de su toxicidad.

10. Configuración de las plantas y demanda de espacio (0)

Las dos tecnologías están diseñadas para ser portables. Esto cumple con el requisito óptimo requerido.

11. Demanda de personal (0)

Los requerimientos de personal son bajos para las dos tecnologías, el ideal para este criterio es la generación de empleo.

12. Residuo sólidos generados (2)

Fueron 2 las comunicaciones personales que coincidieron en el argumento sobre la tecnología DCB en la generación de 3 veces más de residuos que la cantidad inicial de residuo a procesar. Estos comentarios fueron la base para la calificación de este criterio.

13. Capacidad de reutilización o reciclaje de materiales (2)

Además de aprovechar las carcasas metálicas como chatarra después del pretratamiento, la tecnología RSM incorpora nuevamente en el sector industrial el aceite tratado como dieléctrico.

14. Residuos líquidos (1)

Como el agua utilizada por la tecnología DCB es de recirculación, los vertimientos son mínimos. A diferencia, la demanda de agua de la RSM es para neutralizar el exceso de reactivo y esto se representa en vertimientos cargados de sustancias químicas.

15. Emisiones (0)

Como las tecnologías operan a bajas temperaturas, ambientes inertes y sistemas cerrados, las liberaciones son despreciables.

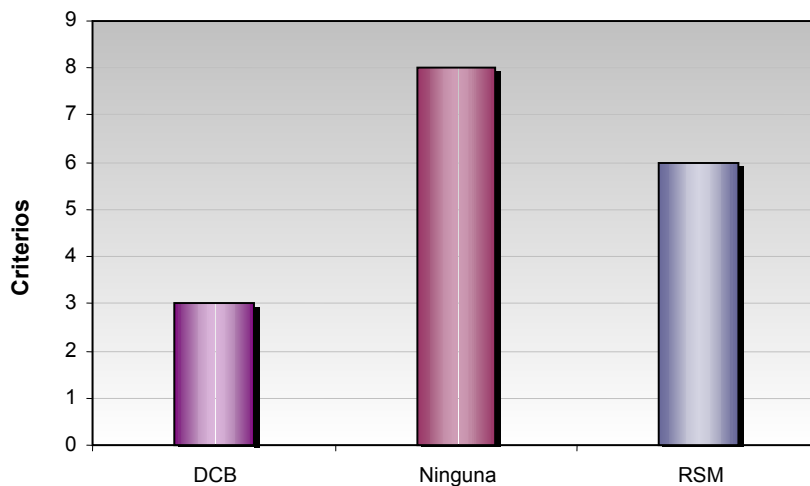
16. Riesgos (0)

Se ha intentado conocer a profundidad los reactivos y las condiciones de reacción del proceso. No obstante, el sistema sigue siendo un caja negra y con ello los riesgos asociados de operación.

17. Costos (0)

Las dos tecnologías tienen costos muy por debajo del costo por tonelada actual de exportación de los PCB.

Gráfico 7. *Distribución del número de criterios óptimos a los que se acercan las tecnologías descomposición catalizada por bases y sodio metálico*



En la gráfica 3 está la distribución del número de criterios óptimos a los que se acercaron las tecnologías consideradas óptimas en la primera fase de este proyecto. Sin embargo, son 8 los criterios en los cuales, las tecnologías se encuentran en condiciones similares y no se puede tomar una decisión objetiva frente a cual de las dos tiene un mejor desempeño. Esta incertidumbre generó la necesidad de establecer una metodología de priorización de criterios, para determinar la influencia que tienen los criterios de mejor desempeño de cada tecnología en el proceso de selección de una de ellas.

La metodología utilizada se basó en el análisis estructural utilizado en prospectiva. Se escogió esta metodología ya que utiliza el juicio de expertos para encontrar las relaciones entre diferentes variables y la influencia de unas sobre otras. Para este proyecto, era necesario, encontrar los criterios más importantes o claves y la influencia de unos con otros, de tal manera que se pudieran ponderar los criterios para los cuales las 2 tecnologías promisorias tenían su mejor desempeño.

FASE II. 1. Establecimiento de una metodología para la priorización de criterios

Juicio de expertos

Los expertos fueron escogidos a partir de la revisión bibliográfica realizada en la fase I. Se escogieron 7 expertos internacionales y 2 nacionales, de los cuales se presenta la información en el anexo 3. Este grupo de especialistas, debía organizar de mayor a menor importancia la lista de criterios que se encuentra en el anexo 4, para que se pudieran reducir las variables de análisis a un número de fácil manejo y poder diseñar una matriz sencilla, con criterios importantes, que pudieran evaluar nuevamente los expertos para identificar las relaciones entre ellos.

La participación fue del 60%. De los 9 expertos a quienes se les envió la lista de criterios contestaron 5, 2 de los cuáles sólo consideraron en la organización 7 criterios, asumiendo, que el resto tenían poca importancia. Por esta razón se presentan en la tabla 16, para los 5 expertos, los 7 criterios que consideraron claves para la selección de una tecnología.

Tabla 16. Organización de criterios de mayor a menor importancia por un grupo de expertos

Criterios	Expertos				
	ROGERS	PAQUIN	LEE	KELLY	PULGARIN
1	13	5	5	4	4
2	15	7	1	1	5
3	7	1	2	12	10
4	5	18	3	2	8
5	4	2	4	3	9
6	16	3	16	6	18
7	18	8	18	7	14

Discusión de resultados

- ✓ Los 7 criterios con mayor número de coincidencias son:
 1. Estado y experiencia de la tecnología
 2. Pretratamiento mínimo de los residuos
 3. Requerimientos de postratamiento
 4. Eficiencia de destrucción
 5. Concentración final de residuos PCB
 7. Aplicabilidad a otros COP
 18. Costos
- ✓ La eficiencia de destrucción, la concentración final de los residuos PCB y los costos, fueron los criterios que coincidieron en la opinión de 4 expertos.
- ✓ Los resultados obtenidos en la etapa de organización de criterios se consideran totalmente objetivos sin influencia alguna de opiniones inclinadas hacia la promoción de una u otra tecnología, ya que de los 5 expertos, Rogers y Kelly promueven la DCB, Paquin y Lee la RSM y Pulgarín es investigadora de alternativas para la descontaminación de aceites PCB en Colombia y tiene un posición parcial frente al tema.
- ✓ Las opiniones de cada experto, reflejan su interés por una de las tecnologías. Lo anterior se sustenta en el hecho que los criterios en los cuáles las tecnologías DCB y RSM tienen un buen desempeño, son los criterios considerados por los expertos, como de mayor importancia para hacer una selección de tecnologías. Esto es evidente, en la opinión de Rogers y Kelly sobre la eficiencia de destrucción y en la opinión de Paquin y Lee sobre la experiencia de la tecnología y los requerimientos de pretratamiento.

Construcción y evaluación de la matriz

Con los 7 criterios mencionados anteriormente y elegidos por el grupo de expertos se construyó una matriz de 7x7 para que fuera evaluada por el mismo grupo de acuerdo con la relación entre los criterios.

Tabla 17. *Matriz de evaluación para el grupo de expertos*

	Estado y Experiencia	Requerimientos de pretratamiento	Requerimientos de postratamiento	Eficiencia de Destrucción	Concentración final de residuos PCB	Aplicabilidad a otro tipo de COP	Costos
Estado y Experiencia							
Requerimientos de pretratamiento							
Requerimientos de postratamiento							
Eficiencia de Destrucción							
Concentración final de residuos PCB							
Aplicabilidad a otro tipo de COP							
Costos							

La matriz se evaluó con números de 1 a 4 donde:

1= No hay relación entre los criterios

2= Los criterios tienen poca relación

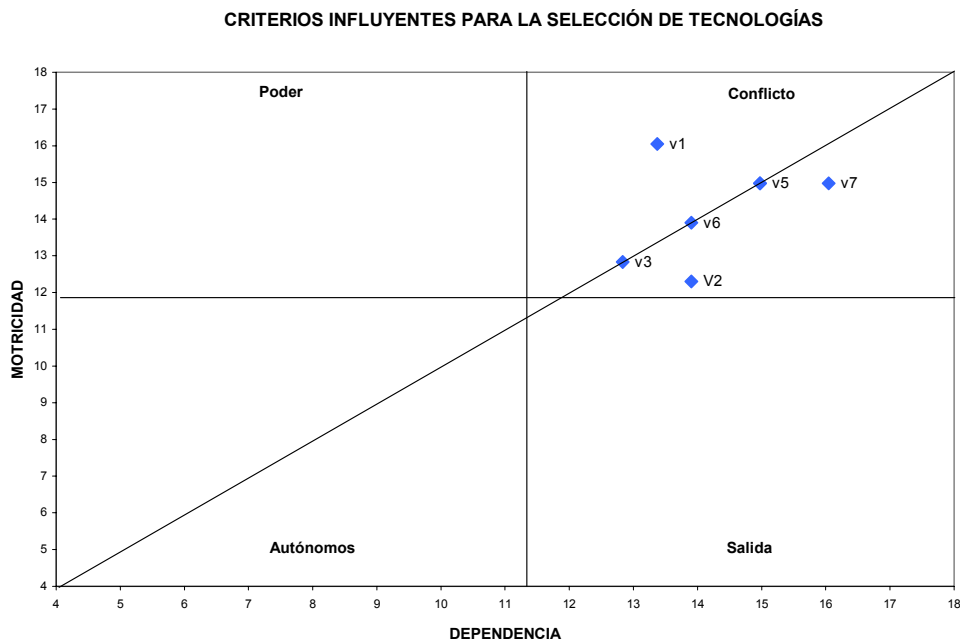
3= Los criterios tienen alguna relación

4= Los criterios están totalmente relacionados

La matriz se reenvió a los 5 expertos que hicieron la organización de los criterios por importancia y a un experto más, dispuesto a colaborar en esta última fase. Se tuvo respuesta de 3 especialistas. Las matrices evaluadas por cada uno de ellos se presentan en el anexo 5.

Metodología de Análisis Estructural

Los resultados de las matrices fueron ingresados a un software diseñado en Excel por la profesora Yadira Carrión. Para la utilización del software, cada número tenía una correspondencia alfabética. Las letras se introdujeron en el programa y el resultado obtenido es la matriz de análisis estructural que se presenta a continuación:



Donde:

V1 = Estado y experiencia

V2 = Requerimientos de pretratamiento

V3 = Requerimientos de postratamiento

V4 = Eficiencia de destrucción

V5 = Concentración final de residuos PCB

V6 = Aplicabilidad a otros COP

V7 = Costos

Discusión de Resultados

- ✓ Todos los criterios son de conflicto. Esto quiere decir que por tener una alta motricidad y una alta dependencia, influyen sobre los otros criterios y son altamente influenciados por ellos.
- ✓ Como todos los criterios se encuentran en la zona de conflicto no se pueden tomar decisiones basadas sólo en algunos criterios. Los 7 criterios seleccionados son fundamentales y por ello estratégicos en el proceso de selección de tecnologías.
- ✓ Se tuvo respuesta de 3 expertos y el software está diseñado para 8 expertos. Esto quiere decir, que lo importante en la aplicación de la técnica no es el número sino la calidad de especialistas.
- ✓ El resultado de la evaluación de los tres expertos se considera objetivo teniendo en cuenta que el grupo está constituido por representantes de tres líneas diferentes, la reducción con sodio metálico, la descomposición catalizada por bases y la investigación en tecnologías de decoloración.
- ✓ El estado y la experiencia de la tecnología es el criterio de poder con respecto a los otros criterios. Tiene una mayor motricidad, es decir, capacidad de influir sobre los otros y una menor dependencia. Por ello es considerado, por los expertos, como el criterio más fuerte o el criterio clave.
- ✓ Como el estado y la experiencia de la tecnología es el criterio clave, la reducción con sodio metálico es considerada la tecnología que podría tener una mejor adaptabilidad al país. En la etapa inicial de esta fase, fue la tecnología con mayor número de criterios que se acercaban al óptimo y en esta etapa se pudo comprobar que su experiencia es decisoria para el desempeño adecuado de los otros criterios de evaluación y por ello la hace una tecnología confiable.

C. FASE III. Evaluar la potencialidad de implementar la tecnología seleccionada

Organización y análisis de los resultados obtenidos por el inventario preliminar de existencias de PCB

La información que se presenta a continuación está basada en los resultados del inventario preliminar de existencias de PCB elaborado por la unión temporal OCADE – LITO - SANIPLAN. Para los cálculos, se utilizaron las distribuciones porcentuales del inventario directo y se proyectaron a las estimaciones totales.

Tabla 18. *Resultados del inventario preliminar de existencias de bifenilos policlorados en Colombia*

Metodología empleada	Fuentes de PCB	Cantidad (t)	TOTAL (t)
Estimación estadística	Probable existencia a nivel nacional de PCB puro en transformadores en desuso	683	1231
	Probable existencia a nivel nacional de PCB puro en transformadores en uso	548	
	Probable existencia a nivel nacional de transformadores contaminados con PCB en desuso	302 a 396	De 10073 a 13199
	Probable existencia a nivel nacional de transformadores contaminados con PCB en uso	9771 a 12803	
Recolección directa, reportes y formularios	Existencias de equipos, aceites y residuos contaminados con PCB	927	927
Levantamiento de registros	PCB importado al país en aceites y equipos	20	20
	Condensadores importados al país antes del año 1985, probablemente con PCB	3863	3863
TOTAL (t)			16.731

En los resultados del inventario no se presentó un valor total de existencias, teniendo en cuenta las diferentes metodologías que se utilizaron para hacer las estimaciones. Para el cálculo y las estimaciones posteriores, se asume un valor promedio de existencias de **16.731 t** que resultan de la suma de las existencias probables de PCB puro, el promedio entre los dos escenarios de las existencias de transformadores contaminados con PCB y el peso de los condensadores.

Gráfico 8 . Distribución porcentual de PCB por sectores

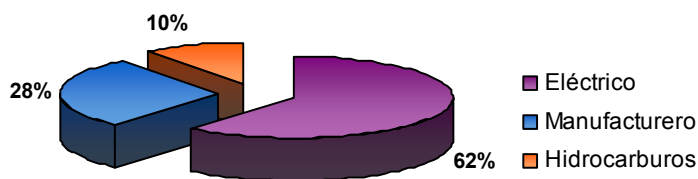


Gráfico 9. Distribución porcentual de PCB por tipo de materiales

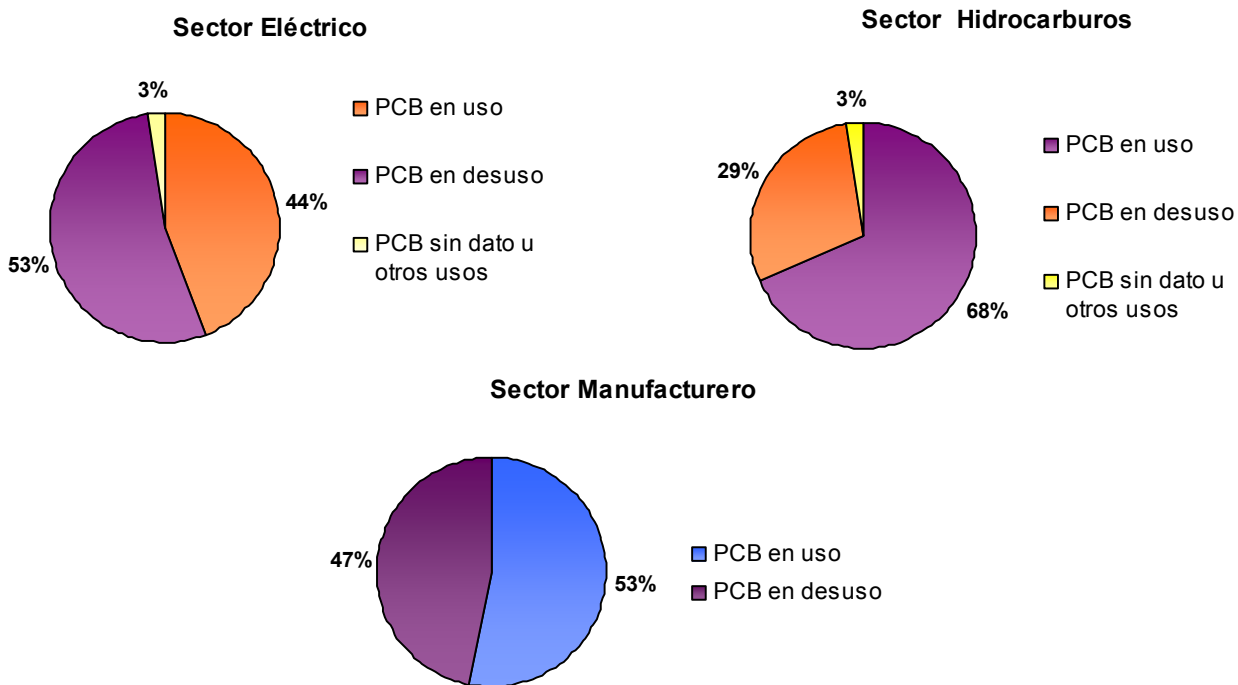
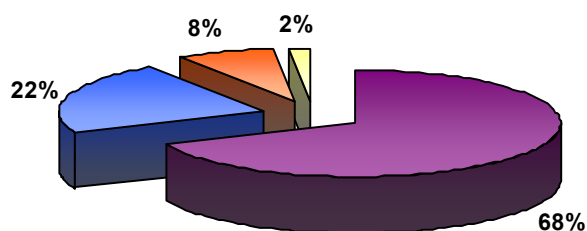


Gráfico 10. Distribución porcentual de PCB por tipo de materiales



- Partes Sólidas de Transformadores (En su mayoría metálicas)
- Aceite Mineral Contaminado por PCB
- PCB puro
- Condensadores y Residuos Sólidos (Suelos Contaminados, carcasas sin aceite)

Tabla 19. Cantidades de PCB por tipo de materiales del inventario directo y proyección de las estimaciones totales

Material	Cantidades del inventario directo (t)	Cantidades para las estimaciones totales (t)
Peso de condensadores y residuos sólidos (suelos contaminados, carcasas sin aceite y otros)	15,5	335
Peso de aceite mineral contaminado por PCB (Entre 50ppm y 1000 ppm)	202.2	3.621
PCB puros (> 1000 ppm)	64.3	1.231
Peso de partes sólidas de transformadores (en su mayoría metálicas)	645	11.544
Peso total de PCB y materiales contaminados por este	927	16.751

Tabla 20. Distribuciones del aceite mineral contaminado por concentraciones

Total de aceite mineral contaminado entre 50 y 500 ppm = 3.621 t				
Sector	Aceite mineral contaminado con PCB, rango entre 50 y 500 ppm. Peso aceite (t)	Mezcla de aceite mineral y fluidos PCB, en el rango entre 501 y 1.000 ppm. Peso aceite (t)	Fluidos de PCB, concentraciones superiores a 1.000 ppm. Peso aceite (t)	Aceite sin dato de concentración de PCB, Peso aceite (t)
Eléctrico	50	4	40	77
Manufacturero	3	0.036	53	11
Hidrocarburos	4	5	16	4
SUBTOTAL Inventario Directo	56,5	9,0	109	92
PORCENTAJE	86 %	14 %		
ESTIMACIONES TOTALES (t)	3.114	507		

Para establecer las cantidades estimadas totales de aceite mineral contaminado con PCB entre 50 ppm-500 ppm y entre 500 ppm-1000 ppm, se parte del supuesto que el 100% de aceite mineral contaminado se encuentra entre 50 ppm-1000 ppm. Se hace este supuesto, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos para el inventario directo muestran una cantidad de PCB puro muy por encima de aceite mineral contaminado, esta situación para las cantidades estimadas totales no es posible y teóricamente se ha podido demostrar que alrededor del 90% de los transformadores de aceite mineral tienen niveles de PCB de 50-500 ppm, luego el supuesto es válido.

Tabla 21. Distribución total de transformadores estimados a nivel nacional

Sector	Transformadores en uso	Transformadores en patio	Total transformadores	Porcentaje sobre el total de transformadores
Transporte	47	1	48	0.01%
Minero	3713	115	3828	0.99%
Hidrocarburos	957	30	987	0.26%
Manufactura	815	26	841	0.22%
Militar	140	4	144	0.04%
Eléctrico	368692	11404	380096	98.39%
Número de transformadores estimados a nivel nacional	374364	11580	385.944	100%
Toneladas	168464	5211	173.675	100%

Tabla 22. Distribución de transformadores contaminados en el país

TOTAL	Transformadores en uso contaminados		Transformadores en patio contaminados		Total transformadores contaminados	
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
	3	4	0	0	3	4
	215	282	7	9	222	291
	56	73	2	2	57	75
	47	62	2	2	49	64
	8	11	0	0	8	11
	21384	28021	661	867	22046	28887
Número de transformadores contaminados	21713	28452	672	880	22385	29332
Toneladas	9771	12803	302	396	10073	13199

Para análisis posteriores, se tomarán los valores del número de los transformadores, ya que los datos en peso difieren en gran medida de la realidad. Esto se debe a que se tomó un peso promedio para todos los transformadores de 450 kg. Con el número de transformadores, se pueden hacer estimaciones más precisas.

Tabla 23. *Distribución de transformadores con PCB puro en el país*

Transformadores con PCB puro	Transformadores en uso	Transformadores en desuso	TOTAL
Número de transformadores con PCB puro	97	121	218
Toneladas	548	683	1231

Gráfico 11. *Distribución porcentual de transformadores en el país*

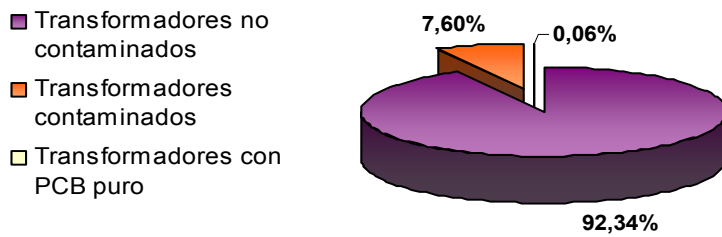


Gráfico 12. *Distribución de transformadores por potencia*

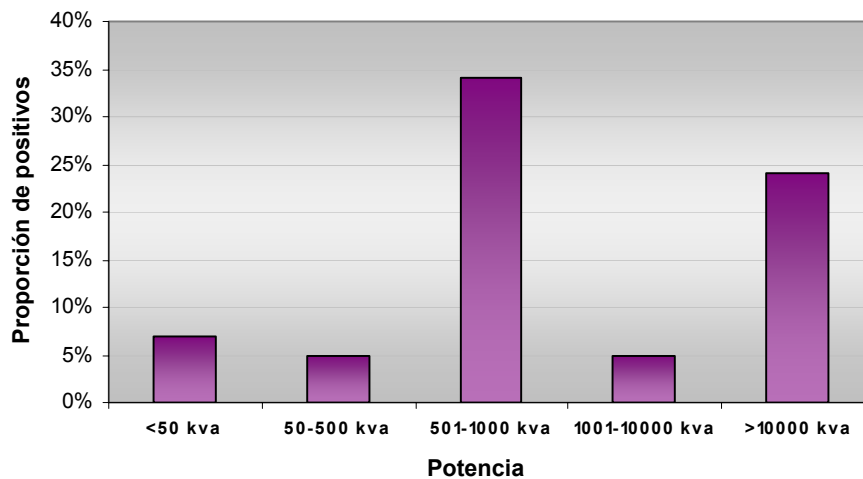
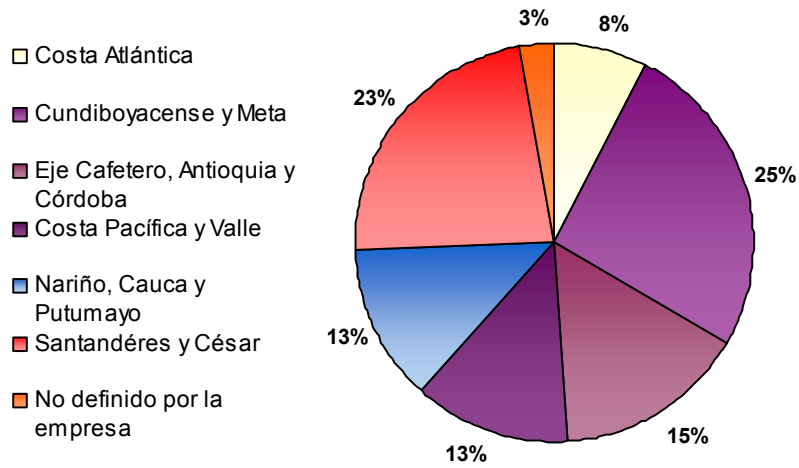


Gráfico 13. Distribución porcentual de PCB por regiones



Construcción de escenarios

Para la construcción de escenarios se parte de las siguientes premisas:

- ✓ Por la dificultad de hacer tratamiento al PCB puro, todas las existencias del país, serán eliminadas en el exterior por medio de tecnologías térmicas.
- ✓ Los materiales porosos, que pueden absorber hasta un 50% de su propio peso del aceite, serán enviados a incineración.
- ✓ El tiempo máximo propuesto de eliminación es de 15 años. De 2010 a 2025. Se escoge este periodo de tiempo, suponiendo que en los próximos 4 años habrá una fase de gestión previa de identificación, transporte y almacenamiento de las existencias de PCB. No obstante, los tiempos de eliminación reales, deberán ser concertados con los sectores poseedores de los residuos que tienen sus planes de eliminación y el presupuesto determinado para un periodo de tiempo.
- ✓ En el escenario 3, la configuración de la planta será móvil. Las razones son la ubicación dispersa de los PCB en el territorio nacional, la necesidad de evitar riesgos por el transporte de estos residuos de alta toxicidad, la accesibilidad de la tecnología a todos los poseedores, las restricciones legales para la importación de residuos peligrosos en el país (ya que una planta fija demanda grandes cantidades de residuo para que sea costo-eficiente) y las cantidades que se van a descontaminar. Las instalaciones comerciales fijas más pequeñas, según la empresa Powertech, deben tener una capacidad mínima anual de 2.000.000 L²³, es decir, 1800 toneladas.
- ✓ Para estimar la capacidad de operación de las plantas, en el escenario 3, se asume un tiempo mínimo de operación de 200 días en el año (5 días a la semana durante 10 meses).
- ✓ Para hacer el análisis de costos de los escenarios y tener un parámetro comparativo entre ellos, se parte de una situación ideal en la que cada escenario se desarrolla en el año 2006. No se hacen las proyecciones a 15 años porque no sólo se juega con variables como las tasas de

²³ Lee, K. Información Powertech. Documento electrónico. Enviado Mayo 17 de 2006

cambio sino también con factores como la oferta de nuevas tecnologías, el incremento de la competitividad y las obligaciones legales, de las cuales se requeriría información de años anteriores, para hacer su proyección en el tiempo propuesto con resultados cercanos a la realidad.

- ✓ El análisis de costos de los escenarios planteados, se hizo a partir de la recolección de información secundaria y primaria y con el fin de hacer comparaciones posteriores, se generalizaron los precios a dólares por tonelada en el año 2006. En el anexo 6 están las tasas de cambio utilizadas para las diferentes monedas y la tasa LIBOR para los últimos 6 años. Se tomó el valor de la tasa LIBOR como tasa de descuento en los cálculos de valor futuro, ya que es la tasa utilizada como referencia internacional.

Escenario 1. Exportación de todas las cantidades de PCB que hay en Colombia

Conforme a las premisas para la construcción de escenarios, se partirá de la situación ideal en la que se exportarán todas las cantidades existentes de PCB en el presente año. De acuerdo con lo anterior, las cantidades de residuos a exportar, para los fines de este proyecto (sin contar con los condensadores y suelos contaminados), estaría en **12.867** toneladas. Teniendo en cuenta que el costo actual de la exportación está entre US\$ 4000/t y US\$ 5000/t²⁴, dependiendo del volumen a exportar, el costo total para hacer la eliminación fuera del país, estaría en un rango de **US\$51.468.000 a US\$64.335.000**, con un promedio de **US\$57.901.500**.

Para hacer algunas estimaciones del valor que corresponde a transporte y a eliminación del total del costo de la exportación, se cuenta con información de tres fuentes. Los datos consolidados se presentan en la tabla 24. Las tablas de información original para las fuentes de México y Argentina se encuentran en las partes A y B del anexo 7.

²⁴ Comunicación personal. Ojeda, E. OCADE. Junio de 2006

Tabla 24. *Distribución de los costos de transporte y eliminación para la exportación*

Distribución de costos (US\$/t)	Fuente (año)		
	OCADE ²⁵ (2006)	México (2003) Ecochem Finlandia	Argentina (2004)
Costos de transporte	900	3987	1274
Porcentaje	20%	69%	33%
Costos de eliminación	2250	1812	1300
Porcentaje	50%	31%	51%
Costos administrativos	1.350	SI	1326
Porcentaje	30%	SI	16%
COSTO TOTAL (2006)	4500	5799	3900

El costo promedio de exportación es de US\$ 4700/t. De este costo, la distribución porcentual en transporte, eliminación y aspectos administrativos, difiere considerablemente para las tres fuentes consultadas. Se asumieron las siguientes proporciones con los datos más cercanos:

Costos del transporte = 25%

Costos de eliminación = 45%

Costos administrativos = 30%

De acuerdo con estas proporciones, del costo total de exportación de todas las existencias de PCB que se estiman en el territorio nacional, los costos asociados con transporte, eliminación y gastos administrativos son:

Costos del transporte = US\$14.475.375

Costos de la eliminación = US\$ 26.055.675

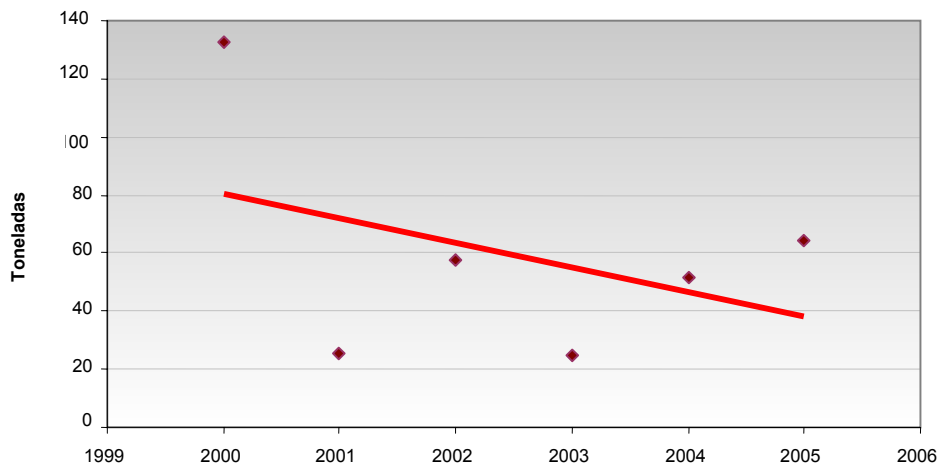
Costos administrativos = US\$ 17.370.450

²⁵ Ibid.

Estimaciones

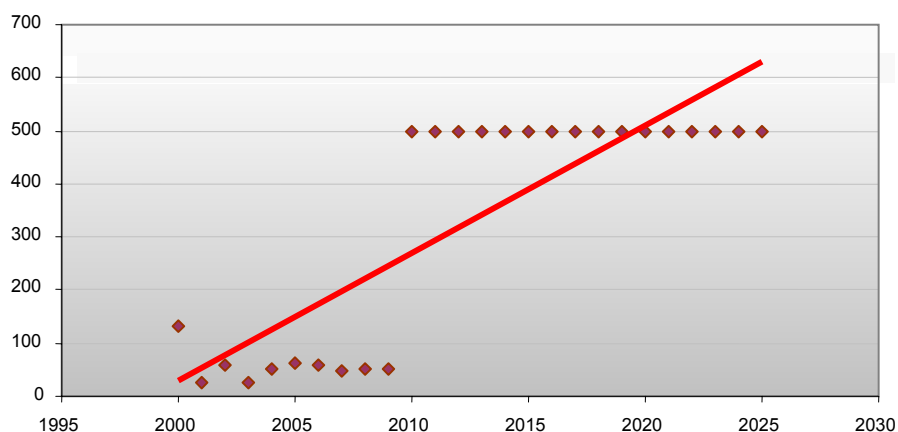
En el gráfico 14, se pueden observar las exportaciones de los últimos 5 años que han hecho empresas autorizadas con fines de eliminación certificada y la línea de tendencia de estas exportaciones. El total de equipos y aceites con PCB que se ha exportado en este lapso de tiempo es de 365,4 toneladas. No obstante, de tener la exportación, como única alternativa a la eliminación, sería necesario exportar alrededor de 858 toneladas cada año durante 15 años. Esto generaría una mayor oferta de empresas exportadoras, mayor competitividad y una consecuente disminución en los precios. La tendencia para este escenario se puede observar en el gráfico 15.

Gráfico 14. *Cantidades de equipos y aceites con PCB exportados en los últimos 5 años*



Basada en: OCADE-LITO-SANIPLAN. (2006) *Inventario Preliminar de Compuestos Bifenilos Policlorados – PCB – Existentes en Colombia*. Pág. 37

Gráfico 15. *Tendencia de las exportaciones para el escenario propuesto*



Escenario 2. Limpieza con solventes de los transformadores para su reutilización en el país y exportación de líquidos PCB y materiales porosos

Este escenario es una alternativa que se discute actualmente en el país para el aprovechamiento de las partes metálicas de los transformadores. En el esquema 2 se presenta el esquema del escenario planteado. Para establecer los costos asociados con la limpieza, se parte de la información de la tabla 25. En esta tabla, el costo promedio de la limpieza con solventes de **US\$1865/t**, sólo se toma el costo mínimo dado por Miller (2006), teniendo en cuenta que el límite superior es muy alto, comparado con los otros valores, e incrementa la media considerablemente. Es importante tener en cuenta que se desconocen los costos de inversión para llevar a cabo este proceso.

Esquema 2. Esquema general del escenario 2. Limpieza con solventes de los transformadores para su reutilización en el país y exportación de líquidos PCB y materiales porosos

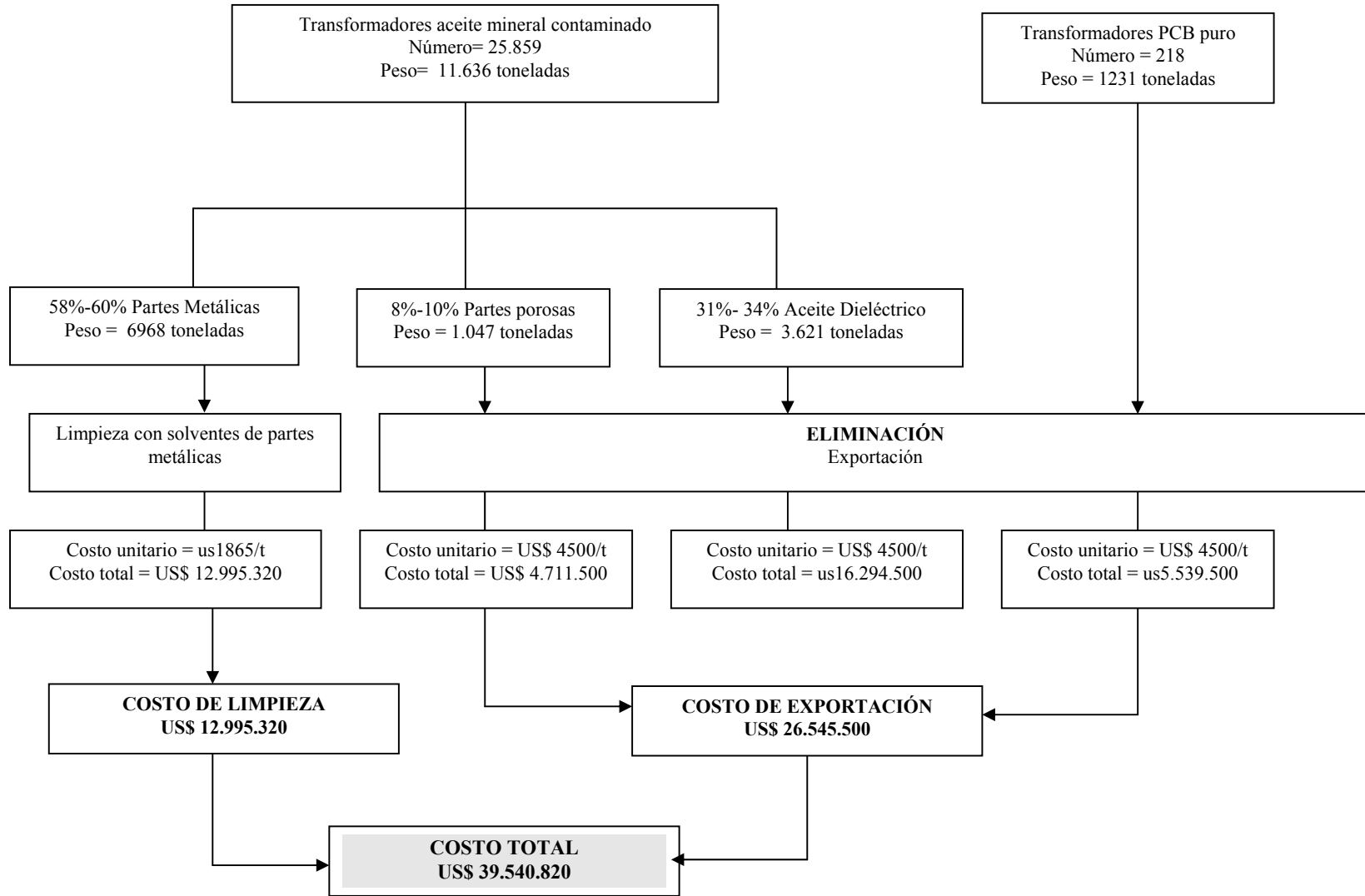


Tabla 25. Costos asociados a la fase de pretratamiento para las partes metálicas de los transformadores

COSTOS ASOCIADOS A LIMPIEZA CON SOLVENTES					
Valor	Año	Valor US\$/t	Valor 2006	Fuente	Observaciones
De CAN 1.50/kg a CAN 2.50/kg	2000	US\$ 1005/t a US\$ 1675/t	US\$ 1207/t a US\$ 2011/t	Sanexen	
De us1/lb a us5/lb	2006	De US\$ 2200/t a US\$ 11000/t	De US\$ 2200/t a US\$ 11000/t	Miller. Comunicación personal	Dependiendo del volumen y contenido de PCB
De €0.80/kg a €2.50/kg	2000	De US\$ 752/t a US\$ 2350/t	De US\$ 903/t a US\$ 2822/t	ABB Service GmbH	Recuperación del 98%
CAN 1.50/lb	2000	US\$ 2215,69/t	US\$ 2661/t	Cintec	Capacidad de 2000 t/año. Reciclaje de un 95%
US\$ 0.8/kg	2003	US\$ 800/t	US\$ 878/t	SCB-UNEP	
De US\$ 0.75/lb a us1.65/kg	2000	US\$ 1650/t	US\$ 1981/t	Safety-Kleen	
		Promedio	US\$ 1865/t		

Análisis de resultados

- ✓ De acuerdo con las cantidades estimadas para el país, serían 5.899 toneladas destinadas a exportación correspondientes a las cantidades de PCB puro, el aceite dieléctrico y los materiales porosos. A esta cantidad, se debe sumar el líquido resultante del lavado de las carcasas, que se desconoce. El peso de las partes metálicas que estaría sujeto a descontaminación sería de 6.968 toneladas, de las cuales un 95%, 6.620 toneladas, de acuerdo con Cintec (Tabla 25), podrían ser recicladas. Estas 6.968 toneladas sería el mínimo material para ser aprovechado, puesto que en la metodología estadística utilizada en el inventario, se tomó un promedio de 450 kg de peso por transformador y existen equipos que pueden pesar hasta 200 toneladas.
- ✓ Las 6.620 toneladas podrían ser vendidas como chatarra. Entre los materiales que tiene un transformador para venta como chatarra, está el hierro de las carcasas metálicas externas, el acero del núcleo y el cobre de los cables. El hierro o acero, que constituye la mayor proporción de material, sería vendido como materia prima a las Acerías para la fabricación de acero. En el último punto de este análisis, se hace una breve descripción del mercado de la chatarra en Colombia y los valores actuales del costo por tonelada de este producto.
- ✓ El costo de la limpieza de las 6.968 toneladas, es de acuerdo con el esquema 2, de US\$12.995.320; si es posible recuperar el 95% que corresponde a 6.620 toneladas, la venta de este material metálico en el mercado tendría un costo de US\$ 1.006.240, sin contar con que los precios no se ajustan a las cantidades y para el volumen que se pretende manejar cada tonelada puede ser pagada a un mejor precio. Este ingreso adicional, reduce el costo total del escenario 2 de US\$ 39.540.820 a US\$ 38.534.580.
- ✓ La venta de las partes metálicas de los transformadores por chatarra permite dar un valor económico- ambiental agregado a este escenario. El material que queda en el país después de pasar por algunos procesos físicos es aprovechado y reciclado para ser utilizado como materia prima en otros ciclos productivos, cuya demanda, se ha demostrado, es factible. Esto no sólo cumple con principios de ecoeficiencia sino que representa ingresos adicionales para los poseedores de los equipos. Este beneficio se presenta en el esquema 3.

- ✓ Los transformadores eléctricos tienen una vida útil aproximada de 50 años. Si la mayoría de equipos contaminados que hay en el país fueron adquiridos en los años 60's y 70's, dentro de los 4 años que se estima podría comenzar la eliminación de aceites PCB y limpieza de equipos eléctricos contaminados con ellos, habría una fase de reconversión de equipos que se representa en un incremento significativo del mercado de la chatarra.
- ✓ Se considera que los costos del escenario 2 están sobreestimados porque la limpieza con solventes podría realizarse en el país a costos menores. Por la información disponible se tomaron como referencia costos internacionales.
- ✓ Además del beneficio económico, el escenario 2 es una oportunidad para la generación de empleo en el mercado de la chatarra, la disminución de las importaciones de este material que debe hacer mensualmente el país para abastecer la demanda nacional, el aprovechamiento de recursos no renovables cuyo valor ha aumentado en los últimos años por su baja disponibilidad, el impulso de ciclos cerrados de producción para la disminución en la generación de residuos y el fortalecimiento del mercado interno.

Comercio de la chatarra en Colombia

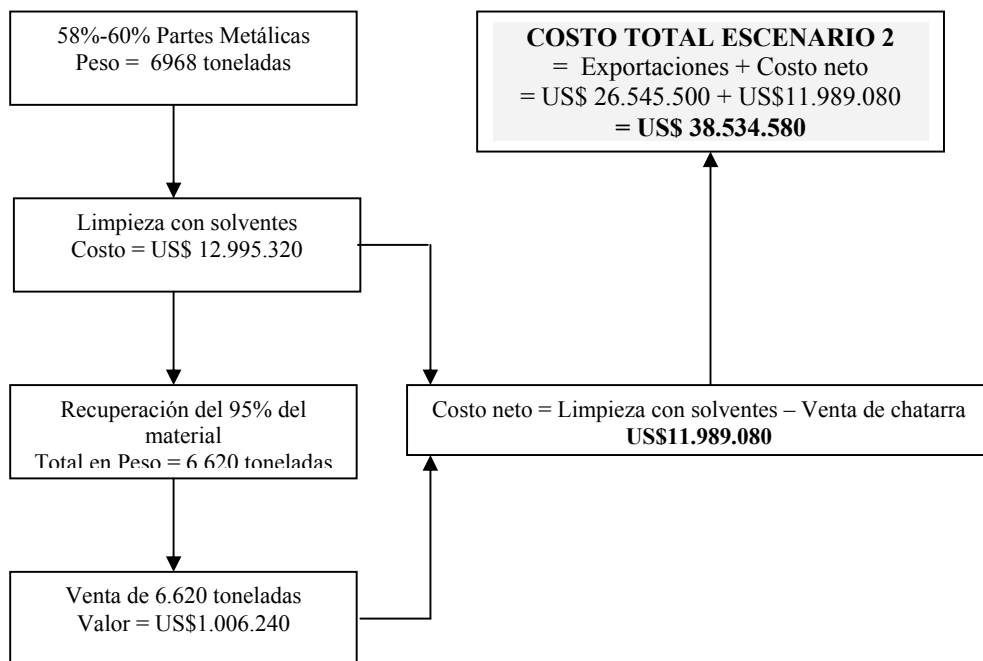
En Colombia, se producen mensualmente alrededor de 85.000 toneladas de acero, que constituyen aproximadamente el 16% del PIB nacional. De las cuáles un 40% es producido por la empresa DIACO, un 25% por Acerías Paz del Río y el 35% restante por algunas empresas como ACASA de Manizales, SIDENAL de Boyacá y SIDOC. Esta producción mensual abastece alrededor del 50% de los volúmenes requeridos en el país fundamentalmente para sectores como construcción y metalmecánica²⁶. Como la producción nacional de acero abastece sólo el 50% de la demanda interna, se debe importar la chatarra adicional para abastecer el consumo nacional. Esta situación, hace que los costos por tonelada de la chatarra tengan una tendencia a subir. Los costos para el mes de Noviembre del presente año se presentan en la tabla 26. Es importante tener en cuenta que el valor de compra depende de las condiciones, el grosor y el peso de la chatarra.

²⁶ Pinzón, P. Acerías Paz del Río. Comunicación personal. Noviembre de 2006.

Tabla 26. Costos por tonelada de la chatarra de hierro o acero en el mercado nacional

Empresa compradora	Costo en COP por tonelada para el mes de Noviembre del año 2006	Costo en US\$ por tonelada para el mes de Noviembre del año 2006 ²⁷	Fuente
DIACO	350.000	152	Humberto Higuera
ACERIAS PAZ DEL RÍO	Entre 340.000 y 360.000	148 – 157	Prado Pinzón

Esquema 3. Valor agregado del escenario 2



²⁷ Tasa representativa del mercado al 3 de Noviembre del año 2006 = COP 2297. Tomado de: www.banrep.gov.co

Estimaciones

De ser este escenario la alternativa al manejo de líquidos PCB y transformadores eléctricos contaminados, se podría hacer la limpieza de 1723 transformadores, cada año, durante 15 años, para descontaminar los 25.859 transformadores estimados en promedio y cumplir con las metas del convenio. A esta tasa, la capacidad de pretratamiento anual debería estar en 776 toneladas. Teniendo en cuenta, que de acuerdo con la información de la tabla 25, un sistema de limpieza puede tener una capacidad de 2000 toneladas por año, la descontaminación de las carcacas, a una tasa de tratamiento máxima, podría reducirse a un periodo de tiempo de 5 años.

Para determinar el tiempo de eliminación, se deben tener en cuenta aspectos como el costo de oportunidad del dinero y el tiempo estimado de sustitución de equipos que tiene el sector eléctrico dentro de sus planes de manejo de residuos.

Escenario 3. Implementación de la RSM para el tratamiento de los líquidos en el país y limpieza con solventes de los equipos. Exportación del PCB puro y de los materiales porosos

Requerimientos de la tecnología y estimaciones para las condiciones del país

En la tabla 27, de acuerdo con la organización y análisis de los datos del inventario preliminar y la información disponible de la RSM, se presenta una primera contextualización de la tecnología a las condiciones del país. Para ello, se tomaron valores reales de los criterios escogidos en el proceso de selección de tecnologías y se aplicaron a las existencias de PCB inventariadas en Colombia. Con respecto al aceite mineral contaminado, se tomaron las 3.114 toneladas que se encuentran entre 50-500 ppm, ya que la información disponible se limita a este rango de contaminación. En esta contextualización se plantean dos situaciones para tiempos de tratamientos mínimos y máximos.

1. Tiempo de eliminación del aceite mineral contaminado de 12 a 15 meses, a una tasa máxima de tratamiento de 2700 t/año.
2. Tiempo de eliminación del aceite mineral contaminado en 15 años, a una tasa mínima de tratamiento de 208 t/año.

Pretratamiento

Para la fase de pretratamiento, se tomaron las cantidades máximas y mínimas estimadas que permitieran hallar el intervalo de tiempo en el cuál se llevaría a cabo la descontaminación. A una tasa de descontaminación mínima de 10 unidades por día, según la SD Myers, por un tiempo de operación de 200 días en el año, la descontaminación para los 22.385 – 29.332 transformadores tomaría entre **11 años** y **15 años** (2000 unidades por año que equivalen a 900 toneladas año).

Tratamiento

El tratamiento, como se explicó anteriormente, se plantea en 2 situaciones. La situación 1, se deriva de tomar la tasa promedio de tratamiento de aceite propuesta teóricamente para residuos con concentraciones máximas de 500 ppm. Esta tasa está entre 10,8 t/día y 13,5 t/día. Para la situación de Colombia, en el tiempo de operación mínimo establecido, se tratarían entre 2160 t/año y 2700 t/año. Como la cantidad total de aceite mineral entre 50 ppm y 500 ppm estimada para el país es de 3.114 toneladas, el periodo de tratamiento en la situación 1 es de **12 a 15 meses**. Para la situación 2, se extiende el tiempo a 15 años que es el máximo posible establecido y para las mismas cantidades totales, se tratarían 208 toneladas anuales.

Demanda de Energía y Reactivo

Las estimaciones del gasto energético están sobreestimadas ya que se tomó como referencia un valor que aplica a residuos con una concentración de 1000 ppm; para la situación más crítica, el costo mensual de la energía estaría en US\$ \$4.770. Las cantidades de reactivo serían de 26 toneladas mensuales.

Tabla 27. Requerimientos de la tecnología RSM y estimaciones para las condiciones del país

Requerimientos		Tecnología RSM	Estimaciones para Colombia		
Pretratamiento (Operaciones de reciclaje y recuperación para las partes metálicas del transformador)	Capacidad	Más de 10 unidades / día Para residuos con concentraciones por encima de 50 ppm (19)	Unidades totales = 22.385 - 29.332 Unidades anuales = 2000 transformadores Cantidades anuales = 900 toneladas Tiempo de descontaminación = 11 a 15 años		
		Tratamiento del aceite mineral contaminado	12.000 a 15.000 L/día Para residuos con concentraciones máximas de 500 ppm (17) 10,8 t/día a 13,5 t/día	1	Cantidades totales = 3114 toneladas Cantidades anuales (10 meses) = De 2160 a 2700 toneladas Tiempo de tratamiento = 12 a 14 meses
				2	Cantidades totales = 3114 toneladas Cantidades anuales = 208 toneladas Tiempo de tratamiento = 15 años
Energía		350 kWh / 1000 L (1000 ppm) ²⁸ 280 kWh / t (1000 ppm)	1	Cantidades mensuales = 222 toneladas Demanda mensual energía = 62.160 kWh Costo mensual = US\$ 4.770	
			2	Cantidades mensuales = 21 toneladas Demanda mensual energía = 5.824 kWh Costo mensual = US\$ 447	
Reactivo		100 - 500 kg Reactivo/ton residuo ²⁹	1	Demanda mensual reactivo = 26 toneladas	
			2	Demanda mensual reactivo = 2,1 toneladas	

²⁸ Neupert, D. Comunicación personal a Ingeniero Cárdenas. Diciembre 1 de 2005

²⁹ Ibid.

Análisis de proceso para la identificación de aspectos ambientales

El diagrama de proceso para esta tecnología, permite estimar cantidades de insumos y residuos durante el tratamiento, con la información disponible, para hacer un balance de masas y determinar los impactos ambientales que puede tener la tecnología durante su operación. La sustancia x son todos los insumos desconocidos del proceso. En esta actividad, se tomará la situación 1 del punto anterior, para calcular las cantidades de materiales de entrada y de salida en un mes de operación, con un desempeño máximo de 222 t/mes.

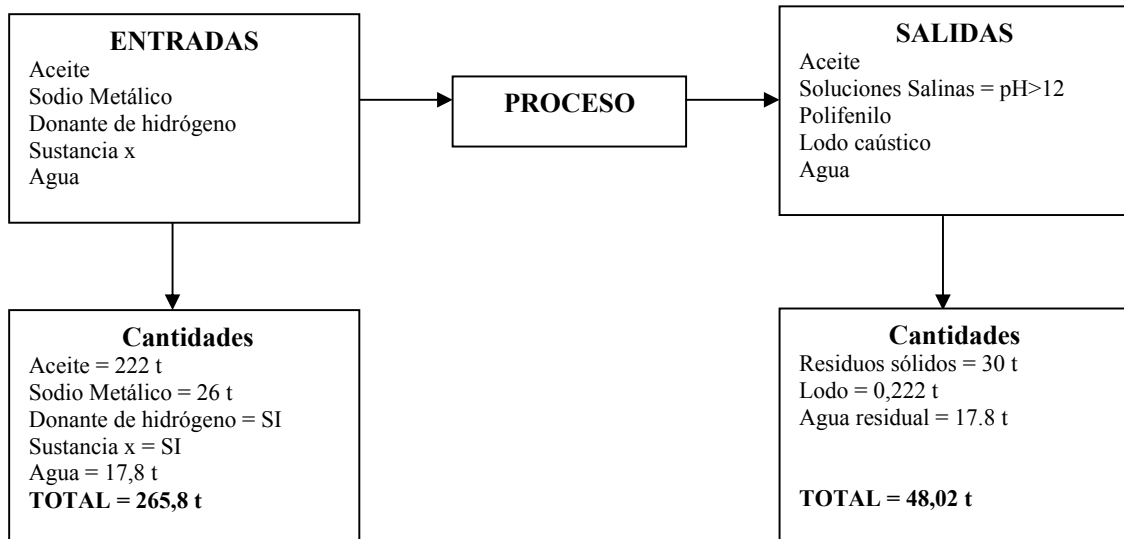
Para el cálculo de las corrientes de salida se parte de la siguiente información:

- ✓ Cantidades de residuo sólido generado: 120 kg por cada 1000 L de aceite tratado (34) que equivalen a 133 kg por tonelada de aceite, para una densidad del aceite de 0.9 kg/L.
- ✓ Cantidades de lodo generado: 1 kg por tonelada de residuo tratado³⁰.
- ✓ Cantidades de agua residual: 80 L de agua residual por tonelada de residuo tratado³¹ que equivalen a 80 kg por tonelada de residuo, tomando la densidad de 1 kg/L.

³⁰ Ibid.

³¹ Ibid.

Esquema 4. Balance de masas para el proceso de tratamiento con la tecnología RSM a una tasa máxima de tratamiento mensual



Análisis de resultados

- ✓ Del balance anterior se puede concluir que del total de masa que entra en el proceso de tratamiento, un 18% son desechos. Este porcentaje puede ser inferior, ya que se desconocen las cantidades de entrada del donante de hidrógeno y otras sustancias involucradas en la reacción. Con estos valores la tecnología, operando a su tasa máxima por 14 meses, eliminaría 48,02 toneladas de residuos. La eficiencia del proceso se presenta a continuación:

$$\text{Eficiencia del proceso} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} \times 100 = \frac{265,8 \text{ t} - 48,02}{265,8 \text{ t}} \times 100$$

Eficiencia del proceso = 82%

- ✓ La eficiencia de recuperación del aceite es de un 98%. Aún cuando este porcentaje se considera significativamente alto, se corrobora con las eficiencias mostradas por la empresa Kioshi³² en Argentina, que utiliza el sodio metálico para el proceso de declorinación y ha demostrado que del total de residuos a tratar, el 98% se consideran bienes recuperados y el 2% residuos libres de PCB.

$$\text{Eficiencia de recuperación del aceite} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada de aceite}} \times 100 = \frac{265,8 \text{ t} - 48,02}{222 \text{ t}} \times 100$$

Eficiencia de recuperación del aceite = 98%

- ✓ A una tasa máxima de tratamiento, se podrían generar alrededor de 220 toneladas mensuales de aceite dieléctrico libre de PCB, para ser reutilizado nuevamente como refrigerante en los transformadores. Estas cantidades resultarían si se asume que el único insumo recuperable es el aceite.
- ✓ El análisis de tecnologías requiere una visión más compleja de ellas que no sólo se limite a sus entradas y salidas. Es necesario analizar la tecnología como un subsistema dentro de un gran sistema que le provee los insumos, los reactivos, la energía y los recursos para que pueda operar. Conocer las materias primas para la fabricación de reactivos, los procesos utilizados, su demanda de calor y las fuentes de agua y energía, permite evaluar globalmente la alternativa y establecer realmente cuál es su impacto en el ambiente.

³² KIOSHI. Descripción Técnica del Proceso de Declorinación y Reclasificación de Aceites de Transformador. Documento electrónico. Enviado por Magda Patricia Díaz. Mayo 16 de 2006.

- ✓ De acuerdo con lo anterior, como el único reactivo conocido es el sodio metálico, a continuación se hará una breve descripción del proceso productivo para su fabricación, las materias primas utilizadas y la disponibilidad de estas en la naturaleza.

Sodio Metálico

Las materias primas para la producción de sodio metálico son algunos compuestos como el NaCl, el Na₂CO₃, NaOH y el Na₂S. Como el sodio es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, estos compuestos se encuentran disponibles en grandes cantidades. El 2.5% de la corteza terrestre está constituida por sodio y el contenido de NaCl en el océano es de un 3%. Esta disponibilidad, hace que la producción de sodio mediante la electrólisis a 800°C del NaCl fundido, sea el método de mayor utilización. La demanda energética para este proceso está alrededor de 15 kWh/ kg de Na (27).

El sodio metálico se ha producido desde 1807 para la síntesis orgánica como agente reductor y desde entonces ha sido utilizado en diversas aplicaciones. Algunos usos son en aleaciones, en la fabricación de detergentes, en la purificación de metales fundidos, como refrigerante, aleado con plomo se emplea en la fabricación de aditivos antidetonantes para las gasolinas y en iluminación para fabricación de lámparas de vapor de sodio (35).

- ✓ La información anterior demuestra que el sodio metálico es un reactivo cuyas materias primas están disponibles en la naturaleza en grandes cantidades y no representa un impacto significativo su producción. Se produce hace más de 200 años y tiene varias aplicaciones en el sector industrial. El mayor impacto asociado con su fabricación, es la demanda de temperaturas relativamente altas.

Análisis de costos

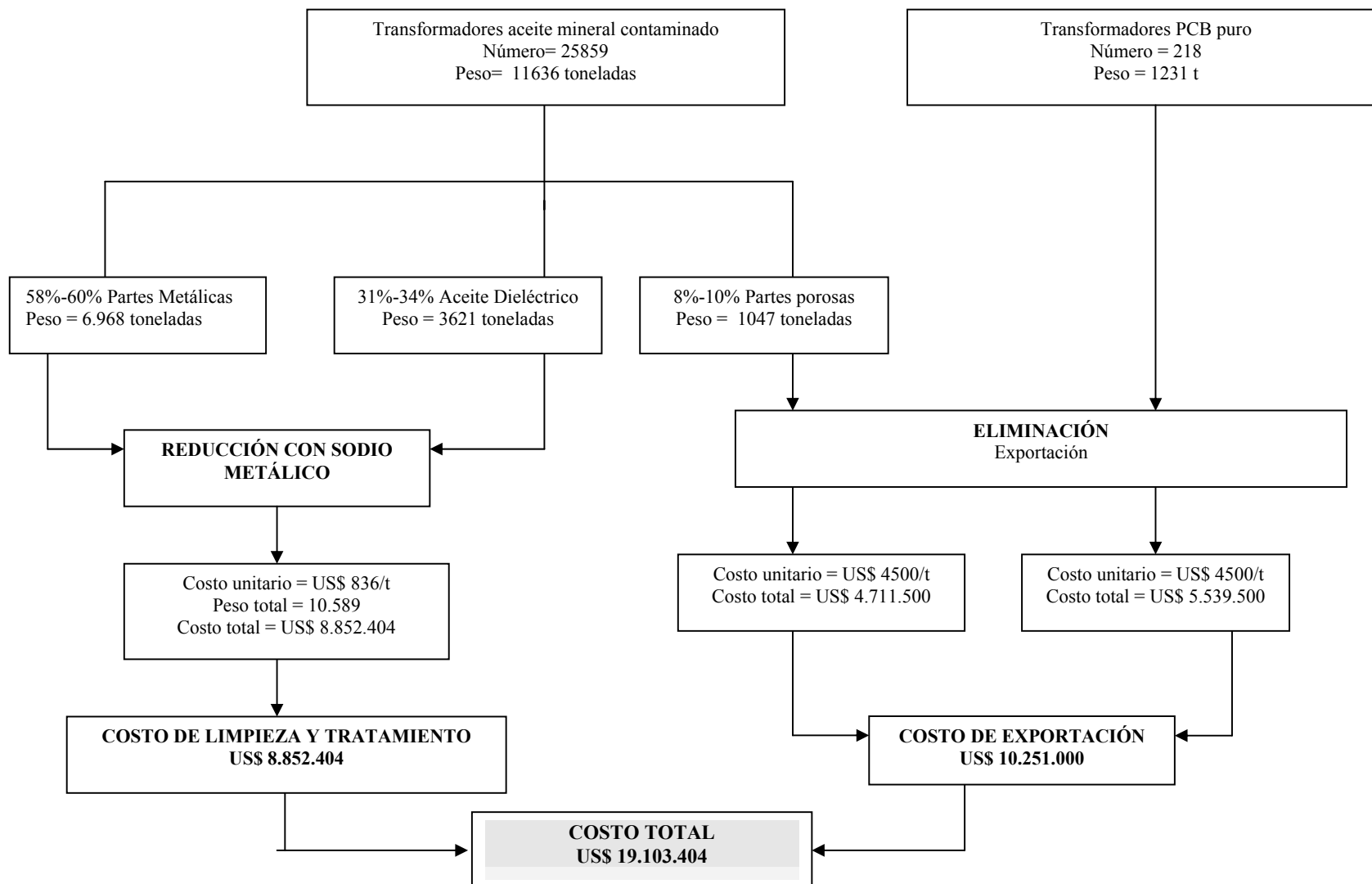
En la tabla 28, se consolida la información de los costos del tratamiento del aceite mineral contaminado entre 50 ppm y 1000 ppm, con la tecnología RSM. Teniendo en cuenta el tipo de escenario que se plantea, en el cálculo del promedio, se despreciaron los costos asociados con el tratamiento de aceites de concentraciones elevadas. Para estos aceites, la alternativa, como se planteó anteriormente, es la exportación.

De acuerdo con el promedio, el costo de tratamiento por tonelada de aceite mineral contaminado es para el año 2006, de **836** dólares. Los valores que inflan este promedio son los de Miller y Ecochem, que comparados con el resto, están significativamente altos. Si se tomará el promedio, sin tener en cuenta estos valores, el costo promedio de tratamiento estaría alrededor de **US\$ 415/t**. Esta dispersión de los datos genera algunos interrogantes relacionados con lo que incluye cada uno de los valores. Teniendo en cuenta este incremento del promedio, para las estimaciones posteriores, se asume que el costo promedio, incluye la fase de pretratamiento, de la limpieza con solventes de las partes metálicas de los transformadores y la disposición final de los productos de la reacción. El diseño del escenario 3 se presenta en el esquema 5.

Tabla 28. *Análisis de costos para el tratamiento del aceite mineral contaminado entre 50 ppm y 500 ppm con la tecnología RSM*

Concentración	Año	Valor	Valor en toneladas	Valor US\$	Valor 2006	Fuente	Observaciones
	2004	CAN 0.15/L	CAN 167/t	US\$ 139/t	US\$ 150/t	UNEP	
Baja	2005	US\$ 0.15/L	US\$ 167/t	US\$ 167/t	US\$ 175/t	Vijgen	Incluye pretratamiento y disposición
Alta	2005	US\$ 3.3/gal o US\$ 0.70/Kg	US\$ 700/t	US\$ 700/t	US\$ 734/t	Vijgen	
Baja	2005	US\$ 150/t	US\$ 150/t	US\$ 150/t	US\$ 157/t	Karstensen	
Alta		US\$ 500/t	US\$ 500/t	US\$ 500/t	US\$ 524/t		
	2006	£500/t a £1000/t	£500/t a £1000/t	US\$ 454 /t a US\$ 908 /t	US\$ 454/t a US\$ 908/t	SCB	
100 ppm	2000	US\$ 0.15/L	US\$167/t	US\$167/t	US\$ 201/t	Fluidex	
	2000	CAN 4/gal	CAN 1174/t	US\$ 788/t	US\$ 946/t	Manitoba Hydro	
	2000	CAN 0.90/kg	CAN 900/t	US\$ 603/t	US\$ 724/t	Powertech	
	2000	US\$ 0.26/L o US\$ 1/gal	US\$ 289/t	US\$ 289/t	US\$ 347/t	Safety Kleen	
Baja	2005	CAN 0.50/ kg	CAN 500/t	US\$ 335/t	US\$ 351/t	Sanexen	El proceso no incluye costos de incineracion de materiales porosos
Alta		CAN 1.50/ kg	CAN 1500/t	US\$ 1290/t	US\$ 1352/t		
	2006	US\$ 3.17/L	US\$ 3522/t	US\$ 3522/t	US\$ 3522/t	Miller. Com. personal	Costo nominal, dependiendo del contenido y volumen de PCB
50-500 ppm	2006	US\$ 0.9/L	US\$ 1000/t	US\$ 1000/t	US\$ 1000/t	Ecochem. CYDEP	
501-1000 ppm	2006	US\$ 1.6/L	US\$ 1.778/t	US\$ 1.778/t	US\$ 1.778/t	Ecochem. CYDEP	
1001-2000 ppm	2006	US\$ 3.0/L	US\$ 3.333/t	US\$ 3.333/t	US\$ 3.333/t	Ecochem. CYDEP	
Promedio					US\$ 836/t		

Esquema 5. Esquema general del escenario 3. Implementación de la RSM para el tratamiento de los líquidos en el país y limpieza con solventes de los equipos. Exportación del PCB puro y de los materiales porosos.



Marco Legal e Infraestructura Nacional para la Implementación de la RSM

Como fase final para la evaluación de la potencialidad de implementar la tecnología RSM en Colombia, fue necesario hacer una revisión general del marco legal con el que cuenta actualmente el país, para regular actividades de tratamiento de residuos peligrosos e identificar las condiciones de la infraestructura nacional. Parte de esta revisión, está basada en el documento “Evaluación de la Capacidad Institucional e Infraestructura Disponible y Evaluación del Marco Regulatorio para la Gestión de COP en Colombia”, elaborado por el CAEMA (Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente) en Noviembre de 2005.

Marco Legal

De acuerdo con los resultados de la priorización de criterios en la fase dos de este proyecto, el marco legal es uno de los elementos claves que deben tenerse en cuenta para iniciar un proceso de transferencia tecnológica, ya que los límites máximos permitidos de contaminación, condicionan la utilización de una u otra tecnología y las propuestas que se realicen deben ir en conformidad con las directrices legales. Sin embargo, la ausencia de legislación nacional específica para PCB, limitó la revisión normativa de este proyecto a residuos peligrosos, emisiones, vertimientos y licencias ambientales. Se presentan a continuación los resultados de la revisión de la política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos, su influencia en la propuesta planteada y el marco legal en el que se enmarca la propuesta.

Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia (21)

La tecnología RSM, para el tratamiento de aceites dieléctricos contaminados y descontaminación de las carcasas metálicas de los transformadores eléctricos, se enmarca dentro de los lineamientos que establece la política para alternativas de manejo a los residuos peligrosos. La política, claramente prioriza en el reciclaje, la recuperación, el tratamiento y el aprovechamiento de los residuos, para incorporarlos en los procesos productivos, como materias primas, desde una perspectiva ambiental, económica y socialmente viable, de tal manera que se conviertan en una oportunidad de negocios y generación de empleo y se facilite el proceso de disposición final con volúmenes y peligrosidades

menores. La disposición final es vista dentro de la política como última alternativa al manejo de RESPEL, para aquellos residuos cuyo reciclaje o tratamiento no sea una alternativa económica y técnicamente factible.

De acuerdo con lo anterior, la política apoya los procesos de reincorporación de residuos peligrosos en las cadenas productivas como una estrategia para elevar la competitividad entre los sectores y promueve la formalidad en el desarrollo de estas actividades. Algunos aspectos concluyentes de este documento se citan a continuación:

- ✓ Las empresas que brindan servicios para el manejo de residuos peligrosos son limitadas. En la actualidad solo existen 4 empresas exportadoras. Esto indica que el manejo esta restringido a la disposición final y no tiene en cuenta los objetivos fundamentales de la política.
- ✓ Teniendo en cuenta que los incentivos económicos y financieros son pocos, el gobierno nacional expedirá un documento CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social. Es una estrategia que permite articular todos los sectores para una asignación más sencilla y asegurada de recursos³³) para incentivar y atraer la inversión privada a través de estos incentivos, consolidando una plataforma de servicios con una oferta tecnológica con viabilidad ambiental, económica y social.
- ✓ Aunque actualmente no existe reglamentación técnica para el manejo de los residuos peligrosos dentro de las estrategias de la política esta expedir la norma pertinente para la implementación del Convenio de Estocolmo especialmente en lo relacionado con PCB.
- ✓ Se desarrollará una estrategia de asesoría y asistencia institucional a los municipios con mayor incidencia en el tema, para incorporar el manejo de residuos peligrosos en los planes de ordenamiento territorial e incluir sitios para la instalación de infraestructura para el tratamiento y disposición final.

³³ Conferencias Taller Nacional sobre Proyecto COP y Responsabilidades del Sector Productivo frente al tema de residuos peligrosos (Noviembre de 2005).

Legislación Colombiana

Teniendo en cuenta que no existe normatividad específica aplicable al tema de los PCB y por ello no tienen restricciones conocidas en la normatividad nacional; las disposiciones más claras en lo que respecta a bifenilos policlorados se establecen en el Anexo I del Convenio de Basilea y en la parte II del Anexo A del Convenio de Estocolmo del cuál el país es signatario.

De ser la RSM una de las alternativas para la eliminación de PCB en Colombia, se deberá cumplir con las normas que se presentan a continuación. En términos generales son las leyes que han ratificado convenios internacionales, la normatividad sobre emisiones y vertimientos, las regulaciones nacionales que existen en el tema de residuos peligrosos y los lineamientos para la solicitud de licencias ambientales.

Normatividad General

Decreto Ley 2811 de Diciembre 18 de 1974

Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el Título I y en el Título III (Reglamentado por la Resolución 2309 de 1986) de la Parte IV del Libro I, en el artículo 32 se establecen 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 y en el artículo 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.

Ley 99 de 1993

Por medio de la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones. En el artículo 5 en lo que se refiere a las Funciones del Ministerio establece dentro de ellas impedir la entrada al territorio nacional de desechos tóxicos y en el artículo 66 establece la competencia de los grandes centros urbanos en la disposición de los residuos tóxicos y peligrosos y en el desarrollo de proyectos de saneamiento y descontaminación.

Regulaciones sobre residuos peligrosos

- ✓ *Resolución 2309 de Febrero 24 de 1986.* Expedida por el Ministerio de Salud, establece normas en cuanto a residuos especiales. En el artículo 53 establece que para el funcionamiento de toda planta de residuos especiales, se requiere obtener autorización sanitaria de acuerdo con el procedimiento establecido en el Capítulo VIII.
- ✓ *Resolución 189 de Julio 15 de 1994.* Regulaciones para impedir la entrada al territorio nacional de desechos peligrosos. En la lista que presenta sobre las sustancias que confieren toxicidad a un residuo están los compuestos orgánicos halogenados (PCB).
- ✓ *Ley de la República 253 de 1996.* Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea firmado el 22 de Marzo de 1989.
- ✓ *Ley 430 de Enero 16 de 1998.* Se dictan normas prohibitivas en materia ambiental respecto a los desechos peligrosos según lo establecido en el Convenio de Basilea. Determina que los residuos serán exportados si el Estado no dispone de la capacidad técnica ni de los servicios requeridos o lugares de eliminación adecuados para eliminar los desechos de forma ambientalmente racional y eficiente. Algunas opciones importantes consideradas de eliminación son la utilización de los desechos como combustible (que no sea incineración directa) y la regeneración u otra

reutilización de los aceites usados. Entre otras cosas, establece la responsabilidad compartida desde la generación hasta la disposición final.

- ✓ *Resolución 415 del 13 de Marzo de 1998.* “Por medio de la cual se establecen los casos en los cuales se permite la Combustión de aceites de desecho y las condiciones técnicas para realizar la misma”. Determina que la concentración de PCB en los aceites usados que se utilizan como combustible único o en mezclas (dependiendo de la potencia térmica instalada) no debe ser superior a 50 mg/kg y la concentración de halógenos no debe superar los 1000 mg/kg.
- ✓ *Decreto 321 del 17 de Febrero de 1999.* “Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas en aguas marinas, fluviales y lacustres”.
- ✓ *Decreto 1609 del 31 de Julio 2002.* Expedido por el Ministerio de Transporte y Medio Ambiente. Reglamenta el manejo y transporte seguro de mercancías peligrosas por carretera.
- ✓ *Resolución 1446 del 5 de Octubre de 2005.* Por medio del cual se modifica parcialmente la resolución 415 de 1998. Aclara en el artículo primero algunas definiciones y establece en el artículo segundo que se prohíbe la utilización de aceites usados con concentraciones mayores a 50 ppm en hornos cementeros, en la industria metalúrgica, en plantas de generación de energía, en calderas y en hornos de tipo industrial o comercial. Se podrá mezclar el aceite tratado con otros combustibles sólo para las siguientes condiciones:
 1. Para mezcla hasta de un 40% la máxima concentración de PCB debe estar en 15 ppm.
 2. Para mezcla hasta de un 80%, la máxima concentración de PCB debe estar en 5 ppm.
- ✓ *Decreto 4741 del 30 de Diciembre de 2005.* Reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. El decreto establece las obligaciones y responsabilidades del generador, del transportista, del receptor y de los municipios. Dentro de las obligaciones del generador esta la elaboración de un plan de gestión integral de los residuos peligrosos en un plazo de 12 meses a partir de la entrada en

vigencia del decreto. El receptor debe dar cumplimiento a la normatividad de transporte, salud ocupacional y seguridad industrial. Entre otras disposiciones se prohíbe la importación de cualquiera de los 12 COP prioritarios.

- ✓ *Resolución 809 del 10 de Mayo de 2006.* Expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Por la cual se deroga la resolución 189 de 1994 y se permite la entrada al territorio nacional de residuos peligrosos.
- ✓ *Resolución 1402 de Julio 17 de 2006.* Expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Derroga la resolución anterior y establece que ninguna persona natural o jurídica podrá introducir al territorio nacional residuos tóxicos y nucleares.

Regulaciones sobre Vertimientos y Calidad de Aguas

- ✓ *Decreto 1541 de 1974.* Por el cual se reglamenta la parte III del libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974 de la utilización de las aguas.
- ✓ *Decreto 1594 de 1984.* Expedido por el Ministerio de Agricultura. Reglamenta la utilización del recurso hídrico y los vertimientos. Dentro de las sustancias que considera de interés sanitario están los PCB. Establece particularmente que el agua para consumo humano no debe tener niveles detectables de PCB y para destinar el uso a la conservación de la flora y la fauna, los niveles no deben superar los 0.0001 mg/kg.

Regulaciones sobre Emisiones y Calidad de Aire

- ✓ *Decreto 02 de 1982.* Por el cual se establecen las normas y parámetros de calidad de aire y límites máximos permitidos de emisión. Es importante tener en cuenta que ninguna de las normas de calidad de aire ni de emisiones para fuentes fijas regula explícitamente a los COP.
- ✓ *Decreto 948 de Junio 15 de 1995.* Expedido por el Ministerio de Medio Ambiente. Reglamenta la protección y el control de la calidad del aire.

- ✓ *Resolución 619 de 1997*. Por medio de la cual se enumeran las industrias o actividades que requieren permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas. La actividad de interés en este proyecto es la incineración de residuos industriales peligrosos.
- ✓ *Resolución 0058 del 21 de Enero de 2002*. Expedida por el Ministerio de Medio Ambiente. Se establecen límites máximos permisibles de emisión para diferentes sustancias (especialmente dioxinas y furanos) en incineradores y hornos crematorios de residuos y líquidos. Dentro de los residuos contemplados se encuentran los PCB en concentraciones menores o iguales a 50 ppm.
- ✓ *Resolución 0886 de 2004*. Expedida por el Ministerio de Medio Ambiente. Por el cual se modifica parcialmente la Resolución 0058 del 21 de Enero de 2002 y se dictan otras disposiciones.

Permisos Ambientales

- ✓ *Decreto 1220 de 2005*. Sobre licencias ambientales. En los numerales 9 y 13 del artículo 9 del Título II, establece la competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales para exigir licencia ambiental a “la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos” y a “los proyectos cuyo objeto sea el almacenamiento de sustancias peligrosas, con excepción de los hidrocarburos”. Una vez otorgada la licencia, establece que el beneficiario deberá cancelar las tasas ambientales a la autoridad ambiental en cuya jurisdicción se haga el uso, aprovechamiento y/o vertimiento respectivo.

Instrumentos económicos

Los instrumentos económicos existentes como tasas e incentivos tributarios son de aplicación general para inversiones en mejoramiento y control del medio ambiente pero no existen instrumentos específicos para evitar o remediar la contaminación con PCB.

Además de la normatividad anteriormente descrita, el país cuenta con una guía ambiental específica relacionada con el tema sobre el almacenamiento y transporte por carreteras de sustancias químicas peligrosas y residuos peligrosos y con dos proyectos de decretos propuestos por el estudio del CAEMA (2005) sobre un plan de gestión integrado de los contaminantes orgánicos persistentes y sobre las prohibiciones para dar cumplimiento al Convenio de Estocolmo.

Aspectos relacionados con el proceso de licenciamiento ambiental para la implementación de la tecnología RSM

De acuerdo con la revisión del decreto 1220 de 2005 y de las condiciones de operación conocidas de la tecnología RSM, no hay claridad jurídica si debe ser el Ministerio o las Corporaciones quienes otorguen la licencia ambiental. Para un primera fase de la implementación, en la cual, sería necesario hacer pruebas piloto, la licencia será asignada por la Corporación en cuya jurisdicción se hicieran las pruebas. En etapas posteriores, de utilización de la tecnología en diferentes partes del país, el Ministerio tomará la decisión de quién deba otorgar el permiso. El control y seguimiento del proyecto será realizado por la autoridad ambiental que otorga la licencia.

Los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental no existen. Para su elaboración, según la dirección de licencias, permisos y trámites del MAVDT, parte de la información que se requeriría son los antecedentes, la ubicación del proyecto (para este caso, zonas de mayor operación, rurales o industriales), los impactos ambientales asociados a su operación, caracterización y cantidades de residuos, emisiones y vertimientos. En caso de que las zonas de operación correspondan con zonas industriales, los requerimientos, para la obtención de la licencia, serán menos exigentes.

Capacidad Nacional

Los aspectos estudiados por CAEMA (2005) sobre la capacidad técnica del país para el manejo adecuado de COP, se centraron en la cuantificación y evaluación de la calidad de los laboratorios disponibles en el territorio nacional y el estado de las redes de monitoreo de calidad de agua y aire.

Calidad de laboratorios disponibles para el análisis de PCB

De un total de 45 instituciones analizadas, 26 cuentan con laboratorios, 14 de los cuales (52%) tienen la capacidad para analizar COP. De este 52% que puede analizar COP, tan sólo 3 (19%) pueden analizar PCB y 2 pueden analizar dioxinas y furanos (12.5%). En el anexo 8 está la descripción de los 3 laboratorios que tienen la capacidad de analizar PCB. De estos 3 laboratorios, dos pertenecen a entidades públicas, que tienen un carácter técnico-científico, educativo e informativo más que de regulación o autoridad; es decir, que ninguna de las autoridades ambientales regionales cuenta con laboratorios propios para efectuar análisis de PCB.

Estos resultados demuestran la insuficiente capacidad analítica que existe para el seguimiento y monitoreo de los PCB en el país (12% del total de la muestra) y el limitado número de personal encargado. Estas dificultades, impiden establecer si la eliminación es segura (irreversible) y ambientalmente racional.

Redes de Monitoreo

El país cuenta con redes de calidad de aire y no cuenta con redes de monitoreo del recurso hídrico superficial y subterráneo de aguas continentales para el control y seguimiento de la cantidad y calidad del recurso. Dentro de los análisis y reportes de las redes de calidad de aire no se incluyen a los PCB.

Discusión de los resultados del escenario 3

- ✓ El objetivo de plantear este escenario era encontrar una alternativa que hiciera un aprovechamiento máximo de los materiales, a costos mínimos, garantizando la protección del ambiente y de la salud de la población nacional. La exportación fue vista en este escenario, como una alternativa para aquellos residuos cuyo reciclaje o tratamiento no fuera una alternativa económica y técnicamente factible, tal como lo establece la política ambiental para la gestión integral de RESPEL. En este contexto, los materiales a exportar serían las partes porosas internas de los transformadores y el PCB puro o Askarel, cuyo tratamiento por medio de la reducción con sodio metálico demandaría grandes cantidades de reactivo. El costo de exportación para estos residuos estaría en US\$ 10.250.000.

- ✓ Las cantidades totales de aceite mineral contaminado son de 3.621 toneladas, de las cuales 3.114 toneladas tienen una concentración entre 50 ppm y 500 ppm. Este rango de concentración, fue el que se utilizó para hacer la parte A de contextualización de la tecnología al país, ya que, la capacidad teórica estaba limitada por este rango. En la contextualización, se pudieron establecer tiempos máximos y mínimos de tratamiento para el aceite mineral contaminado, de 15 años y 15 meses respectivamente. La tasa de tratamiento dependerá, como se explicó anteriormente, de los planes de eliminación que tienen las empresas del sector eléctrico y los tiempos estimados para la reconversión de sus equipos.

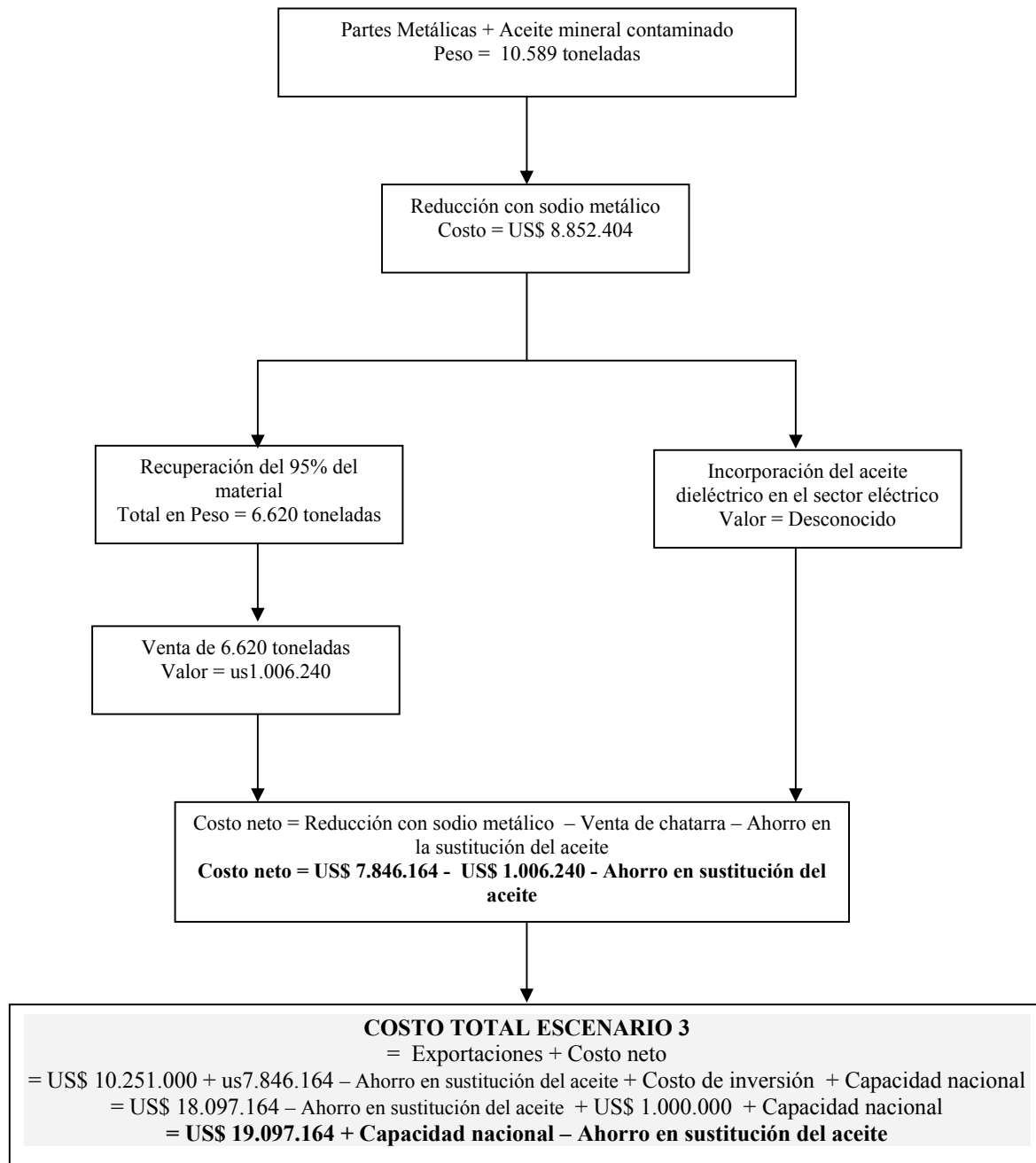
- ✓ Los problemas ambientales identificados en la construcción del escenario están asociados a la generación de residuos. Respecto a este punto, hay un vacío de información sobre las características de los insumos (el único reactivo conocido es el sodio metálico) puesto que se desconoce el donante de hidrógeno y otro tipo de sustancias que participan en la reacción y condicionan la formación de determinados residuos.

- ✓ La eficiencia de materiales de la parte B de este punto demuestra que para tasas de tratamiento máximas habría una generación de residuos del 18% del total de material que entra en el sistema. Este porcentaje, en condiciones reales, sería mucho menor y demostraría una eficiencia más satisfactoria.

- ✓ De la calidad de los residuos sólo se puede afirmar que tendrán pH elevados y que su toxicidad en lo que respecta a PCB se consideraría aceptable de acuerdo con los límites máximos que permite el país. No obstante, como queda un residual del contaminante, estos residuos deben cumplir con los lineamientos del decreto 4741 de 2005 sobre almacenamiento y disposición final.
- ✓ Para este escenario, además del valor agregado de la venta de chatarra, explicada en el escenario 2, existe un beneficio para el mismo sector poseedor en la recuperación del aceite mineral con unas condiciones físicoquímicas óptimas para su uso como refrigerante, que se traduce en un ahorro de costos para la sustitución de estos aceites. A esto se suma las posibilidades de generación de empleo asociadas con la apertura de los dos mercados, de chatarra y de aceite, la generación de ingresos adicionales para el sector, el incremento de la competitividad de las empresas y la experiencia que ganaría el país con la innovación tecnológica que incrementa la capacidad nacional a procesos de adaptación de nuevas tecnologías.
- ✓ Los beneficios que se explicaron anteriormente, sumados a los costos estimados en el esquema 5 se muestran en el esquema 6. Los costos totales netos del escenario 3 son el resultado de la suma de los costos de exportación, más los costos de tratamiento (que incluyen los de pretratamiento), menos el valor de las ventas de la chatarra, menos el ahorro en la sustitución del aceite, más los costos de inversión, más los costos adicionales relacionados con la capacidad nacional para soportar la tecnología. Se suman estos costos adicionales, teniendo en cuenta que de acuerdo con el análisis anterior realizado de la infraestructura nacional y el marco legal, el país no cuenta con los laboratorios ni redes para hacer el seguimiento y monitoreo de los PCB, ni con el marco legal específico e instrumentos económicos para regular estas sustancias y comprometer e incentivar a los poseedores a tomar medidas frente al problema de sus residuos.
- ✓ El costo total del escenario es de US\$ 19.097.164, más la inversión en capacidad nacional, menos el ahorro por la producción de aceite dieléctrico que se reincorpora en el sector. En este total, está incluido el costo de inversión de US\$ 1.000.000 que puede variar entre US\$ 250.000 y US\$ 1.000.000³⁴.

³⁴ Miller, E. Comunicación personal. Septiembre de 2006.

Esquema 6. Valor agregado del escenario 3



Comparación entre los escenarios

Análisis costo - beneficio

- ✓ En la tabla 29 se presenta la comparación económica de los escenarios, mostrando los costos asociados para cada uno de ellos y los beneficios económicos de su valor agregado. De acuerdo con los resultados, la alternativa más económica, partiendo del supuesto que los escenarios se desarrollan en el presente año, es la que se plantea en el escenario 3. Para este escenario, el costo de las exportaciones es de US\$ 10.251.000, 3 veces menos que lo que representa en el escenario 2 y 6 veces menos de lo que fuera tener la exportación como única alternativa a la eliminación. El costo de tratamiento (donde se encuentra incluida la limpieza con solventes de las partes metálicas), es de US\$ 9.952.404 que incluye el costo de inversión máximo tomado de US\$ 1.000.000. Este valor es alrededor de US\$ 3.000.000 más económico que la limpieza por sí sola, del escenario 2 y demuestra que en términos económicos sería más rentable el proceso de transferencia completo que sólo la fase de pretratamiento.
- ✓ En los gráficos 16 y 17 se pueden observar las distribuciones porcentuales del costo y las cantidades de la exportación y el tratamiento para los escenarios planteados. Es evidente, que en el escenario 3 las cantidades exportadas sólo corresponden a un 18% del total pero su costo equivale al 50% del costo total del escenario. Para el escenario 2, las cantidades que se exportan son del 46% y corresponden a casi el 70% del costo total. Lo anterior, indica que en la medida que la exportación sea tenida en cuenta para menos cantidades, los costos totales del escenario se reducen significativamente.
- ✓ Por otro lado, están los beneficios asociados por la aplicación de uno u otro escenario. Tener la exportación como única alternativa de eliminación, evita el gasto en inversión y garantiza una eliminación segura de los residuos mediante tecnologías térmicas de alto desempeño. No obstante, en términos ambientales no es una alternativa costo-eficiente, puesto que destruye materiales que pueden ser utilizados nuevamente en el sector industrial, que son no renovables y cuyo valor en el mercado se ha ido incrementando por su limitada disponibilidad en la naturaleza. Adicionalmente, las tecnologías con las cuales se lleva a cabo la eliminación al

exportar los residuos, demandan una gran cantidad de energía que debe ser abastecida por termoeléctricas o hidroeléctricas generando una presión aún mayor sobre los recursos.

- ✓ El beneficio de los escenarios 2 y 3 es tanto económico como ambiental. La venta de material metálico como chatarra generaría ingresos adicionales de US\$ 1.006.240 que para el escenario 3, subsidiaría los costos de inversión y para el escenario 2 se vería representado en una disminución de los costos. Ambientalmente se valora un residuo haciendo un aprovechamiento como materia prima útil, se reincorpora un residuo nuevamente en el sector industrial y se disminuyen considerablemente los residuos para la disposición final. En el escenario 3 se suman los beneficios de la obtención del aceite mineral como dieléctrico para su reutilización, la generación de empleo y el fortalecimiento de la capacidad nacional para la implementación de tecnologías.

Tabla 29. Análisis económico de los escenarios

Aspectos de comparación	Escenarios					
	1	2		3		
	Exportación	Limpieza	Exportación	Limpieza	Tratamiento	Exportación
Tasa de eliminación para un tiempo de 15 años	858 t / año	1723 equipos/año = 776 t / año	393 t / año	2000 equipos/ año = 900 t / año	208 t (50ppm-500ppm) / año	152 t / año
Cantidades	12.867 t	6968 t	5899 t	10.589 t		2.278 t
Materiales	Todo	Partes metálicas	Partes porosas, aceite mineral y PCB puro	Partes metálicas y aceite mineral		Partes porosas y PCB puro
Costos	US\$ 57.901.500	US\$ 12.995.320	US\$ 26.545.500	US\$ 8.852.404		US\$ 10.251.000
Costo de Inversión	0	Desconocido	0	US\$ 1.000.0000		0
Beneficio		Venta de chatarra = US\$1.006.240		Venta de chatarra = US\$ 1.006.240	Recuperación aceite dieléctrico = desconocido	
Otros costos				Capacidad nacional = desconocido		
COSTO NETO DEL ESCENARIO	US\$ 57.901.500	US\$ 39.540.820		US\$ 19.061.164		

Gráfico 16. Distribución porcentual del costo en exportación y tratamiento para los escenarios planteados

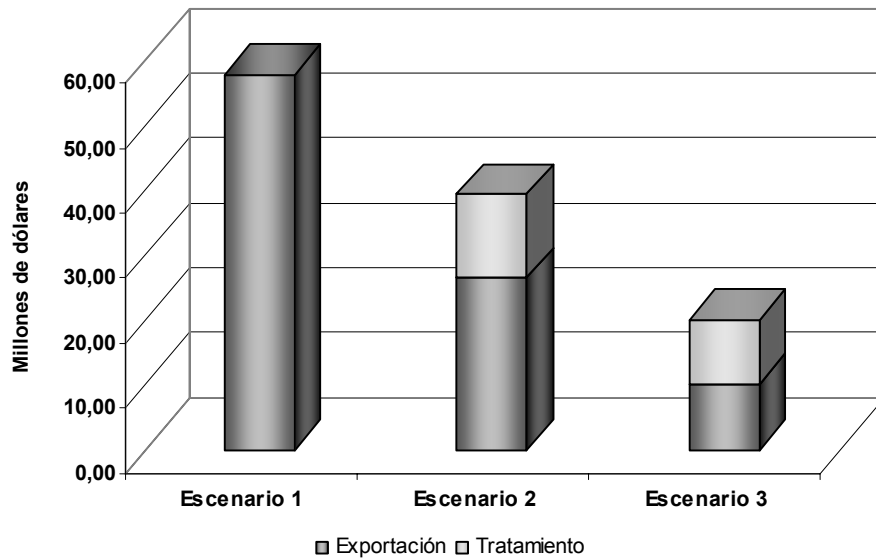
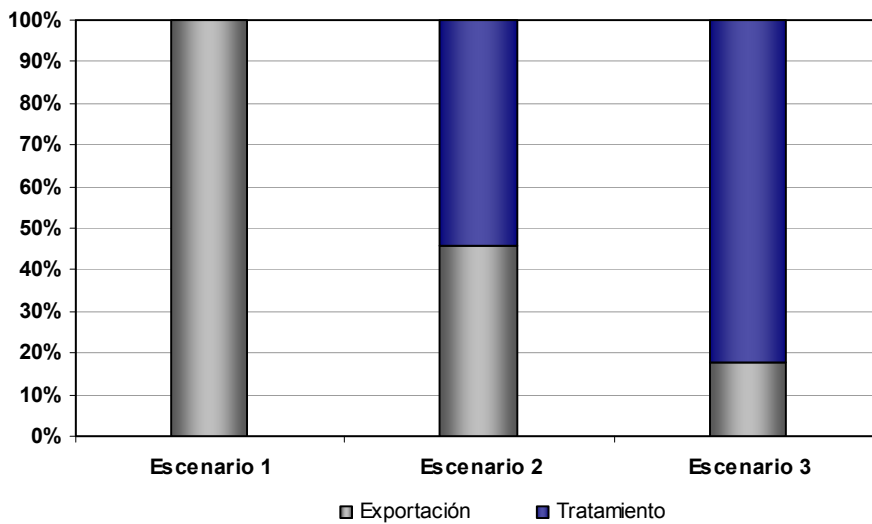


Gráfico 17. Distribuciones porcentuales del peso exportado y tratado para los escenarios planteados



Divulgación del proyecto al sector directamente involucrado y trabajos similares en Colombia

En la etapa de conformación de la base de datos se hicieron contactos nacionales del sector eléctrico. La propuesta fue conocida por el coordinador del CASEC (Comité Ambiental del Sector Eléctrico), Luís Fernando Cadena y por algunas personas pertenecientes a este comité de quienes se recibieron opiniones y retroalimentación. Para la Ingeniera Adriana Torres Velásquez, de Empresas Públicas de Medellín, los resultados del proyecto “serán de gran interés para el sector desde el punto de vista de recopilación de información y análisis realizados”. Gracias a esta divulgación, se pudo programar una visita el día 3 de Noviembre a la Universidad de Antioquia, en Medellín.

El objetivo de la reunión fue conocer los trabajos que se están haciendo en el país en torno a este tema. Uno de los trabajos son las pruebas piloto que ha llevado a cabo el Ingeniero José Evelio Amaya del grupo empresarial ISA, Interconexión eléctrica S.A. E.S.P., con sodio metálico para el proceso de la declorinación con resultados exitosos y otro es el trabajo de investigación de Maestría de la Ingeniera Isabel Cristina Pulgarín, de Empresas Públicas de Medellín, con el apoyo del Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación, de la Universidad de Antioquia, sobre la evaluación de tecnologías de declorinación y procesos de oxidación avanzada (Fotocatálisis y Fenton) para el tratamiento del aceite mineral contaminado.

De acuerdo con la información suministrada por José Evelio Amaya, los costos por kilogramo de sodio metálico están en el orden de COP \$ 800.000. De las pruebas aún no se han llevado a cabo suficientes ensayos para validarlas. Los laboratorios prestan servicios externos y el tiempo dedicado a esta fase de investigación ha sido limitado. Del trabajo de EPM, se espera que los resultados sean entregados en el mes de Noviembre del próximo año.

Estos dos trabajos de investigación, son una evidencia, de que el sector eléctrico Colombiano, demanda nuevas alternativas de eliminación para sus residuos PCB y está dispuesto a promover la investigación para encontrar las de mayor costo – eficiencia. Los resultados de estos dos estudios serán un excelente complemento para el planteamiento dado en este proyecto.

IX. CONCLUSIONES

- ✓ Ninguna alternativa cumplió en su totalidad con todos los criterios operativos, económicos y ambientales que fueron planteados para su evaluación.
- ✓ Una alternativa por sí sola no se considera costo – eficiente ni sostenible para el tratamiento de aceites minerales y descontaminación de transformadores contaminados en Colombia.
- ✓ Al tomar decisiones en la selección de una tecnología para el tratamiento de PCB se deben tener en cuenta simultáneamente los 7 criterios considerados como prioritarios para el grupo de expertos. El estado y la experiencia de la tecnología, los requerimientos de pretratamiento y postratamiento, la concentración final de los residuos PCB, la aplicabilidad a otro tipo de COP, la eficiencia de destrucción y los costos.
- ✓ Independiente de la subjetividad de las respuestas de los expertos, la metodología de análisis estructural muestra resultados objetivos que demuestran su validez y utilidad para la priorización de criterios.
- ✓ La metodología utilizada se considera adecuada para la evaluación de metodologías de transferencia de tecnología.
- ✓ El estado y la experiencia de la reducción con sodio metálico es el criterio clave que determina su elección como tecnología promisoría.
- ✓ El escenario en el que se combinan el tratamiento físico, el tratamiento químico con sodio metálico y la exportación son un escenario favorable en términos económicos y ambientales para la eliminación de PCB en el país. Si el proyecto hubiese tenido en cuenta dentro de su grupo de residuos los suelos contaminados, la biotecnología sería un excelente complemento para el tratamiento integral de estos residuos tóxicos.

- ✓ Los resultados de este proyecto son una evidencia más de que trabajar por el mejoramiento ambiental, representa ahorros e ingresos económicos adicionales a las empresas.
- ✓ Para garantizar un proceso de transferencia tecnológica exitoso, se debe fortalecer la infraestructura nacional y el marco legal existente, puesto que la capacidad nacional es insuficiente y no existe normatividad específica en lo que respecta a PCB.
- ✓ Se están desarrollando tecnologías locales para hacer el tratamiento de los aceites minerales contaminados. De tener resultados positivos, esta alternativa eliminaría la necesidad de depender tecnológicamente de los países desarrollados.

X. RECOMENDACIONES

- ✓ Garantizar un proceso efectivo con el “Plan de Acción para el Manejo de Existencias y Eliminación de los PCB” que está elaborando el MAVDT dentro del Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo, para las fases previas a la eliminación en la gestión integral de RESPEL. Si las fases de elaboración del inventario consolidado, manipulación, almacenamiento y transporte tienen buenos resultados, el proceso de eliminación se llevará a cabo de manera satisfactoria.
- ✓ Existen otras soluciones tecnológicas para el tratamiento y descontaminación de COP, cuya fase de desarrollo es aún temprana que no deben ser descartadas en un proceso de selección de tecnologías. La academia debe fortalecer el trabajo investigativo sobre estas alternativas para encontrar la que realmente se ajuste a las condiciones del país.
- ✓ Para usos futuros de la metodología de priorización de criterios, sería importante que los expertos encuestados conocieran a profundidad las condiciones específicas del país para el cual se quiere hacer el proceso de transferencia tecnológica, de tal manera que su opinión sea compatible con el problema. Cuando los expertos priorizan desde su experiencia en otros países, las organización de los criterios difiere de las condiciones reales.
- ✓ La fase siguiente de esta propuesta debe ser la validación experimental de la información mediante pruebas de laboratorio y pruebas piloto para hacer la comprobación técnica del análisis económico, ambiental y legal realizado en el presente estudio. Se deben garantizar eficiencias de remoción superiores al 99% ya que de lo contrario las liberaciones de PCB al ambiente, serían significativas y podrían generar efectos sobre la salud y el ambiente
- ✓ Teniendo en cuenta que en Colombia se generan alrededor de 500.000 toneladas anuales de residuos peligrosos, con las pruebas piloto, se debería evaluar la versatilidad de las tecnologías de tratamiento de PCB para otro tipo de COP y otros residuos peligrosos, de tal manera que se fortalezca realmente el manejo integral de los RESPEL.

XI. LISTA DE REFERENCIAS

1. Bejarano, F. (2004) *Guía Ciudadana para la aplicación del Convenio de Estocolmo*. RAPAM (Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México). Méjico.
2. Cárdenas, J.H. (2006). *Formulación de alternativas ambientalmente apropiadas para la disposición final de plaguicidas en desuso incautados por el Estado*. Tesis de pregrado no publicada. Universidad de la Salle, Bogotá.
3. Centro de Estudios y Control de Contaminantes, (1994). Determinación de Bifenilos Policlorados Residual y Plaguicidas Organoclorados en peces en la bahía de la isla de Utila. Honduras. Recuperado en:
<http://www.cescoco.gob.hn/informes/Determinacion%20de%20Bifenilos%20Policlorados.pdf>
Noviembre de 2005.
4. Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente, CAEMA. (2005) *Evaluación de la Capacidad Institucional e Infraestructura Disponible y Evaluación del Marco Regulatorio para la Gestión de COP en Colombia*. Contrato 651/2004 PNUD. Bogotá.
5. *Convenio de Basilea Sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación Adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios del 22 de Marzo 1989*. Entró en vigor en Mayo de 1992.
6. *Convenio de Estocolmo Sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*. Entró en vigor en Mayo de 2004. Suecia. Disponible en versión pdf:
http://www.pops.int/documents/convtext/convtext_sp.pdf#search=%22Convenio%20de%20Estocolmo%22

7. Costner, P. (2004) *Non-combustion Technologies for the Destruction of PCB and Other POPs Wastes: Civil Society, International Conventions and Technological Choices*. Greenpeace International. Amsterdam, Netherlands.
8. Cummins, J. (1998) *Can the World's Sea Mammals Survive Them?*. Recuperado en Octubre de 2005. Disponible en versión html:
<http://www.mindfully.org/Pesticide/PCBs-Sea-Mammals-CumminsSep98.htm>
9. ECOPETROL. Recuperado de:
<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/catalogo/combustoleo.htm>. Octubre de 2006.
10. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Hidrocarburos Aromáticos. Guía de Productos Químicos. Recuperado de: http://www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo4/104_07.pdf.
Noviembre de 2005.
11. Environment Australia CMPS&F (1997). Appropriate technologies for the treatment of scheduled wastes. Base Catalized Dechlorination. Recuperado de:
<http://www.deh.gov.au/settlements/publications/chemicals/scheduled-waste/swtt/base.html>. Agosto de 2006.
12. Exxon (1980). Encyclopedia for the user of petroleum products.
13. Fichas de Seguridad de Laboratorio. Recuperado de: www.segulab.com. Septiembre de 2005.
14. Fuel – Oil. Recuperado de: http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_oil. Noviembre de 2006.
15. Godet, M (1999). *De la anticipación a la acción. Manual de prospectiva y estrategia*. Editorial ALFOMEGA. Bogotá.

16. Inter-Organization Programme for the sound management of chemicals {IOMC}. (2000) *Proceedings, UNEP Chemicals Workshop on the Management of Polychlorinated Byphenyls and Dioxins/Furans*. Montevideo, Uruguay.
17. Kumar, D. (2004, Marzo) *Disposición Final de Desechos Peligrosos*. Congreso Internacional & Salón de Expositores en Tecnología Medio Ambiental, AMBIENTEC. [CD ROM]. Bogotá.
18. LIBOR. Recuperado de http://www.superbancos.gob.pa/aspec_proteccion/documentos/glosario/L.doc. Noviembre de 2006.
19. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT. (2006) *Ficha Toxicológica PCB*. Documento electrónico. Disponible en versión pdf: http://www.minambiente.gov.co/viceministerios/ambiente/dir_des_sect_sostenible/cop/documentos/Fichas%20toxicol%C3%B3gicas%20COP/PCBs_R.pdf#search=%22ficha%20toxicologica%20PCB%22
20. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT (2005). *Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*. Programa Inicial de Asistencia Técnica para Colombia. [Folleto]. Cara B. Pliego 1.
21. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005) *Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos*.
22. Mojica, F. (1991). *La prospectiva. Técnicas para visualizar el futuro*. Editorial Legis. Bogotá.
23. NOVA Chemicals. Material Safety Data Sheet. Recuperado de: http://www.novachem.com/ProductServices/docs/FuelOilNo2_MSDS_EN.pdf#search=%22fuel%20oil%202%22. Septiembre de 2006.
24. OCADE-LITO-SANIPLAN. (2006) *Inventario Preliminar de Compuestos Bifenilos Policlorados – PCB – Existentes en Colombia*. Documento final no oficial en formato electrónico.

25. Pontificia Universidad Javeriana, Subcentro de Seguridad Social y Riesgos Profesionales & Centro de Proyectos para el Desarrollo {CENDEX}. (2006) *Evaluación de los Impactos a la Salud (Pública y Ocupacional) Asociados a los Contaminantes Orgánicos Persistentes, COP*. Documento Técnico ASS/1366—06. Bogotá.
26. Proyecto CERI-ACDI-COLOMBIA, Ministerio del Medio Ambiente, Douglas White and Associates. (1999) *Manual de Manejo de PCBs para Colombia*. Informe Final. Bogotá.
27. Production of sodium, lead and bismuth. Recuperado de: http://www.iaea.org/inis/aws/fnss/fulltext/1289_4.pdf. Production of sodium, lead and bismuth. Octubre de 2006.
28. Rahuman, M., Pistone, L., Trifiro, F. & Miertus, S. (2000) *Destruction Technologies for Polychlorinated Biphenyls (PCBs)*. International Centre for Science and High Technology United Nations Industrial Development Organization, ISC-UNIDO Publications. Italia.
29. Reacción de Wurtz. Recuperado de: <http://isaurahl.tripod.com/OXINALCANOS.htm>. Agosto de 2006.
30. Riffo, L. (1997). Métodos de investigación prospectiva para la toma de decisiones. En E.Ortegón & J. Medina (Comps.). *Prospectiva: Construcción social de futuro* (pp.108 – 148). Cali. Colombia.
31. SANEXEN (1999). *DCR process decontamination of transformer oil technical characteristics. Presentation document – DCR process*.
32. Secretaría del Convenio de Basilea {SBC}. (2002) *Destruction and Decontamination Technologies for PCBs and other POPs wastes under the Basel Convention. A Training Manual for Hazardous Waste Project Managers*. Volúmenes A, B y C.

33. Secretariat of the Basel Convention. (2006) *General technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting or contaminated with persistent organic pollutants (POPs.)*. Recuperado en Julio de 2006. Disponible en versión word: <http://www.basel.int/techmatters/techguid/frsetmain.php?topicId=0>
34. Smith, D. (2004). *Biotecnología*. Ed Acribia S. A. España.
35. Sodium. Recuperado de: <http://experts.about.com/e/s/so/sodium.htmwikipedia.org/wiki/Sodio>. Octubre 2006.
36. Unites Nations Environment Program {UNEP} Chemicals & Secretariat of the Basel Convention. (1998) *Inventory of World-wide PCB Destruction Capacity*. Disponible en versión pdf: <http://www.chem.unep.ch/Pops/pdf/pcbrrpt.pdf#search=%22Inventory%20of%20Worldwide%20PCB%20destruction%20capacity%22>
37. UNEP Chemicals. (2000) *Survey of Currently Available Non Incineration PCB Destruction Technologies*. Recuperado en Septiembre de 2005. Disponible en versión pdf: <http://www.chem.unep.ch/pops/pdf/surveypcb/PCBdesteng.pdf>
38. UNEP Chemicals (2002). *PCB Transformers and Capacitors. From Management to Reclassification and Disposal*. Disponible en versión pdf: <http://www.chem.unep.ch/Pops/pdf/PCBtranscap.pdf>
39. UNEP & Secretaría del Convenio de Basilea (2003) *Convenio de Basilea, Manual de Capacitación. Preparación de un plan nacional de manejo ambientalmente adecuado de los bifenilos policlorados (PCB) y de equipos contaminados con PCB*. Serie del Convenio de Basilea N° 20003/01.
40. UNEP/CHW.7/8add.2/Rev.1. (2004) *Directrices técnicas para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en bifenilos policlorados, terfenilos policlorados o bifenilos polibromados, que los contengan o estén contaminados con ellos*.

41. UNEP. The Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environment Facility, (2004) *Review of emerging, innovative technologies for the destruction and decontamination of POPs and the identification of promising technologies for use in developing countries.*
42. U.S Environmental Protection Agency. (1996) *A Citizen's Guide to Chemical Dehalogenation*, EPA/542-F-96-004. Recuperado Mayo 11 de 2006. Disponible en version pdf:
http://clu.in.org/download/citizens/chemdehalo_sp.pdf#search=%22guia%20del%20ciudadano%20la%20deshalogenacion%20quimica%22
43. U.S Environmental Protection Agency {EPA}. Polychlorinated Biphenyls. Recuperado en Octubre de 2005. Disponible en: <http://www.epa.gov/opptintr/pcb/effects.html#Cancer>
44. Varela, R (1997). *Evaluación económica de proyectos de inversión*. Grupo editorial Iberoamérica de Colombia S.A. Colombia.
45. Vijgen, J. & McDowall, R. (2002) *Base Catalyzed Decomposition, (DCB)*. POPs Technology Specification and Data Sheet. International HCH and Pesticides Association. Auckland, New Zealand.
46. Vijgen, J. & McDowall, R. (2002) *Gas Phase Chemical Reduction (RQFG)*. POPs Technology Specification and Data Sheet. International HCH and Pesticides Association. Auckland, New Zealand.
47. Vijgen, J. & McDowall, R. (2002) *Super Critical Water Oxidation (OASC)*. POPs Technology Specification and Data Sheet. International HCH and Pesticides Association. Auckland, New Zealand.
48. Vijgen, J. & McDowall, R. (2005) *Alkali Metal Reduction, (AMR)*. POPs Technology Specification and Data Sheet. International HCH and Pesticides Association. Auckland, New Zealand.

XII. GLOSARIO

Residuos PCB

Líquidos, sólidos o sustancias que contengan PCB en concentraciones por encima de 50 ppm (mg/kg) o 0.005% en peso. Se considera este nivel como valor práctico internacional para todos los residuos (26).

Líquidos PCB

Son aquellos líquidos que contienen concentraciones de PCB por encima de 50 mg/kg o ppm. En este grupo están los aceites minerales contaminados con PCB y el Askarel (26).

Fluido Dieléctrico

Sustancia que no conduce la energía eléctrica, utilizada como refrigerante en los transformadores.

Desecho PCB

Cualquier sustancia, líquido, sólido o equipo con contenido de PCB o contaminado con ellos que no se puede volver a utilizar (26).

PCB Puro o Askarel

Es el líquido cuya concentración es mayor a las 1000 ppm (24).

Deshalogenación

Es un proceso químico en el cual se remueven los halógenos de una molécula sustituyéndolos por hidrógeno o por un radical reductor donante de hidrógeno para quitar su toxicidad. Cuando el halógeno que se sustituye es el cloro el proceso se denomina *dechlorinación* (28) y se obtiene un

aceite libre de cloro que puede ser reutilizado o reciclado (37). La decloración química se puede llevar a cabo con un metal alcalino enlazado a un grupo orgánico como el polietilenglicol de sodio o con un óxido o hidróxido de metal alcalino (36).

Descontaminación o Tratamiento

Término referido a la decloración química de un líquido, sólido o sustancia PCB (26). En términos generales es considerado el conjunto de operaciones procesos o técnicas mediante las cuales se modifican las características de los residuos peligrosos para incrementar sus posibilidades de aprovechamiento y/o valorización con el fin de minimizar los riesgos sobre la salud y el ambiente (Decreto 4741 de 2005).

Dstrucción de PCB

Eliminación de la molécula PCB por medios térmicos (26)

Tecnología Selectiva

En lo que se refiere a este proyecto corresponde a aquella tecnología que no destruye el aceite (de transformador) que entra en el proceso de descontaminación.

Eficiencia de destrucción (DE)

Es un indicador que se define como la masa total de COP que entra a un proceso menos la masa de COP en todos los productos, coproductos y descargas ambientales dividido entre la masa total de entrada de COP para dar como resultado un porcentaje (41). Este valor permite evaluar la eficiencia de la destrucción de COP de una tecnología y por ello se considera como uno de los parámetros prioritarios para la selección de tecnologías. Se diferencia de la DRE en que tiene en cuenta dentro de las salidas, emisiones, vertimientos y descargas de sólidos (7). Para que una tecnología sea aceptada y aprobada para la destrucción de plaguicidas obsoletos debe tener una DE superior al 99.99% (37).

$$DE = \frac{\text{Cantidad de COP que entra} - \text{Cantidad de COP que sale en forma de residuos líquidos, sólidos y gaseosos}}{\text{Cantidad de COP que entra}}$$

Eficiencia de Destrucción y Remoción (DRE) (7)

Al igual que la DE es un indicador en porcentaje que permite evaluar la eficiencia de la destrucción de COP de una tecnología, pero, a diferencia, dentro de las salidas, solo tiene en cuenta las descargas al aire.

$$DRE = \frac{\text{Cantidad de COP que entra} - \text{Cantidad de COP que sale en emisiones al aire}}{\text{Cantidad de COP que entra}}$$

Dioxinas y Furanos

Son dos familias de hidrocarburos aromáticos halogenados, de origen antropogénico y/o producto de la Combustión cuya generación es no intencional. 21 de sus congéneres son considerados altamente tóxicos en bajas concentraciones (Decreto 0886 de 2004).

Reacción de Wurtz

Consiste en la unión de dos radicales alquilo por la acción de sodio metálico sobre los halogenuros de alquilo (29).

Fuel Oil No 6 o Combustóleo

Es un combustible elaborado a partir de productos residuales que se obtienen de los procesos de refinación del petróleo crudo, cuyo número depende de la temperatura de ebullición, la composición y el uso. El costo aumenta cuando el número del combustóleo disminuye. Este compuesto tiene un contenido elevado de azufre, (muchas veces superior al 3% en peso), que tiene efectos corrosivos en

sistemas cerrados, disminuye la vida útil de los equipos y genera problemas de contaminación significativos (14). Es un compuesto persistente que no se degrada con facilidad. El fuel oil No 2, cuando se descompone, emite monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos de bajo peso molecular, gases ácidos, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre que se consideran compuestos tóxicos (23).

Equivalente tóxico (TEQ)

Cantidad tóxica equivalente dada entre la concentración del compuesto y su TEF (Factor de Toxicidad Equivalente).

Punto de ignición o llama (43)

Temperatura a la que la concentración de un vapor de un combustible líquido es suficiente para sostener la combustión.

Punto de destello (43)

Temperatura más baja a la cual el vapor de un combustible líquido puede prenderse momentáneamente en el aire. Es un indicador importante de los peligros de incendio y explosión asociados con productos de petróleo.

ANEXO 1

TECNOLOGÍAS PROPUESTAS POR LA SECRETARIA DE BASILEA PARA LA DESCONTAMINACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE COP

CATEGORÍA A (Commercialised technologies with considerable experience)

Gas Phase Chemical Reduction (RQFG)
Base Catalysed Decomposition
Sodium Reduction
Super-Critical Water Oxidation (OASC)
Plasma Arc
Pyrolysis/Gasifiers

CATEGORÍA B (Technologies near or at the start of commercialization)

Molten Salt Oxidation
Solvated Electron Technology

CATEGORÍA C (Promising technologies)

Ball milling
GeoMelt Process
Mediated electrochemical oxidation (CerOx)
Mediated electrochemical oxidation (AEA
Silver II Process)
Catalytic hydrogenation

CATEGORÍA D (Technologies wich require significant research)

Sin información

CATEGORÍA E (Technologies which are unlikely to be applicable for destruction of POPs stockpiles)

MnOx/TiO2-Al2O3 Catalyst Degradation
TiO2-based V2O5/WO3 Catalysis
Fe(III) Photocatalysis Degradation
Ozonation/Electrical Discharge Destruction
Molten Metal
Molten Slag Process

ANEXO 2

COSTOS ACTUALES DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS EN COLOMBIA

DÓLARES (US\$)**	COLOMBIA	
	Residencial	Comercial e Industrial
Agua		
Tarifa Media Básica (\$/M3)	0,49	0,76
Alcantarillado		
Tarifa Media Básica (\$/M3)	0,31	0,46
Aseo		
\$/Cliente	4,20	-
Pequeños Productores \$/M3	-	11,82
Grandes Productores \$/M3	-	14,26
Gas Natural		
Costo Variable \$/M3	0,98	3,84
Cargo Fijo \$/mes	0,20	0,20
Energía Eléctrica		
Tarifa \$/Kwh.	0,099	-
Tensión 4	-	0,057
Tensión 3	-	0,062
Tensión 2	-	0,094
Tensión 1	-	0,094
Teléfono		
Cargo de Conexión	69,62	83,53
Costo Variable \$/IMP	0,03	0,03
Cargo Fijo \$/mes	4,88	5,86

Fuente: Compañías de servicios públicos procesada por PROEXPORT. Recuperado en: www.proexport.com.co. Septiembre de 2005.

* Cálculos para primer semestre 2006* * Se utilizo una tasa de cambio de \$2320/US\$

ANEXO 3

GRUPO DE EXPERTOS ESCOGIDOS PARA LA METODOLOGÍA DE PRIORIZACIÓN DE CRITERIOS

Nombre	País en el que reside	Empresa en la que trabaja	Cargo	Razón de selección	Contacto
Keith Lee	Canadá	Powertech Labs	Gerente tecnologías químicas	Promueve RSM	Keith.Lee@powertechlabs.com
Luciano González	Canadá	Kinectrics	Asuntos internacionales	Promueve RSM	Luciano.Gonzalez@kinectrics.com
Jean Paquin	Canadá	Sanexen	Servicios ambientales	Promueve RSM	jpaquin@sanexen.com
Edward Miller	USA	SD Myers	Asuntos comerciales	Promueve RSM	Ed.Miller@sdmyers.com
Charles Rogers	USA	DCB Inc.	Co-inventor tecnología DCB	Promueve DCB	charles1100@sbcglobal.net
William P. Kelly	USA	Environmental Solution and Technologies LLC	Vice-Presidente. International Project Development	Promueve DCB	WILLIAMPKELLY@peoplepc.com
Marian Barquin	España	Sociedad Pública de Gestión Ambiental (IHOBE)	Coordinadora de sostenibilidad ambiental	Tuvo experiencia con DCB	marian.barquin@ihobe.net
Isabel Cristina Pulgarin	Colombia	EPM	Ingeniera Ambiental	Investigación en decloración	ipulgari@eppm.com
José Evelio Amaya	Colombia	ISA	Jefe de laboratorio	Investigación en decloración	jeamaya@ISA.com.co

ANEXO 4

LISTA DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

1. Estado y experiencia en el mercado
2. Requerimientos de pretratamiento
3. Requerimientos de postratamiento
4. Eficiencia de Destrucción
5. Concentración final de PCB en los residuos
6. Capacidad
7. Aplicabilidad a otro tipo de COP
8. Requerimientos de agua
9. Requerimientos de energía y combustible
10. Características y demanda de reactivos
11. Configuración de las plantas (Fijas o Móviles) y demanda de espacio
12. Demanda de personal
13. Características de los residuos sólidos generados o subproductos
14. Capacidad de reutilización o reciclaje de los residuos
15. Residuos líquidos
16. Emisiones
17. Riesgos
18. Costos

ANEXO 5

MATRICES EVALUADAS POR EL GRUPO DE EXPERTOS

A. Evaluación de Charles Rogers (DCB Technologies)

	Estado y Experiencia	Requerimientos de pretratamiento	Requerimientos de postratamiento	Eficiencia de Destrucción	Concentración final de residuos PCB	Aplicabilidad a otro tipo de COP	Costos
Estado y Experiencia		3	3	4	4	4	3
Requerimientos de pretratamiento			3	4	4	4	3
Requerimientos de postratamiento				4	4	4	3
Eficiencia de Destrucción					4	4	3
Concentración final de residuos PCB						4	3
Aplicabilidad a otro tipo de COP							3
Costos							

B. Evaluación de Jean Paquin (Sanexen)

	Estado y Experiencia	Requerimientos de pretratamiento	Requerimientos de postratamiento	Eficiencia de Destrucción	Concentración final de residuos PCB	Aplicabilidad a otro tipo de COP	Costos
Estado y Experiencia		1	1	1	1	1	1
Requerimientos de pretratamiento			1	2	2	1	2
Requerimientos de postratamiento				1	2	1	2
Eficiencia de Destrucción					2	1	2
Concentración final de residuos PCB						1	2
Aplicabilidad a otro tipo de COP							1
Costos							

B. Evaluación de José Evelio Amaya (ISA)

	Estado y Experiencia	Requerimientos de pretratamiento	Requerimientos de postratamiento	Eficiencia de Destrucción	Concentración final de residuos PCB	Aplicabilidad a otro tipo de COP	Costos
Estado y Experiencia		3	3	4	4	3	4
Requerimientos de pretratamiento			3	4	4	2	4
Requerimientos de postratamiento				2	2	2	4
Eficiencia de Destrucción					4	3	4
Concentración final de residuos PCB						3	4
Aplicabilidad a otro tipo de COP							3
Costos							

ANEXO 6

TASAS DE CAMBIO Y TASA DE INTERÉS LIBOR PARA LOS CÁLCULOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

Moneda	Dólares de Estados Unidos por unidad monetaria	Fecha
Euro	0,94	Dic 2000
	1,256	Dic 2003
	1,326	Nov 2004
Dólar Canadiense	0,67	Dic 2000
	0,83	Dic 2004
	0,86	Dic 2005
Libra esterlina	0,9082	Oct 2006

Tomado de: Banco de la República. Series estadísticas. Tasas de cambio. Recuperado de: http://www.banrep.gov.co/series-estadisticas/see_ts_cam.htm. Octubre de 2006

Tasa de interés LIBOR	Año
0,0596	2000
0,019	2001
0,0148	2002
0,0143	2003
0,0308	2004
0,0482	2005
0,0527	2006

Tomado de: Banco de la República. Informes estadísticos. Tasas de interés externas. Recuperado de: <http://www.banrep.gov.co/estadcam/interes/home4.htm>. Septiembre de 2006

ANEXO 7

A. PRECIOS INTERNACIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE PCB EN EL EXTERIOR

Empresa/país	Intervalo de Precios por servicio por Kg/euros (Año 2003)		
	Tratamiento	Transporte	Integrado
EKOCEM/Finlandia	1.00	2.50 - 3.00	3.50 - 4.50
España ²	0.90 (sólidos)	2.50 - 3.00	3.40 - 3.90
	0.78 (líquido)		3.28 - 3.78
	1.35-1.44		3.85 - 4.44
	(condensadores)		

Tomado de: SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México). Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. Recuperado de: <http://www.semarnat.gob.mx/dgmic/bpc/Inventarios/inventario.shtml>. Julio de 2006

B. NOTICIA: "Habilitan en La Plata planta para el tratamiento de PCB". Diciembre 30 de 2004. Periódico El día, La Plata. Argentina. Recuperado de:

<http://www.estrucplan.com.ar/Secciones/Noticias/Noticia.asp?Codigo=2050>

"...Procesar el PCB aquí sería altamente perjudicial desde el punto de vista del medio ambiente; y tampoco se justifica desde el costado económico" puntualiza Guillermo Espinosa, que anticipó que la entidad presentará un recurso de amparo relacionado con el tema: "según varios estudios que llevamos adelante, tratar -hasta la eliminación total- cada litro de aceite con PCB cuesta en Francia apenas un dólar, más 74 centavos de euro por el transporte".

"En una planta local, se habla de 2 ó 3 dólares por litro la llamada 'decoloración', que deja residuos que a su vez deben ser transportados, analizados, y dispuestos en un relleno de seguridad" explicó el representante del Observatorio Social: "todo eso agrega costos, y no borra el riesgo ecológico sino lo esconde en un relleno".

ANEXO 8

DESCRIPCIÓN DE LOS LABORATORIOS EXISTENTES PARA EL ANÁLISIS DE PCB

Institución donde se encuentra el laboratorio	SGS COLOMBIA Barranquilla	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER Bucaramanga	IDEAM Bogota
Acreditación o Certificación	IDEAM 2004	En proceso	No
Programa de Aseguramiento	ISO 17025 (2004)	No	ISO 17025 (2004)
Red de Intercalibración	No	No	Secretaría Convenio de Estocolmo
Ámbito de trabajo	Público e institucional	Público e institucional	Público e institucional
Experiencia	PCB en aguas y en suelos, dioxinas y furanos en agua, suelos y aire.	PCB Agua, residuos, suelo, efluentes, vegetación, alimentos y agua. No hace análisis de dioxinas y furanos	Aceites PCB Aceites. No hace análisis de dioxinas y furanos.
Equipos Disponibles	Cromatografía de Gases – ECD, Cromatógrafo de Gases de Alta Resolución HRMS, Espectrómetro de masas de Alta Resolución HRMS (todos en buen estado). Tiempo de servicio (5 años).	Espectrómetro de Absorción Atómica, Espectrofotómetro UV (Visible) (Todos en buen estado).	Cromatografía de Gases (LR) con Detección de Masas, Cromatografía de Gases (HR) con Captura de Electrones, Cromatografía Fase Líquida. Todos en buen estado. Tiempo de servicio (11, 4, 4 años).
Recursos Humanos	Total de personal	8	2
	Personal Asignado	1 Directivo 7 Técnicos	1 Directivo 1 Asistencial
	Perfil Profesional	3 Técnicos 5 Profesionales	1 Básico 1 Especializado
	Tipo de Vinculación	8 por contrato	2 por contrato
			2 de planta

