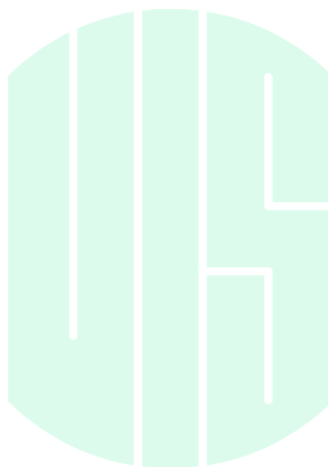


**EVALUACIÓN DEL POLICARBONATO POST-CONSUMO COMO INTERCAMBIADOR IÓNICO,
OBTENIDO A PARTIR DE DISCOS COMPACTOS**

WILFREDO QUINTANILLA RINCON



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA

2010

**EVALUACIÓN DEL POLICARBONATO POST-CONSUMO COMO INTERCAMBIADOR IÓNICO,
OBTENIDO A PARTIR DE DISCOS COMPACTOS**

WILFREDO QUINTANILLA RINCON

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar por el título de Químico

Director:

MSc. José Carlos Gutiérrez

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2010

FRASES CELEBRES

“miserable cosa es pensar ser maestro el que nunca ha sido discípulo”

Fernando de Rojas

“la imaginación es más importante que el conocimiento”

Albert Einstein

“para investigar la verdad es preciso dudar, en cuanto sea posible, de todas las cosas”

René Descartes

DEDICATORIA:

*A Dios por su infinita misericordia
a mis padres por su paciencia y amor
a mi hermana y cuñado por su apoyo brindado
a mi princesita Solangie muy especialmente
a mis abuelos que con sus historias me enseñaron la importancia de la palabra*

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al profesor MSc. JOSÉ CARLOS GUTIÉRREZ, director de este proyecto, por su colaboración, apoyo incondicional y confianza para el desarrollo de este trabajo.

A los profesores PhD. ENRIQUE MEJIA OSPINO y Dr. Rer. Nat. JUAN MANUEL URBINA, por sus recomendaciones y la evaluación de este proyecto.

Al profesor Esp. JUAN CARLOS LASERNA MONTOYA por sus aportes en ortografía y redacción.

A la Qca. ANDREA AGUDELO, por su apoyo, afecto y brillantes aportes en el desarrollo del presente trabajo.

A la profesora MARION DEL PILAR PORTACIO, por su aporte en lengua extranjera inglés.

A JHON JAIRO MOYA, por su aporte como diseñador gráfico.

Al LABORATORIO DE SUELOS, por su colaboración prestada en el suministro de agua desionizada ultra pura grado 2.

A los técnicos del laboratorio Adolfo, Ramiro, George y Alejandro.

A la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales DIAN y en persona a EDUARDO CALDERON a cargo de la Oficina de Comercio Exterior, por su colaboración prestada en el programa SIEX.

A SONIA GARCÍA encargada del área de proceso y calidad de GAIKER Centro Tecnológico - España, por sus aportes en material bibliográfico.

A RAÚL PIÑERO Ingeniero Químico Universidad de Valladolid - España, por su soporte bibliográfico suministrado.

Al GUSTAVO ADOLFO PALACIO director ejecutivo de APDIF - Colombia, por sus aportes en material bibliográfico.

A todos mis compañeros del laboratorio de química industrial.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1. LOS MATERIALES PLÁSTICOS	19
1.1.1. Polímeros naturales	20
1.1.2. Polímeros sintéticos	20
1.2. CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS	20
1.2.1. Termoestables	20
1.2.2. Termoplásticos	21
1.2.3. Elastómero	21
1.3. LA INDUSTRIA DE LOS PLÁSTICOS	21
1.4. EL POLICARBONATO	21
1.4.1. Historia	22
1.4.2. Propiedades del policarbonato	22
1.4.2.1. Propiedades físicas	23
1.4.2.2. Propiedades químicas	23
1.4.3. Usos y aplicaciones	23
1.5. ESTADO DEL ARTE	26
1.6. COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL POLICARBONATO	26
1.6.1. Síntesis	26
1.6.2. Primer método transesterificación de BPA	26
1.6.3. Segundo método por fosgenación de BPA	27
1.7. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PC Y DE CDs/DVDs	28
1.8. SOPORTES ÓPTICOS	29
1.8.1. Disco compacto, CD	30
1.8.2. Composición	30

1.8.3. Otros soportes	31
1.8.4. Disco de video digital, DVD	31
1.8.5. Tintas	32
1.8.6. Capa reflectiva	32
1.9. RECICLAJE	33
1.9.1. Reciclaje de plásticos	33
1.9.2. Reciclaje físico	34
1.9.3. Reciclaje químico	34
1.9.4. Incineración	35
1.9.5. Policarbonato post-consumo	36
1.9.6. Reciclaje de discos compactos	36
1.10. RESINA DE INTERCABIO IÓNICO	37
1.10.1. Situación actual de los afluentes	38
1.10.2. Legislación sobre vertimientos	38
2. PARTE EXPERIMENTAL	40
2.1. REACTIVOS Y EQUIPOS	40
2.1.1. Reactivos	40
2.1.2. Equipos	41
2.2. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS	41
2.2.1. Reducción del tamaño de los discos compactos	41
2.2.2. Pruebas preliminares de solubilidad	42
2.2.3. Análisis de plata	42
2.3. RECICLADO	42
2.3.1. Físico. Lijado manual	42
2.3.2. Químico. Evaluación de la concentración óptima de soda cáustica	42
2.4. EVALUACIÓN DE LIMPIEZA DE LOS DISCOS	43
2.4.1. Estandarización de la soda	43
2.4.2. Reactor	43

2.4.3. Evaluación del tiempo de remoción en el reactor	43
2.5. REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	44
2.5.1. Material triturado	44
2.5.2. Material pulverizado proceso de molienda	44
2.6. ENSAYO DE RESISTENCIA DEL PC Y CARACTERIZACIÓN DE CDs/DVDs	44
2.7. PREPARACIÓN DE LA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO	45
2.7.1. Activación de la resina	45
2.7.2. Diseño de experimentos	45
2.7.3. Evaluación de la resina de policarbonato	45
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.1. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE DISCOS ÓPTICOS	46
3.2. PRUEBAS PRELIMINARES DE SOLUBILIDAD PARA LOS DISCOS COMPACTOS Y VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS ANTES REPORTADOS	46
3.3. PRESENCIA POSITIVA DE PLATA	48
3.4. RECICLADO	49
3.4.1. Físico	49
3.4.2. Químico	50
3.5. PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR	50
3.5.1. Reactores empleados en el proceso	52
3.5.2. Descripción del reactor	53
3.5.3. Evaluación del tiempo de remoción en el reactor	53
3.5.4. Validación del método	55
3.6. ESTANDARIZACIÓN DE LA SODA	56
3.7. RECUPERACIÓN DE POLICARBONATO	56
3.8. REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	57
3.8.1. Material triturado	57
3.8.2. Material polvo	58
3.9. CARACTERIZACIÓN DEL PC/POST-CONSUMO PARA CDs/DVDs	58

3.10. RESISTENCIA DEL PC	62
3.11. EVALUACIÓN DEL POLICARBONATO POST-CONSUMO COMO INTERCAMBIADOR IÓNICO	63
3.11.1. Preparación de la resina de intercambio iónico	63
3.11.2. Recuperación de metales	63
3.11.3. Curvas de calibración para los diferentes metales	64
3.11.4. PC/Triturado en difusión por 24 días	64
3.11.5. Evaluación de dos tipos de materiales PC polvo y triturado para el intercambio con cobre a 1mg/L	65
3.11.6. Verificación del intercambio	66
3.11.7. Recuperación de metales	67
3.11.8. Funcionamiento de la resina de intercambio iónico de PC	68
CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Policarbonato. Unidad repetitiva del Poli(Carbonato de Bisfenol-A) (BPA-PC) Policarbonato de bisfenol A monómero.	22
Figura 2. Esquema de reacción para la preparación de policarbonato sulfonado (SPC).	25
Figura 3. Rutas de síntesis de Policarbonato. (a) Transesterificación de Bisfenol-A con difeniléster de ácido carbónico y (b) Fosgenación del Bisfenol-A.	28
Figura 4. Producción anual para los diferentes soportes ópticos del mercado.	29
Figura 5. Composición de los discos compactos.	30
Figura 6. Proceso de reducción del tamaño de los CDs/DVDs.	46
Figura 7. Presencia positiva de plata.	48
Figura 8. Proceso de limpieza método físico.	49
Figura 9. Proceso de limpieza de piezas de CDs.	50
Figura 10. Proceso de limpieza en el reactor.	51
Figura 11. Diferentes tipos de reactores de polipropileno.	52
Figura 12. Estudio de limpieza de los CDs completos a diferentes concentraciones.	53
Figura 13. Diferentes muestras de soportes ópticos.	55
Figura 14. Policarbonato triturado.	57
Figura 15. Policarbonato polvo.	58
Figura 16. Espectros IR PC/CDs.	59
Figura 17. Espectros IR PC/DVDs y PC/Sadtler.	60
Figura 18. Estructura del <i>benzotriazol</i> empleado como un aditivo anti-UVA.	62
Figura 19. Discos compactos prueba de resistencia.	62
Figura 20. Materiales usados para la activación de la resina de PC.	63
Figura 21. Curvas de calibración para cobre, níquel y cromo.	64
Figura 22. Intercambio de una solución de cobre a diferentes tiempos.	65
Figura 23. Representa el porcentaje de cobre recuperado.	65
Figura 24. Esquema de remoción de Cobre	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Mercado de los CD/DVD \pm R.	32
Tabla 2. Industrias generadoras de vertimientos en Colombia y enfermedades que pueden causar.	39
Tabla 3. Estándares ambientales de vertimientos para algunos metales según Legislación Colombiana artículos 20 y 74 decreto 1594 de 1984.	39
Tabla 4. Criterios de calidad admisibles expresadas en miligramos por litro, mg/L, según legislación Colombina, decreto 1594 de 1984, artículos: 37, 39, 40, 41 Capítulo IV.	39
Tabla 5. Reactivos empleados.	40
Tabla 6. Equipos utilizados.	41
Tabla 7. Comportamiento de los CDs frente diferentes disolventes/soluciones.	47
Tabla 8. Porcentaje de recuperación después de la extracción Soxhlet.	48
Tabla 9. Datos promedio para el tratamiento de CDs con soda al 5%.	54
Tabla 10. Resultado de la estandarización de la soda cáustica.	56
Tabla 11. Porcentaje de recuperación de PC.	56
Tabla 12. Asignación de bandas características para el policarbonato.	61
Tabla 13. Comportamiento del intercambio al omitir algunos pasos.	66
Tabla 14. Intercambio iónico con cobre, níquel y cromo.	67

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. ¿Cómo buscar en la página de la DIAN?	84
Anexo B. Grado de pureza del agua	85
Anexo C. Diseño del Reactor	86
Anexo D. Compatibilidad química del policarbonato	88
Anexo E. Estimación de recuperación del policarbonato post-consumo	89
Anexo F. Sistema de identificación de envases y empaques	90
Anexo G. Preparación de las soluciones para las curvas de calibración de Cobre, Níquel y Cromo	91

ABREVIATURAS

AA	Absorción atómica
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
BPA	Bisfenol A
BPA-PC	Bisfenol A policarbonato
CDs	Discos compactos
CD-clase A	CD marca comercial “software Microsoft”
CD-clase B	CD marca comercial “software Legis”
CD-RW	Disco compacto regrabable
DPC	Difenil carbonato
DVDs	Disco de video digital
DVD-DL	Disco de video digital doble capa
DVD-RW	Disco de video digital regrabable
FOB	Precio mercancía a bordo de la nave o aeronave
IEC	Capacidad de intercambio iónico
IR	Radiación infrarrojo/a
Mini-CD	Mini disco compacto
Mini-DVD	Mini disco de video digital
PC	Policarbonato
PP	Polipropileno
ppb	Partes por billón
RII	Resina de intercambio iónico
RSU	Residuos sólidos urbanos
SPC	Polímero sulfonado
σ	Número de onda

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL POLICARBONATO POST-CONSUMO COMO INTERCAMBIADOR IÓNICO, OBTENIDO A PARTIR DE DISCOS COMPACTOS*

AUTOR: QUINTANILLA, Wilfredo**

PALABRAS CLAVES: Policarbonato, disco compacto, soda cáustica, reciclaje químico y físico, medio ambiente, intercambiador iónico.

DESCRIPCIÓN: Este trabajo mostró un proceso de reciclaje fisicoquímico de soportes ópticos CDs y DVDs mediante la utilización de soda cáustica al 5 por ciento como solución limpiadora, obteniendo discos completos de policarbonato post-consumo totalmente limpios, translúcidos y sin daños. Este material reciclado puede ser empleado en el moldeo de nuevos objetos, como fuente energética o como resina de intercambio catiónico. Con este proceso se mitigan daños al medio ambiente y se desarrollan nuevas tecnologías para generar empleo.

El proceso se validó para 301 soportes ópticos limpios en un reactor de polipropileno con capacidad de 1L de solución y 12 discos. Adicionalmente se encontraron dos tipos de discos compactos con diferentes tiempos de limpieza: clase A en 4 días y el B en 150 días máximo. Por otra parte, el porcentaje de recuperación de PC fue de 98,37 por ciento para el CD-RW; también se realizó el reciclaje mecánico de CD/DVD con valor de recuperación de 98,48 por ciento. Se realizó la reducción del tamaño de partícula del PC logrando obtenerlo de forma granular. Se tomaron espectros infrarrojos a cada muestra identificando en todas ellas el policarbonato y un anti-UVA *benzotriazol*.

La resina de policarbonato en polvo presentó mejor respuesta de intercambio de metales que el triturado. El PC granular modificado superficialmente se colocó de forma independiente por 30 minutos con soluciones de cromo, cobre y níquel, obteniéndose una selectividad creciente de $Cr < Cu < Ni$. La temperatura, presión y agitación fue constante en todo el proceso. La limpieza de aguas contaminadas generadas por la industria brinda un valor agregado al tratamiento de recuperación del policarbonato proveniente de los soportes ópticos.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ciencias. Escuela de Química. José Carlos Gutiérrez

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF POLYCARBONATE POST-CONSUMER AS ION EXCHANGE, OBTAINED FROM COMPACT DISCS*

AUTHOR: QUINTANILLA, Wilfredo**

KEY WORDS: Polycarbonate, compact disc, caustic soda, chemical and physical recycling, environment, ion exchanger.

DESCRIPTION: This study showed an optical CDs and DVDs physicochemical recycling process using caustic soda (5 percent) as a cleaning solution, obtaining totally clean post-consumer, translucent and undamaged polycarbonate discs. This recycled material can be used in the molding of new objects, as an energy source or as a cation exchange resin. This process mitigates environmental damage and develop new technologies to generate employment.

The process was validated for 301 clean optical supports in a polypropylene reactor with 1L solution capacity and 12 discs. Additionally two types of compact discs were found with different cleaning times: class A in four days and B in 150 days maximum. Moreover, the percentage of recovery of PC was 98.37 percent for the CD-RW; also was performed mechanical recycling of CD/DVD with a value of 98.48 percent. Particle size reduction was performed on PC and was managed to get it granular. Infrared spectra were taken for each sample identifying in all polycarbonate and an anti-UVA *benzotriazole*.

Polycarbonate resin powder showed a better response for the exchange of metal in comparison with grinding PC. Granular PC superficially modified was placed independently for 30 minutes with solutions of chromium, copper and nickel, obtaining an increased selectivity $Cr < Cu < Ni$. Temperature, pressure and stirring rate were constant throughout the process. Cleaning of contaminated waters generated by industry adds a value to the processing of polycarbonate recovery from compact discs.

*Work of Grade

**Faculty of Sciences. School of Chemical. José Carlos Gutiérrez

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas tecnologías junto con la creciente demanda disminuye el ciclo de vida útil de los plásticos, incrementando los residuos en los vertederos y haciendo más previsible la escasez de materias primas para la producción de nuevos productos. Estos materiales poseen baja biodegradabilidad constituyendo un problema medioambiental; por tanto, el reciclaje nace como una opción “verde” reduciendo las emisiones y creando alternativas de empleo.^{1,2}

Hace 15 años no se pensaba en la gran aceptación mundial de equipos electrónicos que utilizaran soportes de almacenamiento óptico CDs y DVDs. En la actualidad se manejan cifras de aproximadamente 1 billón de unidades en los formatos mencionados.³

Con un mercado con tendencia alcista en ventas de soportes ópticos, se manifiesta un grave problema a nivel mundial de residuos generados por el uso de estos productos. Más de 2.000 toneladas de policarbonato, representadas en alrededor de 1.400 millones de discos compactos se preparan para el reciclaje cada año⁴ pero otra gran cantidad se desechan y terminan en los vertederos.² Se estima que para este año habrá un decrecimiento de ventas en los CDs pero esto no se traduce en una baja en la producción de PC porque se prevé un incremento considerable en ventas en los nuevos formatos tales como los DVDs y los Blu - Ray.³

Según cifras de la dirección de impuestos nacionales (DIAN) los soportes ópticos comercializados en Colombia para el año 2008 ascendieron a 18'074.979 (dieciocho millones setenta y cuatro mil novecientos setenta y nueve) unidades legalmente importadas.⁵

En el presente trabajo se estudió el reciclaje de CDs y DVDs por la acción de una solución sódica logrando obtener un policarbonato post-consumo; este material se modificó superficialmente y se utilizó como resina de intercambiador catiónico.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. LOS MATERIALES PLÁSTICOS

Los *plásticos*⁶ son materiales que se pueden moldear para darles diversas formas, por lo regular mediante la aplicación de presión y calor.⁷ Debido a su desempeño y progreso, cada día en diferentes campos se usan más plásticos de características tan variadas, contribuyendo de forma significativa al mejoramiento de la calidad de vida.⁸ Los plásticos se usan extensivamente para empaquetamiento en la comida, bebida, sangre y medicina.⁹

Los polímeros constituyen la materia prima de los plásticos, pero no son plásticos; sólo cuando se mezcla con aditivos si lo son. Los *aditivos*¹⁰ no afectan a la constitución, ni configuración de los polímeros, pero pueden influenciar la conformación, la superestructura o las características superficiales.^{11,12} La mezcla de un polímero con aditivos puede mejorar las propiedades mecánicas, eléctricas, químicas y su apariencia.¹¹

En 1827 Jons Jakob Berzelius acuñó el término *polímero* (del griego *polys*, “muchos”, y *meros*, “partes”) para denotar especies químicas de una elevada masa molecular; estas macromoléculas se forman por la unión (polimerización) de pequeñas moléculas denominadas monómeros.¹¹ Existen dos grandes grupos: los naturales (producidos por la naturaleza) y los sintéticos (derivados por transformación del carbón o el petróleo).^{7,8,11,13-16}

1.1.1. Polímeros naturales

Son los que se producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos.¹⁷ Estos son esenciales para nuestra existencia ya que son los constituyentes principales de nuestra comida (almidón, proteínas), de nuestras

ropas (seda, algodón, poliésteres, nylons), de nuestras casas (madera, pinturas) y de nuestros cuerpos (proteínas y ácidos nucleicos).^{11,14,16}

1.1.2. Polímeros sintéticos

Son compuestos orgánicos producidos mediante transformación química¹⁸ a partir de derivados del carbón y petróleo. Incluye la mayoría de los polímeros manufacturados por la industria y de mayor venta comercial. Muchos, aunque no todos, se encuentran en forma de polvo seco y otros son líquidos.^{7,8,14,16,17}

Teniendo en cuenta su comportamiento físico y proceso, los materiales plásticos se dividen en termoplásticos, termoestables y elastómeros.^{7,8,11,14,16,19}

1.2. CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS

1.2.1. Termoestables

Son sustancias que durante su manufactura cambian de forma irreversiblemente transformando de un estado plástico a un estado duro, entrecruzado¹⁴ y de tres dimensiones que no puede volverse a moldear⁷ ni mediante aplicación de temperatura, ni mediante tensión.¹¹ A temperatura ambiente estas moléculas son duras, rígidas y al mismo tiempo frágiles. No son fundibles, ni solubles, por causa de su fuerte reticulación.^{8,12,16}

1.2.2. Termoplásticos

Son materiales macromoleculares que constan de cadenas lineales y ramificadas,¹⁵ que mantienen su cohesión mediante fuerzas intermoleculares. Estos se caracterizan porque pueden fundirse y el polímero se puede reciclar enfriándose para darle algún otro uso mediante

la técnica de moldeo,²⁰ proceso que se puede repetir varias veces.¹¹ En la práctica, el polímero sufre cierto grado de degradación térmica a medida que se reutiliza, en comparación con la calidad de un material virgen.^{7,8,12,16,21-23}

Son termoplásticos el polietileno, policarbonato, polipropileno, poliestireno, poliamidas y los acrílicos.^{12,14,16,20,21,23-39}

1.2.3. Elastómero

Esta clase de plásticos presenta moléculas distribuidas sin orden, con pocos entrecruzamientos, también conocidos como cauchos debido a su comportamiento que exhibe a temperatura ambiente.⁸ Si se someten a estiramiento o flexión, recupera su forma original una vez que se retira la fuerza distorsionadora, siempre que no se haya deformado más allá de cierto límite elástico.^{7,11-13,19}

1.3. LA INDUSTRIA DE LOS PLÁSTICOS

La industria de los plásticos crece y se desarrolla diariamente hasta el punto de impactar en la economía y sociedad del mundo. Actualmente, la producción mundial de plásticos alcanza aproximadamente 100 millones de toneladas anuales. En Colombia, la actividad industrial del plástico es dinámica: sólo en el año 2002 el sector de los plásticos exportó 227 millones de dólares FOB. En el mismo año, las importaciones de productos manufacturados de plástico alcanzaron los 239 millones de dólares, equivalentes al 2,2% de las importaciones industriales.⁸

1.4. EL POLICARBONATO

1.4.1. Historia

Exactamente el 16 de octubre de 2010 se cumplirán 57 años desde que la empresa Bayer AG de

Leverkusen patentara el policarbonato (PC) por el químico Hermann Schnell;⁴⁰ General Electric (GE) casi al mismo tiempo un año después descubre el policarbonato en Norteamérica, por Thomas A. Edison y Daniel Fox.^{35,40-43}

En los últimos años la gama de los policarbonatos comerciales se ha incrementado considerablemente,⁴⁴ entre las marcas comerciales están: GE Lexan,⁴⁵⁻⁴⁹ Bayer Makrolon,^{27,34-36,50-56} Zeonor (Zeon, Japón),⁵⁷ Dow Chemical,⁵⁸ Merlon (Mobay, Pittsburgh), Novarex (Mitsubishi), Touglon (PetroChemical), Panlite (Teijin, Tokio) y Jupilon (Mitsubishi, Tokio).^{37,40,50}

1.4.2. Propiedades del policarbonato

1.4.2.1. Propiedades físicas

El Policarbonato un material de alto valor;^{10,59} es un polvo blanco de masa molecular alta,^{40,60-62} insípido e indoro⁵⁰ con propiedades físicas excelentes, no se astilla, es translúcido y transparente,^{6,21,27,34,37,63} posee dureza, estabilidad térmica y de oxidación, baja absorción de agua,^{6,35,37,50,53,54,63} y resistente⁶⁴ a fracturas, deformación, agua hirviendo, envejecimiento, incendios^{27,53,64,65} y alta tenacidad al impacto.^{14,21,30,32,33,35,42,46,54,56,66-69}

Las resinas de PC sufren descoloramiento,^{6,26,27,35,70,71} poseen buenas propiedades eléctricas,^{23,29,35} y son estables a 300°C.⁷² El PC se encuentra en forma de planchas, láminas⁶ o peletizado.^{4,27,55} Sin embargo la exposición a la luz solar, humedad y oxígeno del aire degradan el material,^{68,73} tomando un aspecto amarillo.^{11,21,32,50,56}

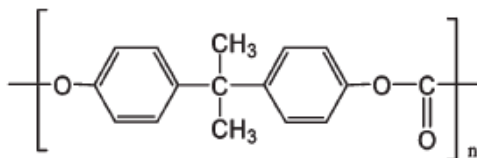


Figura 1. Policarbonato.^{6,12,23,29,34-37,40,50,56,59,67,74-77} Unidad repetitiva del Poli(Carbonato de Bisfenol-A) (BPA-PC)^{2,8,34,38,46,48,49,56,57,59,62,67,70,74,78-84} Policarbonato de bisfenol A monómero^{21,34,40,75,85,86}

1.4.2.2. Propiedades químicas

El Policarbonato es soluble en cloroformo,^{40,87} 1,2-dicloroetano, monoclorobenzol, ortodichlorobenzol, anisol,⁶⁶ cloruro de metileno,⁴⁵ cloruro de etileno,⁵⁰ tetracloroetano y cloruro de metileno; no disuelven al polímero los alcoholes y ácidos orgánicos.²¹ Algunos como el benceno,¹¹ fenol,²⁴ tetracloruro de carbono, los benzoles, los ésteres y cetonas hinchan el PC.⁵⁰ El PC es estable frente a los ácidos minerales y muchos ácidos orgánicos, incluso ácido sulfúrico al 50%. Los álcalis, las soluciones amoniacales y aminas destruyen y degradan el PC.^{39,50,56}

1.4.3. Usos y aplicaciones

Entre sus aplicaciones el policarbonato es un material muy versátil y de gran importancia en nuestras vidas.⁴² Es usado como aislante eléctrico,^{6,40} en la aeronáutica civil como militar,^{41-43,50,53,70} como panel solar,⁶⁴ cubiertas para proyectores, cascos para bomberos, motociclistas,^{8,21,34} mineros y astronautas de la NASA, en la industria automotriz,^{2,9,10,21,26,40-42,88,89} botellas de plástico^{10,43} y biberones.^{30,35,39,90} Con PC también se fabrican CDs/DVDs,^{6,10,21,23,35,40,41,43,55,56,58,73,89,91,92} membranas de filtro^{80,93-95} y cajas petri.⁵⁰

Las marcas comerciales Makrolon y Lexan^{41,43} se emplean también en el deporte profesional,^{6,23,35,41} gafas para el sol y deportivas, lentes ópticos de cámaras digitales,^{10,41,54,58} seguridad,⁴² diseño y arquitectura.^{14,64} En los sectores de la salud (inocuidad fisiológica),^{50,91} alimentos, escolares,⁵⁰ construcción,⁵⁵ arte,⁹ eléctrico y electrónica.^{8,9,15,23,35,37,38,40,42,53,89} Se pueden hacer cubiertas de estadios, piscinas, techos de invernadero, estaciones⁶⁴ de ferrocarril,²⁷ ventanas antibalas, se emplean en el alumbrado de calles y recintos.^{6,37,40,41,50,53,88}

1.5. ESTADO DEL ARTE

Un trabajo anterior mostró una alternativa de reciclaje para CDs desechados a los que se les recuperó el policarbonato y a su vez se empleó como materia prima para la fabricación de

nuevos productos moldeados y obtención de resoles.²⁴ Otro método usado para reciclar productos que contengan policarbonato, se basa en el tratamiento químico con NaOH acuoso seguido de una acidulación con HCl obteniendo así el monómero de partida del policarbonato.⁹⁶

Se han publicado varios procesos de despolimerización de policarbonato: en 1989 Fox and Peters⁴⁵ patentaron un proceso que usa cloruro de metileno con amoníaco como solvente combinándolo con un catalizador alcalino. En 1994 Shafer⁹⁷ patentó un proceso de despolimerización usando fenol como solvente. Ambos procesos usaron solventes muy tóxicos y presentaron complicación en la separación del producto.

Otros dos trabajos tratan de la despolimerización del policarbonato: uno de ellos, llevado a cabo por Hu⁷⁵ involucra la descomposición por metanolisis catalizada a temperatura baja (40-60°C) y presión atmosférica, con rendimientos de 7% de Bisfenol-A. El segundo trabajo plantea un proceso de despolimerización de Bisfenol-A a partir del policarbonato puro y de CDs/DVDs provenientes de la basura; se trabajó con condiciones isoterma de 90 a 180°C, presiones de 1,0 a 20,0 MPa y se usó una solución de metanol - NaOH.^{2,74}

A nivel industrial Bayer recicla CDs mediante un proceso químico para eliminar el recubrimiento, separa el policarbonato de los materiales sobrantes como aluminio, lacas y tintas de impresión, logrando un 99% de material reutilizable.⁴ La empresa Alemana de nombre CD-Collect se encarga de la recogida y reciclado de los discos compactos provenientes de rechazos de producción y calidad de los fabricantes.³ Otra empresa recicla CDs y DVDs recuperando el 90% del policarbonato, proceso que consiste en triturar el material, seguido se procede a destintar, remover las etiquetas, capa metálica, residuos de plata y aluminio del soporte plástico lavándolos y por último se funden produciendo un hilo, cortándolos en lentejas.^{58,98}

En 1998 Tagaya realizó la descomposición de policarbonato en bisfenol A entre 230 a 430°C en agua, alcanzando un rendimiento del 67%.⁸⁵ Entre tanto Militan, degradó Policarbonato (PC)

Sumitomo Dow,⁷⁹ Panlite de Teijin, DVDs (Fuji Film, Japón) y CDs (TDK, Japón) desechados, a 450°C obteniéndose bisfenol A y derivados aromáticos.²³ Otros cuantos trabajos reportan la degradación térmica del PC a altas temperaturas,⁸² presiones⁹⁹ y otras en aire atmosférico.^{10,20,31}

Muchos trabajos tratan de la degradación³⁸ del policarbonato⁹⁹ por fotooxidación¹⁰⁰ de sus placas a una longitud de onda de 280¹⁰¹ - 330 nm.¹⁰² La luz del sol (uv-vis), la humedad y el oxígeno producen fotodegradación del PC,⁴⁷ la exposición prolongada modifica la estructura química perdiendo propiedades mecánicas,²¹ produciendo un color amarillo en el material.^{32,48,73,103}

El uso de la superficie de policarbonato como biochips (BioCD)^{104,105} usan CD/DVD³³ en análisis de plasma,¹⁰⁶ ADN,^{33,107} biomedicina, diagnóstico clínico, biológicos (proteínas, ácidos nucleicos),^{63,108} y reacciones de fosforilación.¹⁰⁶ Witek inmovilizó DNA de Escherichia coli para purificación de sangre en un microchip.⁶⁹ Banik usó el biosensor para cuantificar el p-nitrofenol en un disco¹⁰⁹ y Baños analizó especies iónicas de Ca⁺² en líquidos como sangre, orina o agua.¹⁰⁷

Lee y otros reportaron el empleo de la resina de policarbonato como intercambiador iónico¹¹⁰ mediante la inserción de un grupo sulfónico por medio del ácido cloro sulfónico sobre la estructura del PC, con capacidad de intercambio de ion (IEC) del SPC.^{38,49,87,111-114}

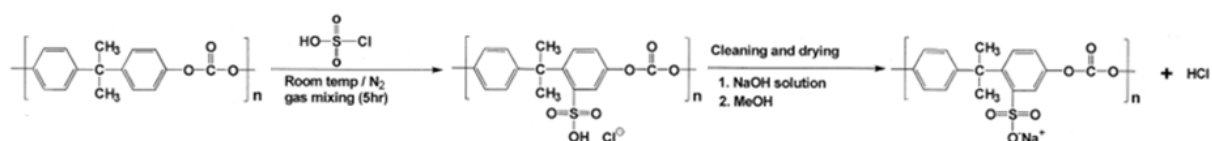


Figura 2. Esquema de reacción para la preparación de policarbonato sulfonado (SPC)^{49,87}

Se evaluó el efecto tóxico de los metales pesados en agua y en peces de la sabana del río Bogotá, encontrando que estas aguas están contaminadas por Cd, Pb, Cu, Fe, Zn, Mg, Mn y Cr, y sus concentraciones superan los límites permitidos.¹¹⁵ Otro estudio realizado en cuencas del río Bogotá, Magdalena, Honda y en la región de la Mojana, encontró niveles de contaminación por

Hg, Cr, Ni y Cu producidos por actividades industriales como la minería del oro, petroquímica y uso indiscriminado de precursores químicos de actividades ilícitas.¹¹⁶

Soares estudió los elementos metálicos que tienen los discos compactos, accesorios de automóviles y tarjetas de teléfonos, encontrando que los CDs poseen bajas concentraciones de As, Ba, Sb, Fe y Zn.⁹

1.6. COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL POLICARBONATO

1.6.1. Síntesis

El Policarbonato se obtiene mediante dos métodos: el primero es la transesterificación^{40,74} entre el Bisfenol A (BPA)^{34,76,90,117,118} y difenil carbonato (DPC)^{10,29,35,67} y el segundo es la fosgenación del Bisfenol A (BPA)^{10,29,30,35-37,40,45,53,61,67,91,117,119-122} mediante un proceso industrial altamente peligroso para el medio ambiente.¹²³ El PC no se obtiene 100% puro porque quedan impurezas creadas durante la polimerización¹²⁴ a pesar que existen métodos de purificación.⁶⁶ El PC puede usar varios agentes aditivos, como estabilizadores y catalizadores empleados durante la policondensación.¹⁰

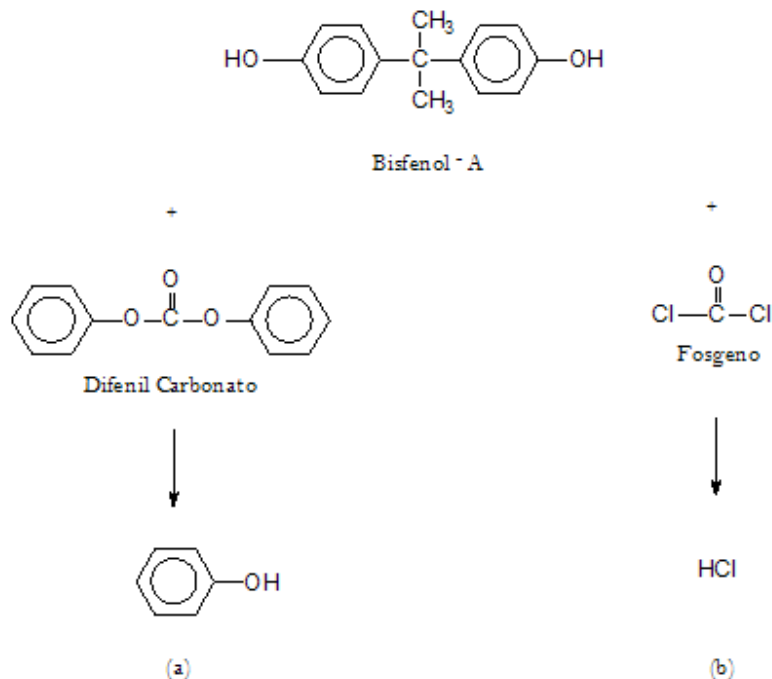
1.6.2. Primer método transesterificación de BPA

Generalmente se lleva a cabo entre 180-220°C y presiones entre 140-240 kPa, en ausencia de solvente, pudiendo ser catalizada o no, hasta ser removido un 80-90% del fenol producido. Luego la temperatura se aumenta gradualmente entre 290-300°C, mientras se reduce la presión aproximadamente a 6,9kPa (1 mm Hg). Debido a altas temperaturas de reacción el PC presenta amarillamiento.⁶⁷ Se han propuesto procesos amistosos¹²¹ para la producción de PC sin usar fosgeno desarrollando en las últimas décadas rutas alternativas como el uso de carbonato de difenil (DPC) con BPA.^{10,29,67}

1.6.3. Segundo método por fosgenación de BPA

Es la ruta más importante en la producción de PC, la síntesis se lleva a cabo en solución empleando mezclas de solventes orgánicos y la temperatura de polimerización es 25-35°C. La principal desventaja de este proceso radica en la necesidad de separar el polímero del medio de reacción; realizar la purificación involucra riesgos de toxicidad inherentes y problemas medioambientales serios;⁹¹ esto se debe a su componente principal, el fosgeno (COCl₂)^{35,62,125,126} y a cantidades copiosas de cloruro de metileno empleadas como solvente,^{29,61,121} reactivos no biodegradables.⁴⁵ Con este proceso se obtiene un PC sin problemas de amarillamiento.⁶⁷

Se ha considerado alternativas de interés industrial como la copolimerización de CO₂ como sustituto del fosgeno¹²⁶ y epóxidos, una producción de menor costo y una ruta más “verde” para estos termoplásticos.^{36,122,126}



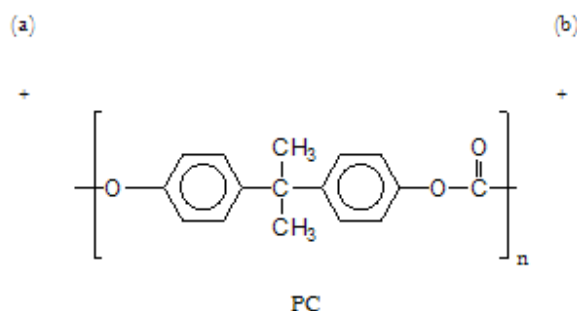


Figura 3. Rutas de síntesis de Policarbonato. (a) Transesterificación de Bisfenol-A³⁴ con difeniléster de ácido carbónico y (b) Fosgenación del Bisfenol-A.^{10,35,40,42,67}

1.7. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PC Y DE CDs/DVDs

Inicialmente se producían 40 toneladas mensuales en la planta de Uerdingen⁴⁰ y para finales del año 2002, la cifra se incrementó a 550 toneladas. La producción mundial de Bayer¹²⁷ es de 740.000 toneladas, cerca del 30% del PC consumido globalmente, producción distribuida en las plantas de Krefeld Uerdingen (Alemania), Antwerp (Bélgica), Baytown (EE.UU), Map TA Phut (Tailandia) y Caojing (China).³⁵ Sólo en Caojing se estima un rendimiento de 200.000 t/año a partir del 2007⁸⁹ y en Cartagena (España) GE Plastics produce PC Lexan con una capacidad de 130.000 t/año.⁹²

Según cifras referidas al año 2001 el consumo mundial de policarbonato en sistemas de almacenamiento óptico alcanzó el 22%.⁴⁰ Los principales sectores consumidores de PC son la automoción con 10%, electricidad y electrónica con 54% y la construcción con 20%.^{2,35,92} Actualmente, la capacidad de producción mundial de PC está por encima de 1,5 millones de t/año¹²¹ y se prevé la construcción de nuevas plantas de PC.^{6,29}

La producción mundial de CDs y DVDs creció de forma rápida; de aproximadamente 20 millones de CDs producidos en 1984³⁵ se pasó a 5.500 millones en 1995, lo que corresponde a 100.000 toneladas métricas de policarbonato. La producción total de soportes ópticos desde 1982 hasta

el año 2001 suma más de 110.000 millones de unidades.⁵² La fabricación de CDs y DVDs para el año 2004 fue 25 a 30 mil millones de discos fabricados mundialmente.

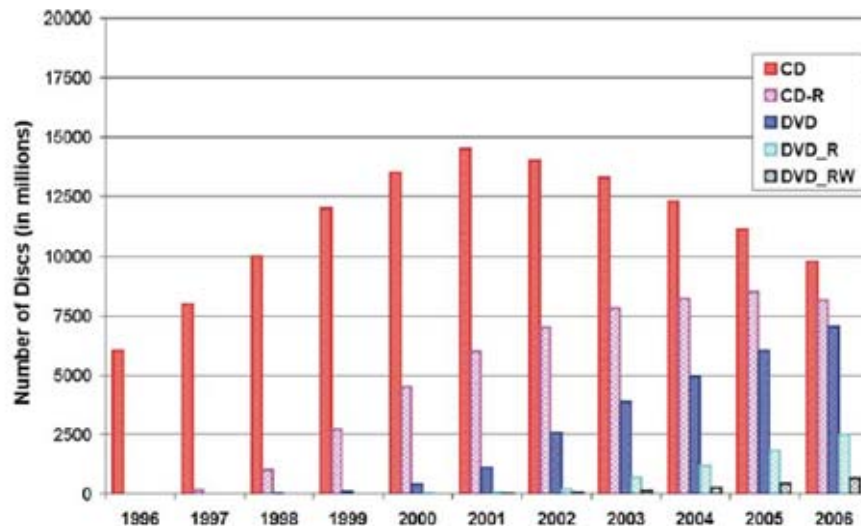


Figura 4. Producción anual para los diferentes soportes ópticos del mercado.^{52,127,128}

La producción mundial de CDs y DVDs para el año 2000 fueron 10.000 unidades, lo que representa 350.000 toneladas de policarbonato, de las que se destinaron un 75% para CDs de audio y CD-ROM, 21% CD-R regrabables y 4% para DVDs.^{3,98} La producción de CDs alcanza un máximo en el año 2001 y el formato DVD representa una nueva era en los soporte digitales y muestra un aumento a partir del mismo año.^{127,128}

1.8. SOPORTES ÓPTICOS

Los discos compactos, mejor conocidos como CDs, desplazaron a los discos de vinilo y cassettes.^{88,129} En los últimos años la industria ha venido creciendo y la demanda por nuevos productos con mayor almacenamiento, alta eficiencia junto con nuevas aplicaciones han preparado el terreno para la entrada de los nuevos formatos como el disco de video digital DVD/DVD-DL, mini- CD/DVD, CD/DVD \pm RW y blu-ray. Estos nuevos productos aseguran el mercado ofreciendo nuevas formas de regrabación y mayor capacidad.^{3,78}

1.8.1. Disco compacto, CD

Con Makrolon, PolyGram produjo el primer disco compacto¹³⁰ de audio en 1982³⁵ en Hannover;^{6,35,51,52} por su parte Lexan introduce esta tecnología a partir de 1984. Las dos compañías en 1996 lanzan al mercado el DVD (Digital Video Disc).^{6,10,35,41,42,51,52,127} En la actualidad uno de cada tres compactos emplea Makrolon.^{6,35} Desde que se fabricó el primer compacto hasta principios del año 2003 se han fabricado un equivalente a 5,4 millones de kilómetros, catorce veces la distancia de la tierra a la luna.^{35,88} 27 años después el policarbonato^{127,131} continúa siendo el único material empleado en la fabricación de (CDs y DVDs).^{2,3,12,23,24,34,57,60,129,132,133}

1.8.2. Composición

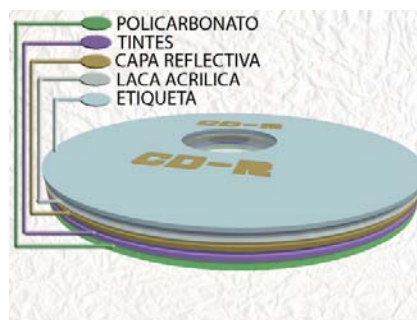


Figura 5. Composición de los discos compactos. (Archicad13, Artlantis Render3.0, PhotoshopCS3)

Se reproducen en masa CDs y DVDs usando policarbonato por moldeo; los discos de policarbonato son preparados con películas delgadas de aluminio, plata u oro^{134,135} y con una capa protectora de laca acrílica,^{63,129,133} etiqueta, tintas, adhesivos y serifrafía;^{3,63,98,104,128,133} materiales todos ellos no biodegradables.⁵⁸ Los plásticos de policarbonato para los discos y la laca para acabado están hechos de productos de petróleo. El aluminio para su revestimiento proviene de mineral bauxita extraído de la corteza terrestre mediante fundición (un procedimiento de alto consumo energético).⁸⁸

Los CDs son discos de 1.2 mm¹²⁹ de espesor, diámetro de 12 cm^{57,88} y una superficie de 94 cm^{2,58}; pesan aproximadamente 15g y están compuestos en un 99% del peso en policarbonato.^{3,14,58} Recientemente se ha identificado un nuevo tipo de hongo (geotrichum) que en condiciones climatológicas tropicales 30°C y 90% de humedad⁶⁰ destruye los CD. Este hongo se alimenta de carbono y nitrógeno de la capa plástica de policarbonato.¹³³

1.8.3. Otros soportes

Sanyo empezó a fabricar los primeros CDs biodegradables² con su plástico derivado del maíz. Se necesitan 85 granos para fabricar un "MildDisc". Los discos actuales se descomponen en agua y bióxido de carbono después de 50-1000 años.⁸⁸ Podemos identificar diversos tipos de soportes de almacenamiento óptico, dependiendo de su formato y medio de grabación principalmente: CDs estampados (CD-ROM solo lectura y CDs música), CD-Rs de grabación única. CD-RW regrabable, y los DVD (Disco de Video Digital).^{3,133} En el mercado Colombiano se pueden encontrar CDs, mini-CDs,¹²⁹ CD-RW y DVDs, mini-DVD, DVD-RW, HD DVD o DVD-DL y la nueva generación de soportes, los Blu-Ray.

Los **Blu Ray, RB** son hechos de PC Makrolon y su capacidad de almacenamiento es de 25 Gb y 50 Gb, esto es 40 veces más que un CD; las nuevas gamas de soportes llamados Surface Recording Discs, que tendrán una capacidad de 100 Gb.^{35,108,132} La capa doble y los discos láser azules están disponibles pero aun la producción no es en masa.¹²⁸

1.8.4. Disco de video digital, DVD

Los DVDs a diferencia de los CDs presentan dos discos de PC unidos,⁹⁸ mejorando su capacidad de información.⁵¹ Existen los Libros A, B, C, D y E donde se reportan construcción y formato de cada soporte óptico.^{33,60,98,133-135} El DVD presenta varios formatos: DVD-video, DVD-ROM, DVD-

RW (reescribibles); la capacidad de un DVD oscila entre 4,5 (siete veces la capacidad de un CD) y 16 GB.^{3,35}

Tabla 1. Mercado de los CD/DVD \pm R.^{33,60,98,133-136}

Marca comercial	País productor
TDK	Taiwán
Verbatim	Taiwán
Imation	India
Fujifilm	Taiwán
Sony	India
Digitex	Taiwán
Mirex	India

1.8.5. Tintas

Los tintes son la parte más frágil de los CD-R que al deteriorarse producen cambios que afectan la reflectividad. Los tintes más usados son la cianina, la cianina estabilizada con metal, diazo y ftalocianina.^{134,135} La cianina es el tinte más antiguo pero es el más inestable, en 1986 se estabilizó con ayuda de metales.¹²⁸ La luz ultravioleta modifica el tinte de cianina de los estabilizadores, es más sensible siendo una ventaja; sin embargo los fabricantes no dan los datos exactos de la composición química de estos tintes.¹³⁶ La ftalocianina es el tinte más estable; por último el tinte azo, patentado por Verbatim/Mitsubishi, tiene problemas de mayor costo y compatibilidad con algunos quemadores.^{11,58,133}

1.8.6. Capa reflectiva

El aluminio reflectivo contiene la información y se oxida lentamente.^{128,135} La capa reflectiva de metal más empleada tanto para CDs y DVDs es el oro;³ aunque con una excelente estabilidad por ser muy delgada y se oxida menos,^{134,135} es muy susceptible a los daños de abrasión. Actualmente esta capa se sustituye por plata por ser más económica.²³ Los CD-RW tienen oro y

telurio (mezclado con germanio o antimonio)^{33,60,98,134,135} y los DVDs utilizan dos capas (una de oro y otra de plata).¹³³

1.9. RECICLAJE

El reciclaje es fundamental ya que reduce el daño ambiental, disminuye los desechos en los vertederos, recupera^{137,138} energía y evita la contaminación.⁵⁸ Por tanto la comunidad científica trabaja para encontrar métodos alternativos de reciclaje para los plásticos.⁹⁹ Los polímeros son generalmente más difíciles de reciclar y los incentivos económicos para reciclar son menos favorables.¹⁹ Las continuas alzas en los precios de las materias vírgenes han favorecido la competitividad económica de las actividades asociadas al reciclaje (recuperación y comercialización).⁵⁴

El mayor destino de los residuos sólidos urbanos (RSU) plásticos en Europa Occidental son los vertederos con un 61%: se emplea en recuperación energética el 21%, y tan sólo un 18% en reciclaje químico y mecánico.³ La región de Europa Occidental y países industrializados como Brasil, facturan unos 789 millones de dólares por actividades de reciclaje de plásticos (basura plástica industrial, urbana y rural), creando alrededor de 17 mil empleos directos.⁵⁴ En Sao Pablo se producen aproximadamente 12 mil toneladas por día de basura sólida, de ellas 700 toneladas son plásticos.^{65,119,138}

1.9.1. Reciclaje de plásticos

El mercado de los polímeros es bastante dinámico, competitivo y en continua transformación para adaptarse a las nuevas exigencias del consumidor final. El consumo masivo de plásticos acumula grandes cantidades de materiales y genera problemas medioambientales serios.^{23,79,138}

El reciclaje tiene como objeto dar un valor agregado al residuo plástico transformándolo en

materia prima básica, siendo una alternativa real para el desarrollo de nuevas tecnologías.^{3,24} Los materiales para reciclar se encuentran en mezclas dificultando el proceso de reciclaje.^{138,139}

La transformación de los plásticos es una industria sostenible que está adquiriendo gran importancia por la previsible escasez de materias primas, sumado al rechazo social cada vez mayor al vertido. Los plásticos, una vez concluida su vida útil se convierten en residuos,¹³⁸ por tanto crece el interés de recuperar los desechos post-industriales y post-consumo^{3,54,67,88} debido a que ellos se degradan muy despacio.⁶⁵ El reciclaje de plásticos puede llevarse a cabo mediante procesos mecánicos, químicos, térmicos y enzimáticos.^{8,72}

1.9.2. Reciclaje físico

El reciclado mecánico o físico^{2,19,65,74,84,119,137} consiste en transformar el material post-consumo termoplástico⁵³ en uno idéntico o inferior al virgen en función de la calidad por moldeo.^{50,72} No obstante, el reciclado mecánico posee una limitación importante como es la dificultad de separación previa.^{8,138} Actualmente los plásticos se reciclan por procesos físicos, donde el material es sometido a recolección, lavado, molienda (reducción del tamaño del material)³⁴ fundición y finalmente moldeo para su nuevo uso (reelaboración).⁷² A medida que se repite el proceso, el material pierde calidad.^{8,24,138}

1.9.3. Reciclaje químico

El reciclaje químico convierte los residuos generados por fábricas en combustible o materia química básica.^{72,79} La mitad de los plásticos desechados se generan en casas (RSU). Una desventaja que a veces se presenta en el proceso es su elevado costo.²⁴ El proceso de despolimerización¹⁴¹ de desechos mediante procesos físico-químicos convierte el residuo polimérico en los monómeros de partida^{2,137,140,142,143} con algún valor para la industria

petroquímica, que se pueden utilizar nuevamente en la fabricación de polímero virgen cerrándose el ciclo completo.^{8,138}

Pero es el reciclaje químico de polímeros el que ha ganado gran importancia en los años recientes,⁸⁵ donde se optimizan los procesos de separación y desarrollo de nuevas tecnologías alternas limpias.^{74,125,138} Sin embargo en estos procesos de reciclado se presenta dificultad por la necesidad de realizar tratamientos previos de descloración y desmetalización.^{119,137}

1.9.4. Incineración

Todo residuo plástico que no pueda ser aprovechado mediante el reciclaje mecánico o químico, puede ser utilizado como combustible alternativo debido al alto contenido energético.^{65,137,140,141} Los plásticos poseen un valor calorífico equivalente o mayor al carbón posibilitando su utilización en lugar de desecharlo.^{19,119} La incineración limpia en ambientes controlados de residuos plásticos se practica en Europa, EEUU y Japón.^{8,125} Sólo en Dinamarca o Suiza se alcanzaron tasas de recuperación energética del 67 y 73% respectivamente.¹³⁸

El reciclaje de estas basuras puede ser ventajoso porque ocupa menos espacio en los rellenos sanitarios, se recuperan metales,⁹ es rentable, ayuda a la protección ambiental y puede rehusarse el producto reciclado.^{10,125} El CDP (combustible derivado del plástico) en un futuro será bastante popular por plantas de recuperación de energía.¹¹⁷ Sin embargo, entre sus desventajas se cuenta la generación de gases contaminantes⁶⁵ altamente tóxicos (dioxinas, furanos, etc) cancerígenos a concentraciones muy bajas (ppb).^{9,138,140}

Los residuos plásticos son valiosos y no es adecuado disponer de ellos en un relleno sanitario. Para evitar acumulación de los RSU se propone incinerarlos para generar energía térmica en hornos urbanos e industriales (cemento y siderúrgica) empleando estos gases de humo para

recalentar, secar^{9,138,140} y para producir vapores de alta presión para la generación de electricidad.⁸

1.9.5. Policarbonato post-consumo

Existe en el mercado mundial una fuerte presión para reciclar polímeros, como el PC.^{34,98,144} La gran demanda de plásticos¹⁸ incluyendo el PC produce problemas medioambientales: estos productos se procesan quemándolos o enterrándolos en el subsuelo como basura.^{10,84} El policarbonato no es un residuo tóxico sino un desecho inerte.⁵⁸ Los polímeros son generalmente más difíciles de reciclar debido a su difícil separación pero siempre se busca reciclar hasta el final de su vida útil.¹⁹ Los productos hechos de polímeros reciclados son a menudo más baratos y de calidad moderada.⁷²

El material defectuoso producto del proceso industrial se funde reciclando los desechos de PC.⁶¹ El policarbonato recuperado^{10,74,84} se puede utilizar para la elaboración de farolas, bancos de parques y jardines estableciendo una química verde;^{142,145} se puede mezclar con resina ABS para la fabricación de carcasas de teléfonos móviles, teclados y aparatos de informática.^{3,98} Pero se prohíbe la elaboración de productos de sectores como farmacéutico, alimentos y juguetería.⁸

1.9.6. Reciclaje de discos compactos

La gran demanda de CDs y DVDs es un problema de interés mundial debido al impacto ambiental;⁷⁸ es inminente que toneladas de estos se incineren con las basuras⁷⁴ por año o se entierren en los vertederos perdiendo dinero y contaminando.^{10,18,19,119} En los EEUU se tiran a la basura 545 ton/año de CDs, terminando en vertederos e incineradoras.² El reciclaje de CDs y DVDs⁹⁸ permiten recuperar PC peletizado para reutilizarlo.^{34,58} GreenDisk, empresa Norteamericana, utiliza este material para construir partes de autos y farolas.⁸⁸ Por su parte China compra discos compactos reciclados con los que fabrica artículos de oficina y semáforos.⁵⁴

Bayer AG produce cerca del 30% del policarbonato consumido globalmente y cuenta desde 1994 con una planta de reciclaje para CDs en Dormagen a escala industrial, con una capacidad de más de 5.000 a 6.000⁴ toneladas anuales. Esto significa que 335 millones de CDs pueden ser reutilizados como materia prima para nuevos productos una vez se le haya retirado sus recubrimientos.⁶ La producción de discos plateados en la actualidad por Universal Music excede los 1.800 millones de unidades.⁵¹ Pero tan sólo se reciclan 292,5 toneladas por año equivalentes a 19,5 millones de CDs y DVDs.³⁴

1.10. RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO

Las resinas de intercambio iónico (RII) son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua,¹⁴⁶ de naturaleza polimérica, contiene grupos ionizados (aniones o cationes), en forma repetitiva a lo largo de la cadena que las forman. Estos grupos tienen su carga neutralizada por iones de signo contrario, que puede ser intercambiados de manera estequiométrica al ponerse en contacto con soluciones acuosas.¹⁴⁷

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ión móvil de una disolución se desea remover, por tanto se intercambia por otro ión de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil.¹⁴⁶ Las RII operan en columnas con niveles por donde pasa el lecho fluidizante produciendo el intercambio iónico. La capacidad de intercambio de ion (IEC)⁴⁹ de la resina comienza a decrecer “agotada o saturada” hasta el punto de remover a medias los metales; por tanto es importante regenerar la resina para poderla utilizar en un nuevo ciclo.¹⁴⁶

El intercambio iónico no sólo se aplica al tratamiento de agua residual industrial,⁴⁹ también a la recuperación de uranio, análisis químico,¹⁴⁷ recuperación especializada de metales de soluciones (níquel, cinc, cadmio y cromo)¹⁴⁸ y eliminación de acidez de efluentes minero-metalúrgicos.¹⁴⁶ Las RII se emplean en farmacéutica y problemas científicos sanitarios.¹⁴⁷ en la actualidad existen

más de 100 marcas comerciales de resinas sintéticas, aprobadas para el uso en agua potable aunque no todas pueden utilizarse en plantas de tratamiento de agua debido a que se producen con monómeros que causan serios daños a la salud y medio ambiente por su alta toxicidad.¹⁷

1.10.1. Situación actual de los afluentes

En Colombia y principalmente en Bucaramanga existen talleres de galvanoplastia, joyería, rines y autopartes que generan vertimientos diarios.¹⁴⁸ Estas actividades desechan componentes industriales como ácidos, álcalis, metales pesados y cianuros.¹⁴⁹ Estudios realizados en Bogotá revelan que se aprovecha muy poco de los metales y que el 90% de los iones (Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Al, Ni, CN⁻) son desechados; estos representan solo para Bogotá un valor de 2400m³/año y para el país 9216000 m³/año de residuos líquidos.¹⁴⁸

1.10.2. Legislación sobre vertimientos

Metales pesados como el Hg, Cd, As, Pb, Cr, Ni y Cu constituyen un riesgo al medio ambiente debido a que poseen gran estabilidad química ante proceso de biodegradación, siendo los seres vivos incapaces de metabolizarlos, generando bioacumulación y concentración en la cadena trófica. Al cromo en su forma trivalente no se le atribuyen efectos tóxicos, sólo nutricionales, mientras que la forma hexavalente se acumula en tejidos humanos, especialmente el riñón y pulmón, alterando funciones básicas y provocando efectos tóxicos como neumonía y disfunción renal.^{116,149}

Tabla 2. Industrias generadoras de vertimientos en Colombia y enfermedades que pueden causar.^{115,116,142,148-154}

Contaminante inorgánico	Fuente principal	Efectos en la salud
Cu ⁺²	Agricultura, piscinas, tratamiento textil y cueros	Cataratas, enfermedad hepática, cirrosis
Ni ⁺²	Actividad galvanotecnia, fundiciones, talleres de recubrimientos	Dermatitis, asma, cáncer pulmonar y toxicidad oral
Cr ⁺⁶	Cromado, en industrias: civiles, acero, automotores, textil, marítimas y navales. Fundiciones, galvanoplastia, curtido del cuero y anticorrosivo en radiadores	Envenenamiento agudo, destruye las células del organismo, cáncer pulmonar, hepatitis, náuseas, vómito y dermatitis

El decreto 1594 de 1984 rige las industrias Colombianas en cuanto al contenido de sustancias de interés sanitario en las aguas de vertimiento de sus procesos.¹⁴⁸ Sin embargo, se registran niveles dramáticos de contaminación en zonas cercanas a complejos industriales.

Tabla 3. Estándares ambientales de vertimientos para algunos metales según legislación Colombiana artículos 20 y 74 decreto 1594 de 1984.^{155,156}

Referencia	Valor [ppm]
Cobre, Cu ⁺²	3.0
Cromo, Cr ⁺⁶	0.5
Níquel, Ni ⁺²	2.0

Tabla 4. Criterios de calidad admisibles expresadas en miligramos por litro, mg/L,¹⁵⁵ según legislación Colombiana, decreto 1594 de 1984, artículos: 37, 39, 40, 41 (Capítulo IV).¹⁴⁹

Referencia	Valor destinación [mg/L]		
	Humano y doméstico	Agrícola	Pecuario
Cobre, Cu ⁺²	1.0	0.2	0.5
Cromo, Cr ⁺⁶	0.05	0.1	1.0
Níquel, Ni ⁺²	0.5	0.2	--

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. REACTIVOS Y EQUIPOS

2.1.1. Reactivos

Tabla 5. Reactivos empleados.

Reactivo	Fórmula	Especificaciones
Ácido acético glacial	CH ₃ COOH	Merck, 99%
Benceno	C ₆ H ₆	Carlo Erba, 99,8%
2 - propanol	CH ₃ CH(OH)CH ₃	Merck, >99%
Ácido clorhídrico fumante	HCl	Merck, 37%
Gasolina		Comercial
Tinner		Comercial
Hipoclorito de sodio	NaClO	Comercial
Varsol		Comercial
Jabón en polvo		Comercial
Xileno mezcla	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	Comercial
Ácido nítrico	HNO ₃	Aldrich, 65%
Soda cáustica	NaOH	Comercial
Amoniaco	NH ₃	Comercial
Alcohol metílico	CH ₃ OH	Merck, 99.8%
Bromuro de potasio	KBr	Carlo Erba, >99%
Sulfato de cobre (II) pentahidratado	CuSO ₄ .5H ₂ O	Comercial
Zinc metálico	Zn	Comercial
Dicromato (VI) de potasio	K ₂ Cr ₂ O ₇	Merck, 98%
Sulfato de níquel hexahidratado	NiSO ₄ .6H ₂ O	Carlo Erba, >99%

Aire/acetileno		AGA
Biftalato de potasio	$\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$	Carlo Erba, 99.5%
Fenolftaleína	$\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$	Carlo Erba, >97%

Los reactivos fueron utilizados sin ningún proceso de purificación tal como fueron recibidos.

2.1.2. Equipos

Tabla 6. Equipos utilizados.

Equipo	Aplicación
Espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer 372)	Cuantificación de Cu, Ni y Cr
Infrarrojo Bruker Tensor 27	Análisis de PC en CDs y DVDs
Purificador agua ultrapura (Elix – Millipore)	Intercambio iónico
Balanza BOECO Germany Max. 210g; d=0,1mg	Pesar los diferentes materiales
Manta de agitación (Lab. – Line Instrument, Inc)	Agitar en el proceso de intercambio iónico
Agitador de aspas (Heidolph)	Agitar la mezcla PC benceno - metanol
Motor tool (Black & Decker)	Reducción tamaño de CDs y DVDs
Estufa (Binder)	Secar muestras
Molino de aspas	Oster

2.2. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

2.2.1. Reducción del tamaño de los discos compactos

Para determinar el mejor método de reducción de tamaño de los CDs y DVDs fue necesario implementar dos técnicas: la primera usando un Motor tool con disco de carburo para realizar líneas guías y luego poder romperlos de forma manual; la segunda utilizó tijeras comerciales.

2.2.2. Pruebas preliminares de solubilidad

Se tomaron 7 piezas de discos compactos, se depositaron en frascos y se le adicionaron diferentes solventes para observar su comportamiento químico frente a ellos. Estos ensayos mostraron que la soda cáustica recupera el policarbonato de forma completa sin problemas de afectación del material.

2.2.3. Análisis de plata

Se tomó un cable sin protección quedando descubierto el alambre de cobre, se sumergió en el recipiente que contiene ácido nítrico concentrado junto con las 7 piezas de CDs.

2.3. RECICLADO

2.3.1. Físico. Lijado manual

Se usó una lija a base de agua número 400, por un periodo de 10 minutos se realizó el lijado manual en húmedo para que la pintura no se adhiera a la lija. Una vez finalizado este proceso se redujo el tamaño del disco, se depositó en un frasco y se agregó benceno¹ para poder moler el PC.

2.3.2. Químico. Evaluación de la concentración óptima de soda cáustica

Con base en el análisis preliminar de la acción de diferentes reactivos sobre los CDs se escogió la soda cáustica comercial como la solución limpiadora para este trabajo.

¹ Se puede sustituir el benceno por tolueno en el proceso

Se realizó un seguimiento de soda cáustica al 1, 3, 5, 10% como solución limpiadora a 7 piezas de CDs marca Microsoft (CD-clase A). El experimento se llevó a cabo a temperatura y presión ambiente de la ciudad de Bucaramanga, los frascos donde fueron depositados estuvieron cerrados mientras ocurría el proceso de limpieza, la agitación fue manual cada hora hasta salir la pintura luego se agitó cada 4 horas hasta limpieza total.

2.4 EVALUACIÓN DE LIMPIEZA DE LOS DISCOS

Teniendo como base los resultados de la evaluación de la concentración óptima de soda cáustica se define el 5% de soda como la concentración ideal de trabajo para realizar la limpieza en el reactor.

2.4.1. Estandarización de la soda

Mediante un proceso de titulación utilizando biftalato de potasio y fenolftaleína se realizó la estandarización de la soda comercial.

2.4.2. Reactor

Se utilizó un reactor por etapas de PP (Polipropileno) con capacidad de 1L y con un número máximo de 12 CDs y/o DVDs para ser limpiados.

2.4.3. Evaluación del tiempo de remoción en el reactor

Se preparó 1 Litro de soda de diferentes concentraciones (3, 5, 10, 15, 20 y 30%) usando el reactor de PP. La muestra fue de discos completos y CDs de diferentes marcas (heterogénea).

Este sistema se validó mediante la utilización de 17 reactores, 30 experimentos y la detección de aproximadamente 301 CDs/DVDs limpios.

2.5. REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

2.5.1. Material triturado

Una vez obtenidos los CDs limpios se procedió a disminuir su tamaño mediante cortes transversales con tijeras, seguido se llevaron a un molino de aspas reduciendo considerablemente su tamaño.

2.5.2. Material pulverizado proceso de molienda

Al material triturado se le adicionó benceno por 24 horas produciendo un hinchado del polímero; seguido se agregó metanol, se agitó por una hora con ayuda de un agitador de aspas con una velocidad de 2,5 rpm y se filtró, luego se dejó secar a 60°C por 7 horas el PC y se almacenó la mezcla azeotrópica benceno - metanol para su recuperación. Por último se dejó enfriar las muestras y se procedió a realizar molienda con ayuda de un mortero con mango.

2.6. ENSAYO DE RESISTENCIA DEL PC Y CARACTERIZACIÓN DE CDs/DVDs

Se adicionó agua a una temperatura de aproximadamente 98°C por 10 min y se probó su acción frente a tres CDs reciclables secos.

Con el fin evaluar el proceso de limpieza de los soportes ópticos a través de la utilización de una solución sódica, se tomaron las familias comerciales de los CDs/DVDs y se caracterizaron por radiación infrarroja IR, evaluando la calidad de policarbonato contenido en este producto. Se utilizó KBr mezclado con las muestras para formar una pastilla para tomar el espectro.

2.7. PREPARACIÓN DE LA RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO

2.7.1. Activación de la resina

Se pesaron aproximadamente 5 gramos de (PC/triturado o PC/polvo). El proceso de activación se divide en dos etapas: primero, el material polimérico se trata con soda cáustica al 10% y segundo, el sólido se pone en contacto con ácido clorhídrico 1N. En las dos etapas se agitó a 3rev/min por 3 horas y se lavó repetidas veces con agua ultra pura grado 2.¹⁵¹

2.7.2. Diseño de experimentos

Para determinar las mejores condiciones de activación de la resina de PC, se planteó inicialmente un diseño de experimentos que consistía en mantener constantes los siguientes parámetros: 5g de PC, NaOH al 10%, HCl 1N, temperatura, presión constantes y agitación a 3 rev/min. Se variaron 3 factores experimentales: tipo de material (PC Triturado o Polvo), tiempo de difusión en HCl y tiempo de permanencia de la resina activada con la solución de metal a intercambiar.

2.7.3. Evaluación de la resina de policarbonato²

Una vez activada la resina se colocó en contacto con metales en solución (50mL) como Ni [1,0 ppm], Cu [1,0 ppm] y Cr [1,4 ppm] por 30 min a 3 rev/min para realizar el proceso de limpieza del agua. Al finalizar las muestras se analizaron por Absorción Atómica.¹⁵⁵ Las reacciones fueron realizadas por duplicado.

² En la ciudad de Bucaramanga existen talleres de galvanoplastia que vierten sus desechos a los ríos contaminándolos, por tanto se realizó la remoción para los iones (Cu^{+2} , Ni^{+2} y Cr^{+6}).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

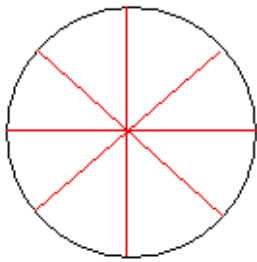
3.1. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE DISCOS ÓPTICOS



CDs clase A/B



Reducción tamaño/Motor tool



CD/DVD seccionado con tijeras



Reducción tamaño/Tijeras



Reducción tamaño/Tijeras



CD-clase B seccionado

Figura 6. Proceso de reducción del tamaño de los CDs/DVDs.

Para la reducción de tamaño de los discos compactos se obtuvo mejor respuesta al emplear las tijeras, por que al usar el motor tool se tenía el riesgo de producir gases tóxicos a la atmósfera por calentamiento del material así como por el gasto adicional energético.

3.2. PRUEBAS PRELIMINARES DE SOLUBILIDAD PARA LOS DISCOS COMPACTOS Y VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS ANTES REPORTADOS

Se midió 50mL de disolvente (ver Tabla 7) y se adicionaron a un frasco de vidrio junto con 7 piezas de CDs (aproximadamente 11g) a temperatura y presión ambiente por un periodo máximo de 2 días, con agitación manual cada 12 horas.

Tabla 7. Comportamiento de los CDs frente diferentes disolventes/soluciones.

Solvente	Tiempo	Observaciones
Acido acético	24 h	NO SOLUBLE. Solo se desprende la pintura pero no la capa metálica
Benceno	24 h	SOLUBLE. PC hinchado, capa metálica y pintura desprendidas
2 - propanol	24 h	NO SOLUBLE. No hay cambio
HCl	24 h	NO SOLUBLE. Solución amarilla. Tinta y serigrafía no solubles y desprendidas. PC translúcido
Gasolina	48 h	NO SOLUBLE. No hay cambio, es resistente ³⁷
Tinner	48 h	SOLUBILIDAD LIGERA. PC hinchado. Se desprendió la pintura y en algunas piezas la capa metálica
Hipoclorito de sodio	48 h	NO SOLUBLE. La capa de pintura y metálica se desprendieron
Varsol	48 h	NO SOLUBLE. No hay cambio
Solución jabón 35%	48 h	NO SOLUBLE. Presenta ligero desprendimiento de pintura
Xileno	48 h	SOLUBLE. PC hinchado. Se agitó desprendiéndose las capas metálicas y de recubrimientos
Ácido nítrico	48 h	NO SOLUBLE. El PC translúcido. Capa de pintura y metálica

		desaparecieron. Permanece las letras de serigrafía
Soda cáustica	24 h	PC translúcido. Solución coloreada por las tintas
Amoniaco	24 h	Degradación del policarbonato

Cuando se disuelve un polímero, en este caso PC, el primer paso es un hinchamiento lento llamado solvatación. Los polímeros lineales y ramificados se disuelven en una segunda etapa, pero los polímeros de red se mantienen en una situación de hinchamiento.³⁷ De los anteriores solventes y soluciones la que presentó mejor respuesta de limpieza para los CDs en un corto intervalo de tiempo es la soda cáustica, lográndose obtener un material translúcido.

Se realizaron los análisis de CDs dispersados en fenol y calentados a 150°C obteniendo un precipitado metálico, seguido se dejó enfriar y se obtuvo una pasta de color amarillo pálido (beige) a la que luego se pulverizó. Por último se realizó extracción Soxhlet por 36 horas usando etanol logrando un PC blanco según reportado por ESTEBAN y FRANCO.²⁴

Tabla 8. Porcentaje de recuperación después de la extracción Soxhlet.²⁴

Compuesto	Porcentaje de recuperación
PC	89%

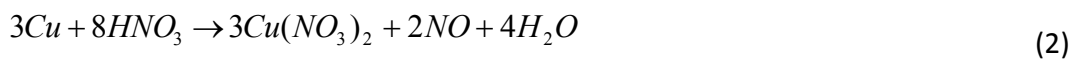
3.3. PRESENCIA POSITIVA DE PLATA



Prueba positiva/Ag

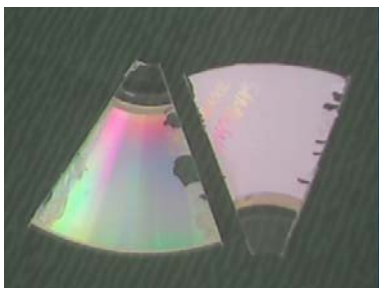
Figura 7. Presencia positiva de plata.

Una reacción espontánea se lleva a cabo cuando un alambre de cobre se pone en contacto con una solución que contiene Ag^+ . Conforme la reacción avanza, un color blanco sobre el alambre va apareciendo siendo prueba positiva para el depósito de plata; al mismo tiempo, el cobre se oxida por acción de ácido nítrico (ácido oxidante) y comienza a disolverse.^{7,157,158} Estas transformaciones se muestran así:

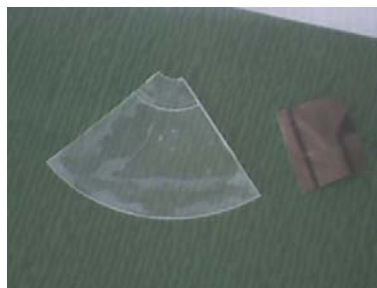


3.4. RECICLADO

3.4.1. Físico



DVD



DVD/Limpio



CD/Limpio

Figura 8. Proceso de limpieza método físico.

Mediante este proceso se recupera un excelente PC⁷⁴ translúcido libre de impurezas. El método se realizó para un CD y DVD (en el caso del DVD fue necesario separar en dos el disco).

3.4.2. Químico

El tiempo se reporta hasta cuando el último de las 7 piezas de CD-clase A quedó completamente limpio. El frasco contenedor durante todo el proceso permanece cerrado evitando el contacto de la soda con el aire.

A continuación se muestran las curvas obtenidas en el proceso. Se empleó *Microsoft Office Excel* versión 2007 para realizar las gráficas con regresión lineal y cálculos de porcentaje de recuperación de material.

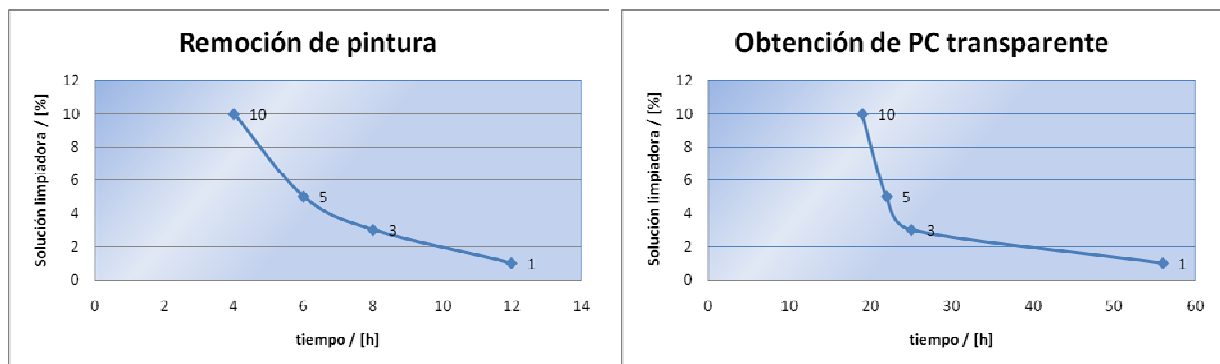


Figura 9. Proceso de limpieza de piezas de CDs.

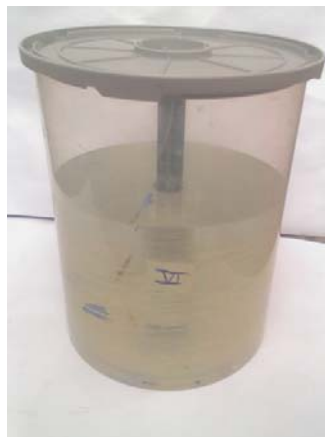
El tratamiento de la soda cáustica a baja concentración (apenas un 5%) se empleó por dos motivos: primero se necesitaban condiciones suaves para el reciclaje “*química verde*” utilizando en lo posible un menor gasto energético e implementando una técnica que mitigara efectos sobre el medio ambiente; segundo no dañar el PC^{3,98} logrando obtener un policarbonato transparente.

3.5. PUESTA EN MARCHA DEL REACTOR

Se observó que al disolver la soda cáustica en agua es una reacción exotérmica;¹⁵⁰ por tanto fue necesario utilizar cabina extractora para cada disolución y emplear un reactor resistente como polipropileno (PP)¹⁵⁹ para la limpieza de los discos ópticos.



(a) Remoción de pintura



(b) Reactor limpieza de CDs/DVDs



(c) Reactor menos eficiente

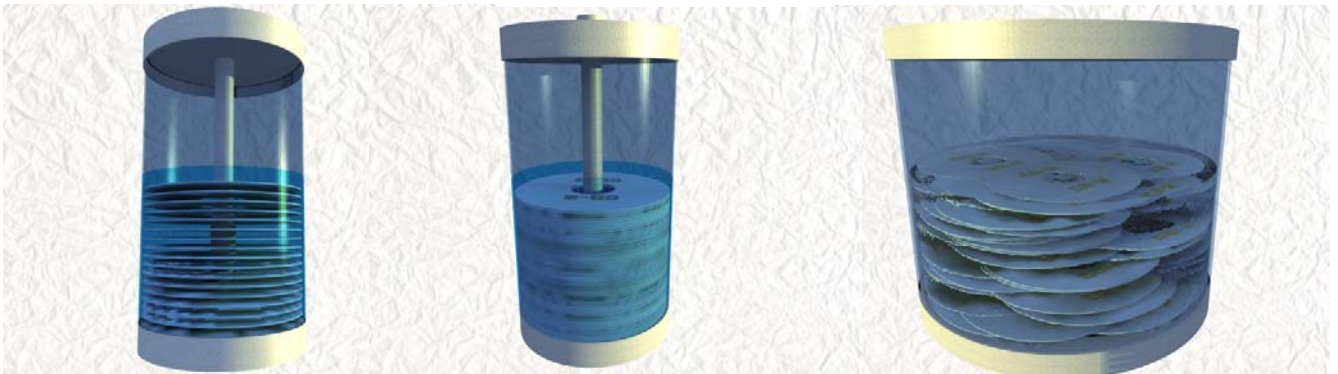
Figura 10. Proceso de limpieza en el reactor.

La utilización del reactor simula una actividad industrial a pequeña escala, se prefirió el *diseño (b)* por que permite que una vez limpiados los discos se puedan lavar fácilmente y puedan ser aireados para su secado. Todo lo contrario con el *reactor (c)*, allí se colocaban los discos todos juntos impidiendo la limpieza, su agitación es difícil, la remoción no es uniforme y tarda mucho mas la limpieza.

El *reactor (a)* fue utilizado para destintar y remover etiquetas; en los tres reactores la agitación fue manual. Una vez limpio el disco en el reactor quedan tintas, plastificantes, recubrimientos y distintos metales desprendidos de los soportes ópticos. Por tanto la separación de esta mezcla

se puede realizar mediante técnicas de separación electrostáticas, filtración, concentración de la muestra y posterior ataque con diferentes ácidos.

3.5.1. Reactores empleados en el proceso



Reactor Tipo A

Reactor Tipo B

Reactor Tipo C

Figura 11. Diferentes tipos de reactores de PP. (Archicad 13, Artlantis Render 3.0)

El reactor Tipo A fue el que mejor respuesta presentó ante la limpieza de CDs/DVDs debido al espacio entre discos producido por las arandelas, en este caso la remoción se produce con mayor eficiencia y en un menor tiempo. (Ver anexo C)

Reactor Tipo B, la eliminación de recubrimientos se dificulta por que los soportes quedan unidos y no hay posibilidad de entrada de la solución, así que la limpieza difícilmente se da, pese a que están organizados con la varilla central.

Para el reactor Tipo C los discos quedan de forma aleatoria y se unen. La limpieza se dificulta, presenta incomodidad para retirar el material limpio de forma manual porque al transcurrir el tiempo la solución cada vez se coloca turbia impidiendo visualizar cuál de ellos está limpio.

La agitación fue mecánica para cada reactor pero se puede automatizar todo el proceso. El presente trabajo fue de tipo explorativo permitiendo observar muchas variable nuevas en este proceso.

3.5.2. Descripción del reactor

El reactor Tipo A (ver Figura 11) de PP se empleó para la remoción de pintura y recubrimientos de los soportes ópticos con una capacidad máxima de 12 CDS/DVDs; todos los datos están reportados a partir de este sistema. Las dimensiones del reactor, arandela y disco se puede observar en el *anexo C*.

3.5.3. Evaluación del tiempo de remoción en el reactor

Se trataron CDs sin fraccionar tal y como llegaron de la recolección.

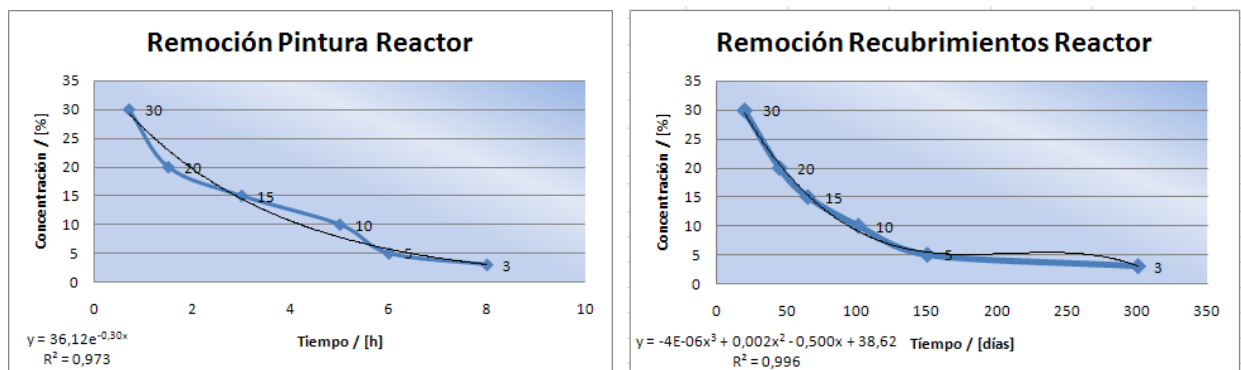


Figura 12. Estudio de limpieza de los CDs completos a diferentes concentraciones.³

Se agitó cada 30 min el reactor para eliminar la pintura y cada 8 horas para remover capas metálicas, hasta observar un material translúcido indicando limpieza total de los soportes. Los

³ Se pueden realizar análisis complementarios indicando cuando un CD está limpio (transparente), utilizando un detector que mida la opacidad por medio de un haz de luz en un rango superior a un 80 por ciento.

bordes internos y externos de un disco compacto son más difíciles de limpiar, dificultando el proceso y aumentando el tiempo de remoción.

Para explicar los resultados de las Figuras 9 y 12 se puede inferir que el tiempo de limpieza aumentó en comparación con el análisis preliminar, esto sucede porque se pasa de una muestra homogénea y seccionada de 7 piezas de CD-clase A a una heterogénea de CDs completos reciclables.

Se observó que a medida que se aumenta la concentración de la soda los discos se limpian más rápido, pero el material va perdiendo lucidez, calidad y se torna opaco. Esto se debe a que no se sacaron los CDs del *reactor tipo A* sino hasta que se limpiara el último de ellos.

Se evidenció que al dejar por 90 días en contacto un disco óptico con una solución al 30% de soda se produce degradación del material.

Tabla 9. Datos promedio para el tratamiento de CDs con soda al 5%.

Pintura			Recubrimientos		
t/menor	t/medio	t/mayor	t/menor	t/medio	t/mayor
1 h	4 h	6 h	4 días	40 días	150 días

En la Tabla 9, se muestra la no uniformidad de los materiales encontrados para el tiempo de pintura y recubrimientos, sin embargo se realizó un promedio del tiempo de lo obtenido durante todo el procedimiento experimental. En este caso se comparó el poder de limpieza de la soda cáustica al 5% frente a los diferentes tipos de CDs enteros. Para el CD-clase A su tiempo de limpieza es de 4 días y el clase B posee un tiempo máximo de remoción de 150 días.

La solución alcalina empleada para la remoción de los recubrimientos superficiales puede ser recuperada y empleada de nuevo en el proceso. Los residuos de pintura, plastificantes, tintas y

recubrimientos metálicos no fueron tratados, se dejarán como estudio para posteriores proyectos.

3.5.4. Validación del método

El método está validado con una remoción y limpieza de aproximadamente 301 soportes ópticos en los que se incluyen las familias de los CDs/DVDs encontrados en el mercado.



CD-RW



CD-RW Limpios



CD-Reciclables



CD-Reciclables Limpios

Figura 13. Diferentes muestras de soportes ópticos.

A fin de resolver adecuadamente los problemas ambientales derivados de los sistemas actuales de tratamiento y eliminación de los soportes de almacenamiento óptico, se procede con un método que minimice los riesgos y efectos perjudiciales para el medio ambiente.

3.6. ESTANDARIZACIÓN DE LA SODA

El proceso de estandarización de la soda cáustica fue realizado por duplicado.

Tabla 10. Resultado de la estandarización de la soda cáustica.

Muestra	Teórica	Experimental
Soda comercial	1N	0,92 N

3.7. RECUPERACIÓN DE POLICARBONATO

A partir de la Figura 12, se escogió la concentración de 5% de soda cáustica para limpiar los CDs enteros, en base a la calidad del policarbonato obtenido y a la relación ambiente/costo. Posteriormente se fue a buscar materia prima de reciclaje en el mercado popular de Bucaramanga conocido como “mercado de las pulgas”, allí se encontró de todo tipo de marcas de CDs y DVDs.

Una vez validado el método con un gran número de CDs limpiados (248 unidades) se procedió a extender el método de limpieza a los demás formatos (CDs y DVDs) que existen en la actualidad en Colombia.

Tabla 11. Porcentaje de recuperación de PC.

Material	%	Masa promedio / [g]	Número de soportes limpiados
Microsoft “CD- clase A”	98,17	15,1805	248
Legis “CD-clase B”	94,42	15,2350	
CDs reciclables	96,45	15,6303	
CD - RW	98,31	15,2977	10
Mini - CD	97,75	6,6954	12
DVD	90,74	16,3082	21

DVD - DL	92,22	16,3986	2
DVD - RW	90,03	16,4690	2
Mini - DVD	93,91	6,8342	2
CD/DVD Método físico	98,48	15,1795	4

Los porcentajes de recuperación son altos en comparación con los reportados en la literatura,^{24,58,98} solo son superado por Bayer AG que reporta un 99% de recuperación.⁴ El valor obtenido para el método físico resulta ser atractivo pero se descarta su utilización por su gasto energético adicional en la recuperación. En general todas las muestras presentan buena respuesta al método plateado.

3.8. REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

3.8.1. Material triturado



PC/Triturado

Figura 14. Policarbonato triturado.

Los CDs completos recuperados de la Figura 13 se llevan a un molino de aspas para triturarlos quedando como se muestra en la Figura 14.

3.8.2. Material polvo



PC/Benceno



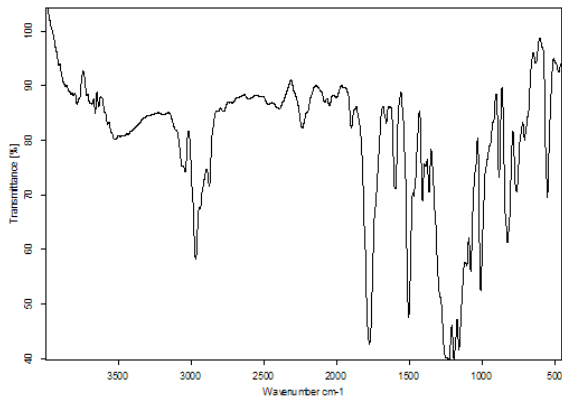
PC/Polvo

Figura 15. Policarbonato polvo.

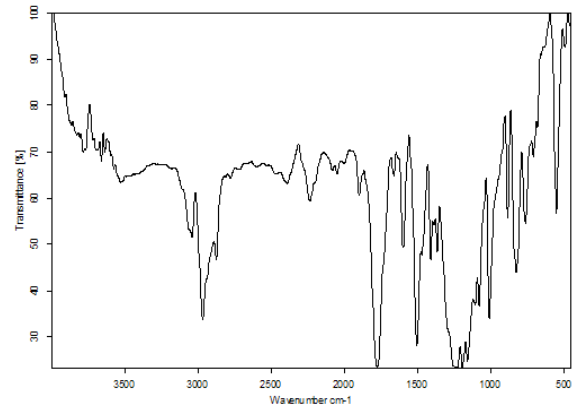
Al material triturado (ver Figura 14) se le adicionó benceno por 24 h obteniéndose pasta PC/benceno de color beige (ver Figura 15). Posteriormente se agregó metanol lográndose un policarbonato-polvo de color blanco homogéneo. El tratamiento reportado anteriormente fue realizado para los distintos formatos de CDs/DVDs. Con este proceso se retiran algunos plastificantes que hacen que los soportes ópticos sean difícilmente triturados.

3.9. CARACTERIZACIÓN DEL PC/POST-CONSUMO PARA CDs/DVDs

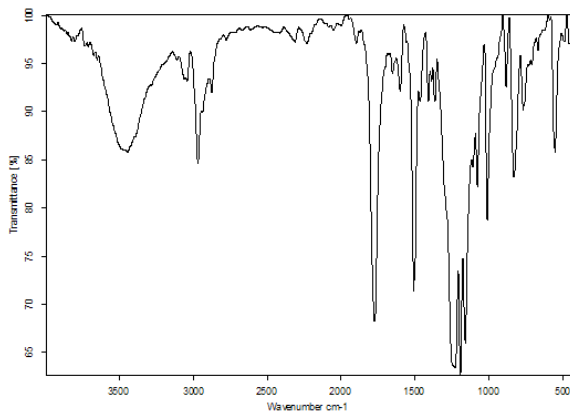
En las Figuras 16 y 17 se muestran los espectro IR obtenidos para las distintas familias comerciales de CDs y DVDs reportadas en la Tabla 11.



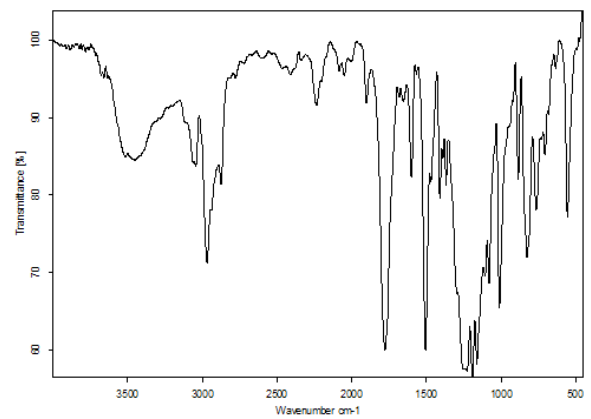
CD-clase B (LEGIS)



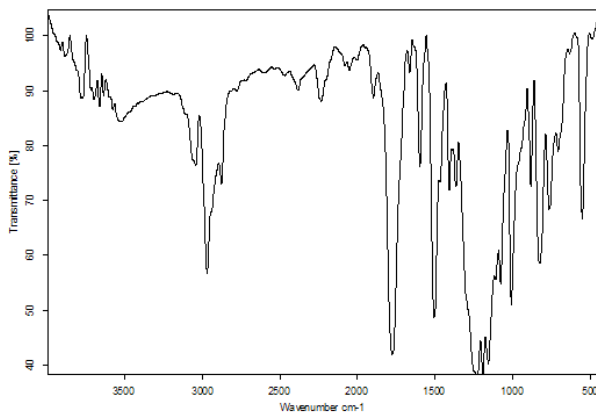
CD-clase A (Microsoft)



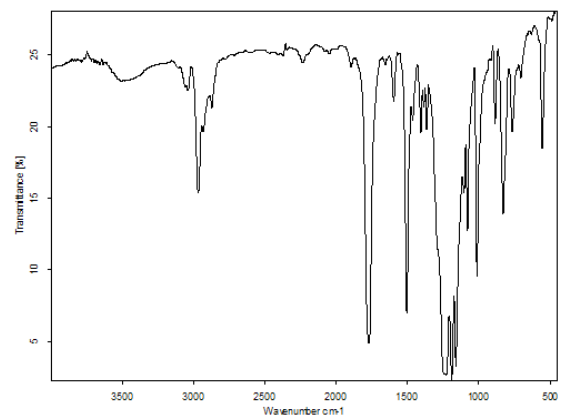
MINI-CD



CD-RW

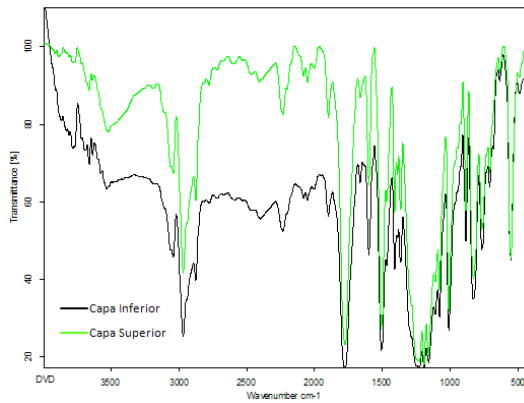


CD MUESTRA RECICLABLE

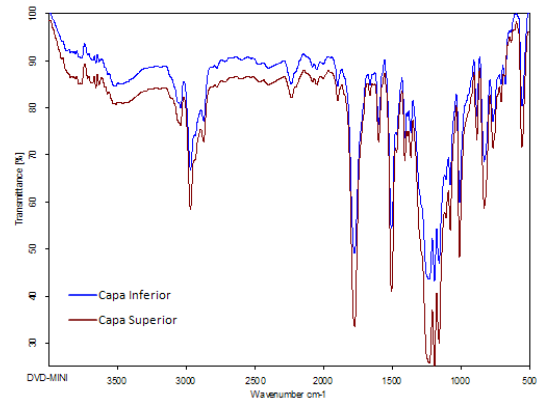


CD MÉTODO FÍSICO

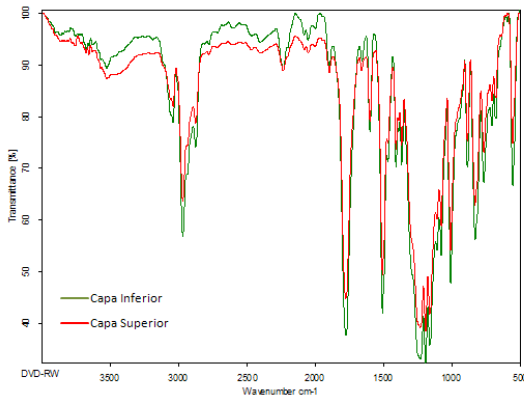
Figura 16. Espectros IR PC/CDs.



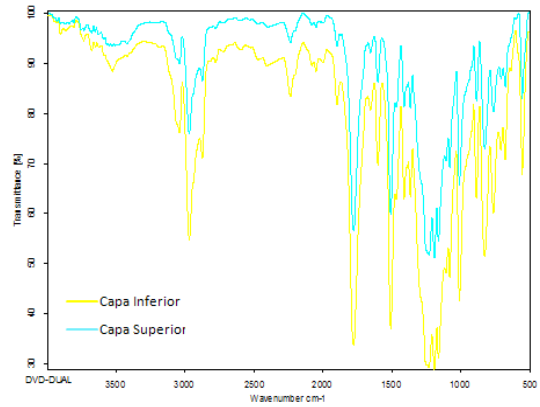
DVD



MINI-DVD



DVD-RW

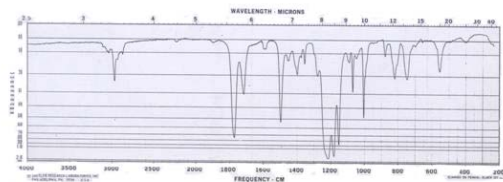


DVD-DL

NUCLON U-41
POLYCARBONATE THERMOPLASTIC
Sp. Gr. 1.20
Source: PPG Chemicals, Inc.
Film

SADTLER RESEARCH LABORATORIES, INC.
COMMERCIAL - INFRARED © 1967

MONOMERS & POLYMERS
GRATING SPECTRA



D 869K

Polycarbonato Sadtler

Figura 17. Espectros IR PC/DVDs y PC/Sadtler.

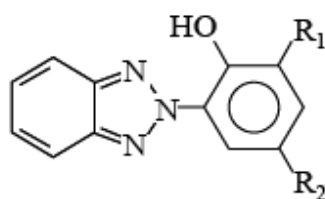
Al confrontar los diferentes espectros de las muestras de CDs y DVDs (ver Figuras 16 y 17) se observan bandas características similares entre ellas junto con la resina de PC virgen (Sadtler No. 869K).¹⁰

A continuación se explicarán detalladamente las bandas características IR del policarbonato.

Tabla 12. Asignación de bandas características para el policarbonato.^{24,46,48,49,67,75,87,114,158,160}

σ [cm^{-1}]	Asignación	Observaciones
2960, 2937, 2876	Grupo CH_3	<i>Doblete debido a los estiramientos asimétrico y simétrico C – H. Múltiples señales</i>
1765 - 1720	Grupo carbonilo del carbonato ($>\text{C}=\text{O}$)	<i>Estiramiento $\text{C}=\text{O}$ grupo éster. Desplazado por efectos conjugados y tensiones angulares</i>
1650 - 1450	Enlace $\text{C}=\text{C}$ del anillo aromático	<i>Banda de vibración $\text{C}=\text{C}$</i>
1640	Grupo CH_3	<i>Flexión C – H asimétrica</i>
1466	Grupo CH_3	<i>Flexión asimétrica. Señal típicamente de intensidad moderada</i>
1380 - 1370	Grupo CH_3	<i>Flexión C – H simétrica</i>
1388, 1365	Grupo $>\text{C}(\text{CH}_3)_2$	<i>Flexión simétrica. Doblete con una señal débil a mayor número de onda.</i>
1290 - 1180	$\text{C} - \text{O} - \text{C}$	<i>Estiramiento asimétrico</i>
1192, 1161	Enlace $\text{C} - \text{O}$	<i>Tensión en ésteres dos bandas</i>
1165	Enlace $\text{C} - \text{O}$ unido al carbonilo	<i>Vibración simétrica</i>
1221, 1198	Grupo $>\text{C}(\text{CH}_3)_2$	<i>Generalmente intensa y formando dobletes</i>
1040 - 1020	Grupo $\text{C} - \text{O} - \text{Ar}$	<i>Estiramiento simétrico</i>
900	Enlace $=\text{C} - \text{H}$	<i>Flexiones fuera del plano</i>
833 - 810	1,4 para disustituidos aromáticos	<i>Flexión C – H en aromáticos disustituidos</i>
645 - 575	$\text{O} - \text{C} - \text{O}$	

Adicionalmente, se observa claramente la aparición de una señal intensa en la región entre 2300-2150 cm^{-1} atribuidas a derivados de compuestos que presentan grupos carbono - nitrógeno del tipo $-X \equiv C$ y $-X = Y = Z$. Esta señal en conjunto con la observada a 3532 cm^{-1} asignada al estiramiento O-H de un grupo fenólico indicaría la existencia de un aditivo anti-UVA, del tipo benzotriazol⁶⁷ que protege al policarbonato ante la degradación.^{7,39} Una alternativa a la banda de 3532 cm^{-1} corresponde a los grupos O-H terminales del PC, aunque de baja concentración esperada para estos grupos.²¹



R₁, R₂: Sustituyentes alquílicos

Figura 18. Estructura del *benzotriazol* empleado como un aditivo anti-UVA.⁶⁷

Con este método de recuperación se obtiene policarbonato post-consumo con una pureza y rendimiento alto haciendo de este método apto para la industria Colombiana y posible fuente de empleo.

3.10. RESISTENCIA DEL PC



CDs/antes



CD/después

Figura 19. Discos compactos prueba de resistencia.

El PC es tan estable que incluso en agua a temperatura de ebullición (~98°C) no se deforma ni se encoge, luego este indicador se conoce como “resistente al agua caliente”.^{6,50,56} El Policarbonato no presenta deformación alguna, solo se observó desprendimiento de pintura y adhesivos, pero no de la capa metálica. Prueba positiva.

3.11. EVALUACIÓN DEL POLICARBONATO POST-CONSUMO COMO INTERCAMBIADOR IÓNICO

3.11.1. Preparación de la resina de intercambio iónico

En la Figura 20 se presentan los materiales utilizados para la activación del policarbonato.



Tamiz PC/Triturado



Tamiz PC/Polvo



Sistema/Reactor

Figura 20. Materiales usados para la activación de la resina de PC.

3.11.2. Recuperación de metales

Activado el policarbonato se colocó en contacto con las soluciones contaminadas. Una vez terminada cada reacción se midió la cantidad de análito removido o recuperado mediante la utilización del equipo de absorción atómica. Se evaluó la recuperación para cobre, níquel y cromo, y se realizaron curvas de calibración para cada metal.

3.11.3. Curvas de calibración para los diferentes metales¹⁶¹

En la Figura 21 se presentan las curvas de calibración de los metales cobre, cromo y níquel. Los cálculos realizados para la preparación de las distintas soluciones se encuentran reportados en el *anexo G*.

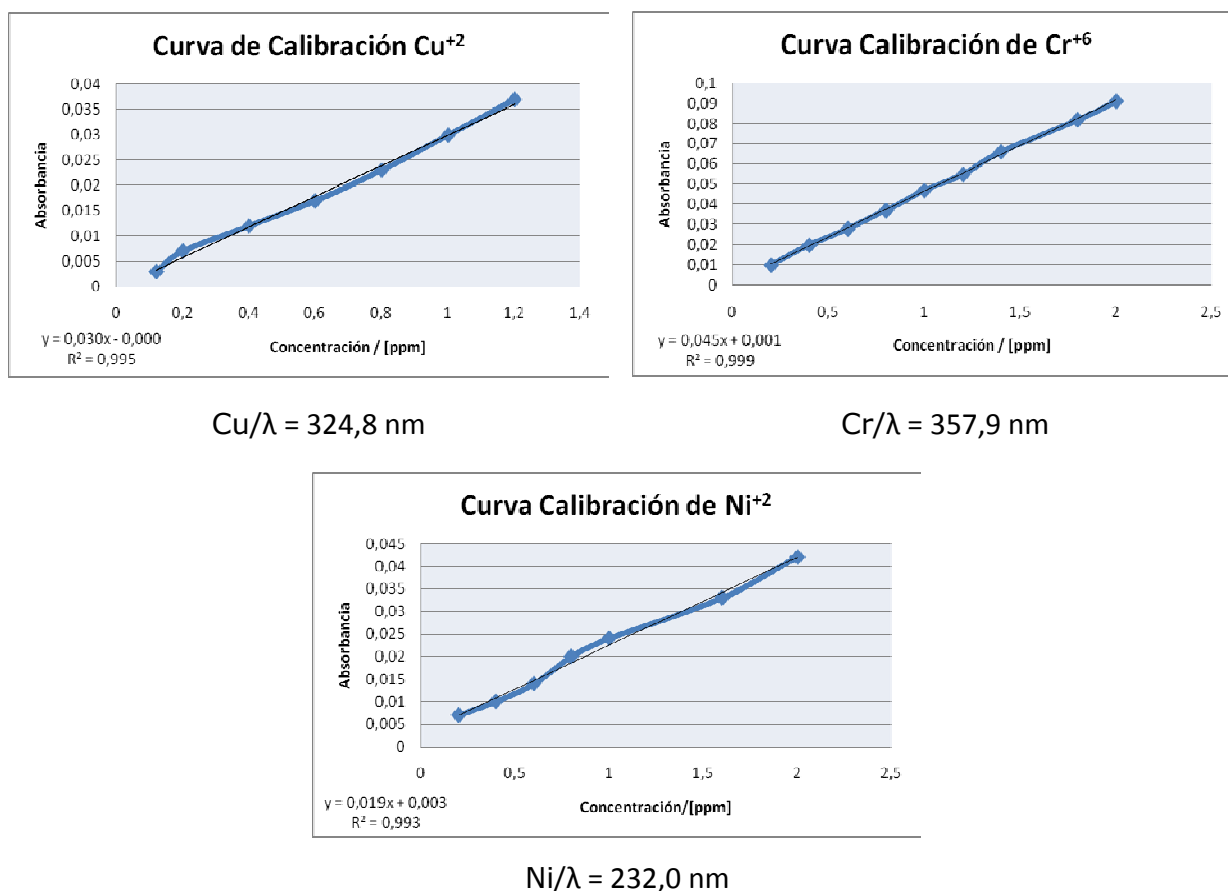


Figura 21. Curvas de calibración para cobre, níquel y cromo.

3.11.4. PC/Triturado en difusión por 24 días

Se realizó la activación de la resina de acuerdo con lo reportado en la sección 2.7.1. pero se varió solo en el tiempo de permanencia de la resina de PC en HCl ya que se colocó en contacto

por un periodo de 24 días en difusión, se filtró y se lavó con agua ultra pura; por último se dejó el material en contacto con la solución de cobre a 1 ppm a diferentes tiempos para su remoción.

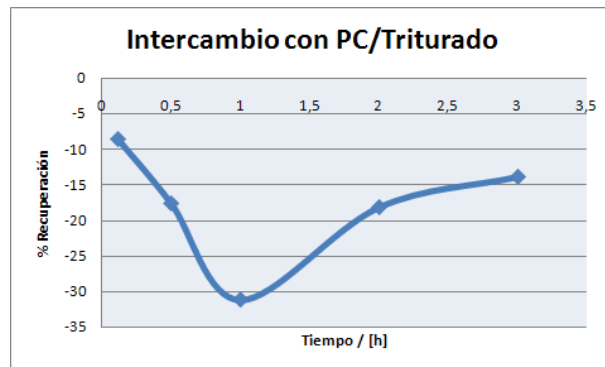


Figura 22. Intercambio de una solución de cobre a diferentes tiempos.

En la Figura 22 se observó un proceso de absorción de agua en lugar de absorción de ión (Cu^{+2}); se presentó un fenómeno de retención de agua concentrando el cobre logrando un máximo de concentración en una hora de intercambio.

3.11.5. Evaluación de dos tipos de materiales PC polvo y triturado para el intercambio con cobre a 1mg/L

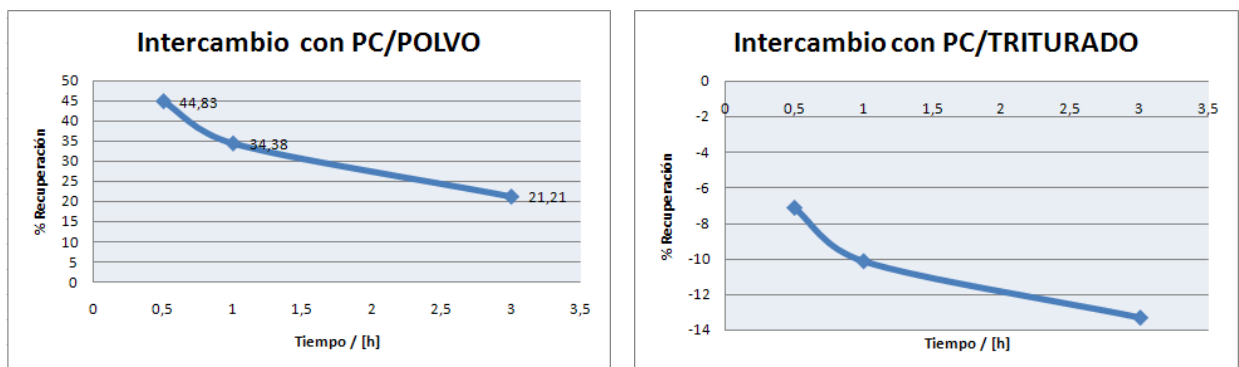


Figura 23. Representa el porcentaje de cobre recuperado.

Analizando las gráficas de la Figura 23 se puede decir que al usar policarbonato triturado produce un efecto o fenómeno pequeño de concentración de la muestra debido a que el PC tiene capacidad baja de absorción del agua³⁷ y además entre las paredes se unen las pequeñas piezas reteniendo el agua.

Con el material de policarbonato polvo se evidenció un efecto de intercambio por medio de AA, donde se recuperó significativamente el cobre a diferentes tiempos. Se puede observar que a mayor tiempo el proceso de intercambio decrece: esto se debe a una saturación de las moléculas encontrando un equilibrio de intercambio y luego el regreso a la solución del ión metálico.

Por tanto el tiempo óptimo para el proceso de intercambio son 30 minutos y el material en su forma de polvo produce mejores resultados. Esto nos da las primeras luces para poder decir que la reacción es netamente superficial.

3.11.6. Verificación del intercambio

Se realizó el procedimiento mencionado (ver sección 2.7.1.) pero se omitieron algunos pasos encontrando en todas la misma respuesta no hay intercambio (ver los resultados en la Tabla 13).

Tabla 13. Comportamiento del intercambio al omitir algunos pasos.

Metal	Intercambio	Tiempo	Observación
Cu ⁺²	No hay	30 min	Sin soda/con HCl/con PC/POLVO
Cu ⁺²			PC/POLVO directamente con la solución de cobre (II)
Cu ⁺²			Con soda/Sin HCl/con PC/POLVO

3.11.7. Recuperación de metales

En la Tabla 14 se consignan los valores de remoción de metales para el cromo, cobre y níquel, por separado y mezcladas.

Tabla 14. Intercambio iónico con cobre, níquel y cromo.

Metal	[%]/Recuperación ⁴	Teórica [mg/L]	Experimental ⁵ [Inicial - Final]	Variable	Material
Cu ⁺²	44,83	1,0	0,97 - 0,53	30 min	Polvo
Cr ⁺⁶	19,05	1,4	1,40 - 1,13		
Ni ⁺²	61,90	1,0	1,10 - 0,42		
Cu ⁺² , Cr ⁺⁶ , Ni ⁺²	No hay intercambio				

La resina de intercambio iónico (RII) de PC presenta baja selectividad hacia el cromo. El Cr⁺⁶ fue el que menos se recuperó esto se puede atribuir a una competencia de adsorción con el potasio K⁺ que también se disocia a partir de su sal K₂CrO₄.

Los tres metales analizados en soluciones por separado presentan intercambio iónico en orden creciente así Cr<Cu<Ni; este orden de afinidad por parte de la resina¹⁴⁷ puede atribuirse a diferencia entre los iones solvatados, radios iónicos y potenciales eléctricos propios de cada metal.

En la mezcla de cationes ninguno de los metales fue recuperado por la resina de PC, es posible que se presente una interferencia entre los metales que impida el proceso de remoción.

⁴ Fueron calculados con todas las cifras significativas.

⁵ Son valores aproximados de las concentraciones (inicial y final) en [mg/L].

3.11.8. Funcionamiento de la resina de intercambio iónico de PC

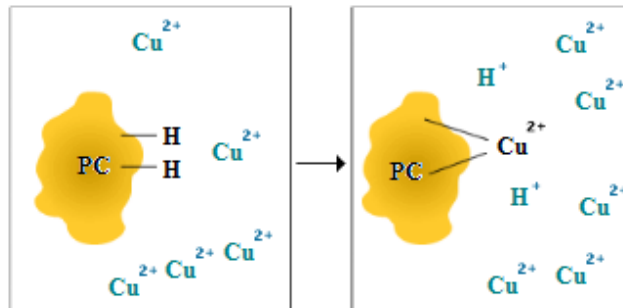


Figura 24. Esquema de remoción de Cobre

El tratamiento del polycarbonato con soda cáustica deja terminaciones de tipo carboxilato producto de la degradación superficial del material polimérico. Los protones observados en la Figura 24 son producto de la activación que posteriormente son intercambiados con metales pesados.

El polycarbonato post-consumo se puede utilizar como resina de intercambio para la limpieza de agua, luego se puede regenerar¹⁴⁶ y por último fundirse para hacer nuevos materiales cerrando el ciclo de vida útil. Mediante este proceso de reciclaje se dio un valor agregado al residuo plástico de los discos ópticos recuperados evitando que terminaran en los vertederos.

CONCLUSIONES

- ∞ Con este proyecto se consiguieron dos aportes científicos muy importantes en el campo de la *química verde*: el primero un método limpio de recuperación de policarbonato post-consumo a partir de CDs/DVDs y el segundo la utilización de la resina del PC modificada para remover algunos metales tóxicos.
- ∞ El reactor y método fueron validados mediante 30 experimentos donde se limpiaron 301 soportes ópticos incluyendo las familias de los CDs y DVDs comercializados en la actualidad en Bucaramanga. Alternativamente al método de reciclaje de soportes ópticos se puede acidular una vez finaliza el proceso con la soda cáustica para proteger el material.
- ∞ Se comprobó la presencia positiva de metal precioso plata en los discos compactos mediante una simple reacción espontánea. El aluminio y demás metales se pueden recuperar por técnicas electrostáticas y procesos metalúrgicos; las tintas se reutilizan haciendo pintura negra.
- ∞ La utilización por primera vez de soda cáustica al 5% como solución limpiadora de CDs y DVDs completos, elimina los recubrimientos superficiales obteniendo un policarbonato post-consumo con buena apariencia física, similar al polímero virgen y listo para nuevas aplicaciones; además se verificó que a concentraciones bajas el policarbonato es resistente al ataque básico.
- ∞ Mediante el proceso de limpieza en el Reactor Tipo A de PP se encontró dos tipos de soportes CDs-clase A y B. El A posee tiempos de remoción mínimo de 4 días y el B de 150 días como máximo. Por otra parte se comprobó la calidad de policarbonato mediante la inmersión en agua a una temperatura cercana a los 98°C sin daño alguno.
- ∞ Los porcentajes de recuperación obtenidos para el reciclaje físico de DVDs y CDs fue 98,48% y el químico 98,31% (CD-RW) y 93,91% (Mini-DVD). El método propuesto es eficiente, económico y

ecológico; permite recuperar policarbonato post-consumo reduciendo el uso del fosgeno y emplearlo directamente como combustible para mitigar el uso de los derivados del petróleo o para fundirlo para elaborar nuevos productos.

- ↻ Se compararon mediante IR todos los perfiles de las muestras de CDs y DVDs empleadas y se evidenció la existencia del policarbonato en todas las muestras; sin embargo se observó la presencia de un anti-UVA, *benzotriazol* en todas las matrices.
- ↻ Se evaluó la selectividad de la RII del PC/polvo a 30 minutos, encontrándose un orden creciente para el $Cr < Cu < Ni$ en soluciones independientes, siendo el Níquel el que presentó mejor respuesta de intercambio [61,90%]. Por su parte el intercambio iónico no se da cuando todos los metales están presentes en una misma solución. Se recomienda regenerar la resina para luego volverla a utilizar.
- ↻ Se demostró que es necesario modificar la resina para que ocurra el intercambio iónico, si se omite un paso en la activación no produce remoción de metales. Por otro lado el proceso superficial de intercambio evita bioacumulación en la cadena trófica.
- ↻ Se propone realizar análisis complementarios a la resina modificada empleando el método BET para encontrar el área, volumen y radio promedio de cada poro.
- ↻ Hoy en día no se cuenta en Colombia iniciativas de recogida y reciclado de soportes ópticos; con este trabajo se intenta impulsar esta naciente industria a través de una planta piloto de reciclaje de CDs/DVDs y plantear con futuros proyectos la recuperación de sus aguas residuales.
- ↻ Se sugiere para posteriores trabajos aumentar la concentración de la soda reduciendo el tiempo de exposición de los soportes y controlando el tiempo de remoción frente a la calidad el material pensando en sentido ambiente/costo para la industria.

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ BARON, W.; PALACIOS, J. *Obtención de productos a partir del PET reciclado obtenido de los residuos sólidos urbanos domésticos de Bucaramanga*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander. 2002. 1-7 p.
- ² PIÑERO, R.; GARCÍA, J.; COCERO, M.J. *Nonstationary Model of the Semicontinuous Depolymerization of Polycarbonate*. *AIChE J.* 52 No. 12 (2006) 4186-4199.
- ³ MIGUEL, R.; LARRAURI, E.; CACHO, I.; GUARDE, D. *Reciclado de soportes de almacenamiento óptico (CD's, DVD's)*. *Residuos*. 70 (2003) 46.
- ⁴ BAYER HISPANIA, S.A. *Reciclar CDs. El mercado del policarbonato* Online. Jun 2003. *Plast Univers*. Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6633>> (Visitado Marzo 2010)
- ⁵ Dirección de Impuesto y Aduanas Nacionales (DIAN). Online. (Visitada Marzo 2010) Disponible en: <http://websiex.dian.gov.co/>
- ⁶ BAYER AG. *En diversos productos, Makrolon marca la diferencia*. *Revista de Plásticos Modernos*. 87 No. 574 (2004) 320.
- ⁷ BROWN, T.; LEMAY, H.; BURSTEN, B. *Química La Ciencia Central*. Séptima edición. Editorial Pearson Prentice Hall. México (1998) Cap. 12. 428, 432 - 435 p.
- ⁸ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, Colombia. Sector Plásticos. *Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo*. Julio. 2004. 16,73-77,136 p.
- ⁹ SOARES, E.P.; SAIKI, M.; WIEBECK, H. *Determination of inorganic constituents and polymers in metalized plastic materials*. *Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 264, No. 1 (2005) 9 – 13.
- ¹⁰ IKEDA, A.; TAKATO, K.; TOMOAKI, S. *Recycle method for polycarbonate resin waste*. U.S. Patent Number 7 105 632: 2006.
- ¹¹ MADRUGA, E.L. *¿Qué es un polímero?* *Revista de Plásticos Modernos*. 466 (1995) 319.
- ¹² BECKER, H.; GARTNER, C. *Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems*. *Anal. Bioanal. Chem.* 390 (2009) 89 – 111.
- ¹³ MORRISON, R.T.; BOYD, R.N. *Química Orgánica*. Quinta edición. Editorial Pearson Educación. México (1990) 1211, 1212 p.

- ¹⁴ WIKIPEDIA. La enciclopedia libre. *Policarbonato*. Online. (Visitada Marzo 2010). Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Policarbonato>>
- ¹⁵ WIKIPEDIA. La enciclopedia libre. *Polímero*. Online. (Visitada Marzo 2010). Disponible en: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADmero>>
- ¹⁶ ARENAS, Helena. *Polímeros*. Ediciones UIS. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. (1999) 13-19.
- ¹⁷ CARPIO, T. M.; SANTOYA, L. E. *Evaluación de polímeros naturales en el proceso de potabilización del agua*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2000. 49.
- ¹⁸ VEGA, I.; SÁNCHEZ, L.; D'ACCORSO, N. *Synthesis and characterization of copolymers with 1,3-oxazolic pendant groups*. *Reactive & Functional Polymers*. 68 (2008) 233-241.
- ¹⁹ PICKERING, S.J. *Recycling technologies for thermoset composite materials – current status*. *Composites: Part A* 37 (2006) 1206.
- ²⁰ MONTAUDO, G.; CARROCCIO, S.; PUGLISI, C. *Thermal oxidation of poly(bisphenol A carbonate) investigated by SEC/MALDI*. *Polymer Degradation and Stability*. 77 (2002) 137 – 146.
- ²¹ MOUSTAGHFIR, A. *Élaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de zinc. Application à la photoprotection du polycarbonate*. Tesis Doctoral, Université Blaise Pascal. (2004) 82-84, 99, 100, 111-113, 182, 183 p.
- ²² PETROVIC, L.; POHLE, D.; MUNSTEDT, H.; RECHTENWALD, T.; SCHLEGEL, K.A.; RUPPRECHT, S. *Effect of BTPC filled polyetheretherketone on osteoblast cell proliferation in vitro*. *Journal of Biomedical Science*. 13 (2006) 41-46.
- ²³ MITAN, N.M.; BREBU, M.; BHASKAR, T.; MUTO, A.; SAKATA, Y.; KAJI, M. *Co-processing of DVDs and CDs with vegetable cooking oil by thermal degradation*. *J. Mater Cycles Waste Manag.* 9 (2007) 62-68.
- ²⁴ ESTEBAN, C.; FRANCO, B.M. *Recuperación de policarbonato post-consumo a partir de discos compactos e incorporación a una formulación de resinas fenol formaldehído*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2006. 98 p. (Director: GUTIÉRREZ, J.C.; Codirector: CASTILLO, E.F.).
- ²⁵ MARK, L.; HILLS, B. *Blend composition containing recycled polycarbonate and recycled polymethylmethacrylate*. *J. Cleaner Prod.* Vol. 5. Number 1-2 (1997) 172, 173.
- ²⁶ ANMA, H.; YOSHIMOTO, Y.; WARASHINA, M.; HATANAKA, Y. *Low temperature deposition of SiC thin films on polymer surface by plasma CVD*. *Applied Surface Science*. 175-176 (2001) 484-489.
- ²⁷ BAYER AG. *Makroform: Planchas de policarbonato y poliéster*. *Revista de Plásticos Modernos*. 83 No. 551 (2002) 448.

- ²⁸ YU, T.; ZHOU, Y.; LIU, K.; ZHAO, Y.; CHEN, E.; WANG, F.; WANG, D. *Improving thermal stability of biodegradable aliphatic polycarbonate by metal ion coordination*. *Polymer Degradation and Stability*. 94 (2009) 253-258.
- ²⁹ GONG, J.; MA, X.; WANG, S. Review: *Phosgene - free approaches to catalytic synthesis of diphenyl carbonate and its intermediates*. *Applied Catalysis A: General* 316 (2007) 1-21.
- ³⁰ CAO, X-L.; CORRIVEAU, J. *Migration of Bisphenol a from Polycarbonate Baby and Water Bottles into Water under Severe Conditions*. *J. Agric. Food Chem.* 56 (2008) 6378-6381.
- ³¹ CARROCCIO, S.; PUGLISI, C.; MONTAUDO, G. *Mechanisms of Thermal Oxidation of Poly(bisphenol A carbonate)*. *Macromolecules* 35 (2002) 4297-4305.
- ³² RIVATON, A. *Recent advances in bisphenol-A polycarbonate photodegradation*. *Polymer Degradation and Stability* 49 (1995) 163-179.
- ³³ WANG, Z.; LI, R-X. *Fabrication of DNA micropatterns on the polycarbonate surface of compact discs*. *Nanoscale Res Lett* 2 (2007) 69-74.
- ³⁴ SWOBODA, B. *Amélioration du comportement au feu de PET et d'alliages PET/PC recyclés*. Tesis Doctoral. Université Montpellier. (2007) 1, 51-53, 79, 269, 271.
- ³⁵ BAYER HISPANIA, S.A. *El Mercado del policarbonato. El policarbonato cumple 50 años*. Online. Jun. 2003. *Plast Univers.* (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6624>>
- ³⁶ DARENSBOURG, D.J.; MACKIEWICZ, R.M.; PHELPS, A.L.; BILLODEAUX, D. *Copolymerization of CO₂ and Epoxides Catalyzed by Metal Salen Complexes*. *Acc. Chem. Res.* 37 (2004) 836-844.
- ³⁷ SEYMOOR, R.B.; CARRAHER, C.E. *Introducción a la química de los polímeros*. Tercera edición. Editorial REVERTÉ. Barcelona (1995) 66-71, 260.
- ³⁸ XU, L.; WEISS, R.A. *The effect on tosylate salts and zinc sulfonated polystyrene ionomer on the thermal stability of bisphenol A polycarbonate*. *Polymer Degradation and Stability* 84 (2004) 295-304.
- ³⁹ *Propiedades de los policarbonatos*. Online. (Visitada Marzo 2010). Disponible en: <<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/PC/Propiedades.htm>>
- ⁴⁰ BAYER AG. *Breve historia del descubrimiento del policarbonato*. *Revista de Plásticos Modernos*. 87 No. 574 (2004) 314.
- ⁴¹ SABIC INNOVATIVE PLASTIC IBÉRICA, S.A. *El mercado del policarbonato. Fechas importantes en la historia de la resina Lexan*. Online. Jun. 2003. *Plast Univers.* (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6636>>

- ⁴² SABIC INNOVATIVE PLASTIC IBÉRICA, S.A. *El Mercado del policarbonato. La resina Lexan cumple 50 años.* Online. Jun. 2003. Plast Univers. (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6634>>
- ⁴³ SABIC INNOVATIVE PLASTIC IBÉRICA, S.A. *GE Plastics añade brillo fluorescente a los discos ópticos.* Online. May. 2002. Plast Univers. (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=2554>>
- ⁴⁴ GARZON, R. *Materiales técnicos: Policarbonato.* Revista de plásticos modernos 267 (1974) 371.
- ⁴⁵ FOX D.; PETERS E.N. *Method for Recovering a Dihydric Phenol from a Scrap Polyester.* U.S. Patent Number 4 885 407; 1989.
- ⁴⁶ SRIVASTAVA, A.; SINGH, T.V.; MULE, S.; RAJAN, C.R.; PONRATHNAM, S. *Study of chemical, optical and thermal modifications induced by 100 MeV silicon ions in a polycarbonate film.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 192 (2002) 402-406.
- ⁴⁷ DIEPENS, M.; GIJSMAN, P. *Photo-oxidative degradation of bisphenol A polycarbonate and its possible initiation processes.* Polymer Degradation and Stability 93 (2008) 1383-1388.
- ⁴⁸ DIEPENS, M.; GIJSMAN, P. *Photodegradation of bisphenol A polycarbonate.* Polymer Degradation and Stability 92 (2007) 397-406.
- ⁴⁹ MASUELLI, M.; MARCHESI, J.; OCHOA, N.A. *SPC/PVDF membranes for emulsified oily wastewater treatment.* Journal of Membrane Science 326 (2009) 688-693.
- ⁵⁰ KAHL, R. *Cuatro años de experiencias con policarbonato.* Revista de Plásticos Modernos 94 (1964) 245.
- ⁵¹ BAYER HISPANIA, S.A. *El Mercado del policarbonato. El CD de audio cumple 20 años.* Online. Jun. 2003. Plast Univers. Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6631>> (Visitado Marzo 2010)
- ⁵² BAYER HISPANIA, S.A. *El Mercado del policarbonato. El mercado de soportes ópticos espera crecer un 15% anual hasta 2005.* Online. Jun. 2003. Plast Univers. (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6632>>
- ⁵³ KIRCHER, K. *Policarbonato protegido contra el fuego.* Revista de Plásticos Modernos 352 (1985) 459.
- ⁵⁴ ORTEGA, M.N. *Historias del reciclaje.* Tecnología del Plástico. Cuarta Edición, Volumen 22. Mayo 2007. 2, 4, 5, 37, 67 p .
- ⁵⁵ K Preview: Compounds. *Compounds and masterbatches at K 2007.* Plastics Additives & Compounding. (2007) 38.

- ⁵⁶ GERETOVSKY, Zs.; HOPP, B.; BERTÓTI, I.; BOYD, I.W. *Photodegradation of polycarbonate under narrow band irradiation at 172 nm*. *Applied Surface Science* 186 (2002) 85-90.
- ⁵⁷ PER, A.; GERALD, J.; GUNNAR, K.; GUNNAR, E.; GUNNAR, T. *Parallel Nanoliter Microfluidic Analysis System*. *Anal. Chem.* 79 (2007) 4022-4030.
- ⁵⁸ *Proceso de reciclaje CD/DVD*. Online. (Visitada Marzo 2010). Disponible en: <http://reciclajecd.com/index.php>
- ⁵⁹ OBRADOVIC, J.; COLLINS, J.; HIRSCH, O.; MANTLE, M.; JOHNS, M.; GLADDEN, L. *The use of THz time-domain reflection measurements to investigate solvent diffusion in polymers*. *Polymer* 48 (2007) 3494-3503.
- ⁶⁰ HERRERÍAS, J.R. *Almacenamiento*. Online. (Visitado Abril 2010). Disponible en: <http://www.conozcasuhardware.com/quees/almacen1.htm>
- ⁶¹ ODELL, P.G.; BARANYI, G.; ALEXANDRU, L. *Process for the purification of Ti containing polycarbonate with solvent, complexing agent and water*. U.S. Patent Number 4 921 940:1990.
- ⁶² ASOH T. *Process for producing powder aggregate particle of high molecular weight polycarbonate resin*. U.S. Patent Number 5 182 363; 1993.
- ⁶³ MORAIS, S.; CARRASCOSA, J.; MIRA, D.; PUCHADES, R.; MAQUIEIRA, A. *Microimmunoanalysis on standard compact discs to determine low abundant compounds*. *Anal. Chem.* 79 (2007) 7628-7635.
- ⁶⁴ BAYER AG. *El diseño y la funcionalidad de las áreas y estaciones de servicio se fundamentan en las planchas de policarbonato*. *Revista de Plásticos Modernos* 87 No. 574 (2004) 324.
- ⁶⁵ SOARES, E.P.; NUNES, E.D.; SAIKI, M.; WIEBECK, H. *Caracterização de polímeros e determinação de constituintes inorgânicos em embalagens plásticas metalizadas*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 12. No. 3 (2002) 206-212.
- ⁶⁶ RINALDI, R.; GOVONI, G.; VISANI, F. *Process for the purification of polycarbonate solutions*. U.S. Patent Number 4 316 009:1982.
- ⁶⁷ SÁNCHEZ, J.J. *Comportamiento Térmico y Mecánico del Poli(EtilénTereftalato) (PET) Modificado con Resinas Poliméricas Basadas en Bisfenol-A*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya., Barcelona, (2003) 6,7,71-73,115,116 p.
- ⁶⁸ DIEPENS, M.; GIJSMAN, P. *Influence of light intensity on the photodegradation of bisphenol A polycarbonate*. *Polymer Degradation and Stability* 94 (2009) 34-38.
- ⁶⁹ WITEK, M.A.; LLOPIS, S.D.; WHEATLEY, A.; McCARLEY, R.L.; SOPER, S.A. *Purification and preconcentration of genomic DNA from whole cell lysates using photoactivated polycarbonate (PPC)*

microfluidic chips. Nucleic Acids Res. 34 No. (10) (2006) e74. Disponible en: <<http://nar.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/34/10/e74>>

⁷⁰ FORTUNELLI, A.; ORTIZ, M. *Constitutive model for plasticity in an amorphous polycarbonate*. Physical Review E 76 (2007) 041806.

⁷¹ AMIS, E.J.; FANCONI, B.M. *Materials science and engineering laboratory polymers*. Online (Visitado Abril 2010) January (2000) p27-29 Disponible en: <<http://www.nist.gov/msel/polymers/upload/ANNREP.pdf>>

⁷² SARAIVA, E. M. *Ageing of PC/PBT blend: Mechanical properties and recycling possibility*, Polymer Testing. 26 (2007) 378.

⁷³ RIVATON, A.; MAILHOT, B.; SOULESTIN, J.; VARGHESE, H.; GARDETTE, J.L. *Influence of the chemical structure of polycarbonates on the contribution of crosslinking and chain scissions to the photothermal ageing*. European Polymer Journal 38 (2002) 1349-1363.

⁷⁴ PIÑERO, R.; GARCÍA, J.; COCERO, M.J. *Chemical recycling of polycarbonate in a semi-continuous lab-plant. A green route with methanol and methanol-water mixtures*. Green Chem. 7 (2005) 380.

⁷⁵ HU, L-C.; OKU, A.; YAMADA, E. *Alkali-catalyzed methanolysis of polycarbonate. A study on recycling of bisphenol-A and dimethyl carbonate*. Polymer 39 (1998) 3841 – 3845.

⁷⁶ BRAUN, D. *Simple methods for identification of plastics*. Hanser Publishers. (1982) 75.

⁷⁷ BRUNELLE, D.J.; COLONNA, M.; BERTI, C.; BINASSI, E. *Polycarbonate Nanocomposites*. U.S. Patent Number 0 043 024: 2009.

⁷⁸ REYNOLDS, A. *Thermoplastics compounding set for growth and change*. Plastics Additives & Compounding March 2000.

⁷⁹ MASUDA, T.; KUSHINO, T.; MATSUDA, T.; MUKAI, S.; HASHIMOTO, K.; YOSHIDA, S. *Chemical recycling of mixture of waste plastics using a new reactor*. Chemical Engineering Journal 82 (2001) 173-181.

⁸⁰ SOLLA, J.; LAFUENTE, E.; ALDAZ, A.; MARTÍNEZ, M.T.; FELIU, J.M. *Electrochemical characterization and reactivity of Pt nanoparticles supported on single-walled carbon nanotubes*. Electrochimica Acta 52 (2007) 5582-5590.

⁸¹ ULRICH, J.; BRION, H.G.; KIRCHHEIM, R.; *The influence of sorption of small molecules on the yield stress of glassy polymers*. Polymer 40 (1999) 1807-1814.

⁸² PEACOCK, P.M.; McEWEN, C.N. *Mass spectrometry of synthetic polymers*. Anal. Chem. 76 (2004) 3417-3428.

⁸³ TORIKAI, A.; MITSUOKA, T.; FUEKI, K. *Wavelength sensitivity of the photoinduced reaction in polycarbonate*. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry 31 No. 11 (1993) 2785-2788.

- ⁸⁴ FELLER, J.F.; BOURMAUD, A. *Rheological and calorimetric properties of recycled bisphenol A poly(carbonate)*. *Polymer Degradation and Stability* 82 (2003) 99-104.
- ⁸⁵ TAGAYA, H.; KATOH, K.; KADOKAWA, J.; CHIBA, K. *Decomposition of polycarbonate in subcritical and supercritical water*. *Polymer Degradation and Stability* 64 (1999) 289-292.
- ⁸⁶ YI SUEN, S.; CHUAN LIU, Y.; SHUAN, C.C. *Exploiting immobilized metal affinity membranes for the isolation or purification of therapeutically relevant species*. *Journal of Chromatography B*, 797 (2003) 305-319.
- ⁸⁷ LEE, W.; KIM, Y.; KAANG, SHINYOUNG. *Electrical properties of polyaniline/sulfonated polycarbonate blends*. *Synthetic Metals* 113 (2000) 237-243.
- ⁸⁸ BAYER. TUNZA. *CDs – PC? – OK!* La Revista del PNUMA para los Jóvenes. Tomo 2 No. 3 12 p. (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.ourplanet.com/tunza/issue0203sp/pdfs/complete.pdf>>
- ⁸⁹ INDUSTRY NEWS. *Bayer expands Chinese polycarbonate production*. *Plastics Additives & Compounding*. July/August (2005) 12.
- ⁹⁰ BILES, J.E.; McNEAL, T.P.; BEGLEY, T.H.; HOLLIFIELD, H.C. *Determination of Bisphenol-A in reusable polycarbonate food-contact plastics and migration to food-simulating liquids*. *J. Agric. Food Chem.* 45 (1997) 3541-3544.
- ⁹¹ SHI, C.; GROSS, S.M.; DESIMONE, J.M.; KISEROW, D.J.; ROBERTS, G.W. *Reaction Kinetics of the solid state polymerization of poly(bisphenol A carbonate)*. *Macromolecules* 34 (2001) 2060-2064.
- ⁹² CENTRO ESPAÑOL DE PLÁSTICOS; CONFEDERACIÓN ESPAÑOLA DE EMPRESARIOS DE PLÁSTICOS; SABIC INNOVATIVE PLASTIC IBÉRICA, S.A. *El Mercado del policarbonato. La automoción consume el 40% del PC en España*. Online. Jun. 2003. *Plast Univers*. (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6622>>
- ⁹³ BOTTINO, A.; CAPANNELLI, G.; COMITE, A.; FERRARI, F.; FIRPO, R.; VENZANO, S. *Membrane technologies for water treatment and agroindustrial sectors*. *C.R. Chimie* 12 (2009) 882-888.
- ⁹⁴ RAHIMPOUR, A.; MADAENI, S.S.; SHOCKRAVI, A.; GHORBANI, S. *Preparation and characterization of hydrophile nano-porous polyethersulfone membranes using synthesized poly(sulfoxide-amine) as additive in the casting solution*. *Journal of Membrane Science* 334 (2009) 64-73.
- ⁹⁵ NANTHAKUMAR, B.; GRIMM, D.; PAWLIK, M. *Anionic flotation of high-iron phosphate ores-Control of process water chemistry and depression of iron minerals by starch and guar gum*. *Int. J. Miner. Process.* 92 (2009) 49-57.
- ⁹⁶ SN. ULLMANN'S. *Encyclopedia of industrial chemistry*. Sexta edición. Weinheim, Germany. Electronic Release Wiley-VCH. 2002

- ⁹⁷ SHAFER SJ. *Method for Recovering Bis Hydroxy Aromatic Organic Values and Bis Aryl Carbonate Values from Scrap Aromatic Polycarbonate*. U.S. Patent Number 5 336 814; 1994.
- ⁹⁸ ELIAS, X.C. *Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Segunda edición. Editorial Diaz de Santos. Madrid (2009) 1020.
- ⁹⁹ SIVALINGAM, G.; MADRAS, G. *Kinetics of degradation of polycarbonate in supercritical and subcritical benzene*. Ind. Eng. Chem. Res. 41 (2002) 5337-5340.
- ¹⁰⁰ RIVATON, A.; SALLET, D.; LEMAIRE, J. *The photochemistry of bisphenol-A polycarbonate*. Polymer Photochemistry. 3 No. 6 (1983) 463-481.
- ¹⁰¹ MUNRO, H.S.; ALLAKER, R.S. *Wavelength dependence of the surface photo-oxidation of bisphenol A polycarbonate*. Polymer Degradation and Stability. 11 No. 4 (1985) 349-358.
- ¹⁰² LEMAIRE, J.; GARDETTE, J.; RIVATON, A.; ROGER, A. *Dual photo-chemistries in aliphatic polyamides, bisphenol A polycarbonate and aromatic polyurethanes-A short review*. Polymer Degradation and Stability 15 (1986) 1-13.
- ¹⁰³ ANDRADY, A.L. *Wavelength sensitivity in polymer photodegradation*. Polymer Science 128 (1997) 47-97.
- ¹⁰⁴ LAI, S.; WANG, S.; LUO, J.; LEE, L.J.; YANG, S.; MADOU, M.J. *Design of a compact disk-like microfluidic platform for enzyme-linked immunosorbent assay*. Anal. Chem. 76 (2004) 1832-1837.
- ¹⁰⁵ VARMA, M.M.; INEROWICZ, H.D.; REGNIER, F.E.; NOLTE, D.D. *High-speed label-free detection by spinning-disk micro-interferometry*. Biosensors and Bioelectronics 19 (2004) 1371-1376.
- ¹⁰⁶ LI, Y.; OU, L.M.; YU, H. *Digitized molecular diagnostics: reading disk-based bioassays with standard computer drives*. Anal. Chem. 80 (2008) 8216-8223.
- ¹⁰⁷ BAÑULS, M.J.; GONZÁLEZ, V.; PUCHADES, R.; MAQUIEIRA, A. *PMMA isocyanate-modified digital discs as a support for oligonucleotide-based assays*. Bioconjugate Chem. 18 (2007) 1408-1414.
- ¹⁰⁸ POTYRAILO, R.A.; MORRIS, W.G.; LEACH, A.M.; SIVAVEC, T.M.; WISNUDEL, M.B.; BOYETTE, S. *Analog signal acquisition from computer optical disk drives for quantitative chemical sensing*. Anal. Chem. 78 (2006) 5893-5899.
- ¹⁰⁹ BANIK, R.M.; PRAKASH, M.; UPADHYAY, S.N. *Microbial biosensor based on whole cell of pseudomonas sp. for online measurement of p-nitrophenol*. Sensors and Actuators B 131 (2008) 295-300.
- ¹¹⁰ MOHAN, D.; SINGH, K.P.; SINHA, S.; GOSH, D. *Removal of pyridine derivatives from aqueous solution by activated carbons developed from agricultural waste materials*. Carbon 43 (2005) 1680-1693.
- ¹¹¹ SOO JEON, S.; HAN, S.; HYUN, Y.; SOON, S. *Polycarbonate-based conductive film prepared by coating DBSA-doped PEDOT/sorbitol*. Synthetic Metals 148 (2005) 287-291.

- ¹¹² BRUNELLE, D.J. *Sulfonated Telechelic Polycarbonates*. U.S. Patent Number 0043071:2009.
- ¹¹³ BRUNELLE, D.J. *Activated esters for synthesis of sulfonated telechelic polycarbonates*. U.S. Patent Number 0043069:2009.
- ¹¹⁴ LEE, W-J.; KIM, Y-J.; JUNG, M-O.; KIMN, D-H.; LYUN, D.; KAANG, S. *Preparation and properties of conducting polypyrrole-sulfonated polycarbonate composites*. *Synthetic Metals* 123 (2001) 327-333.
- ¹¹⁵ RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLEZ, J.F.; SUÁREZ, R. *Bioacumulación por metales pesados en el capitán de la sabana (Eremophilus mutissi). Habitante de la cuenca alta del río Bogotá*. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola*. Vol. 2 No. 1909-8138 (2007) 101-115. (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.udenar.edu.co/acuicola/revista/archivo/a3vol3/conf10.pdf>>
- ¹¹⁶ MANCERA, N.J.; LEÓN, R.A. *Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia*. *Acta Biológica Colombiana*. 11 No. 1 (2006) 3-23 (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v11n1/v11n1a11.pdf>>
- ¹¹⁷ NOURELDIN, M.B.; HASAN, A.K. *Global energy targets and optimal operating conditions for waste energy recovery in Bisphenol – A plant*. *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 374-381.
- ¹¹⁸ GUIBIN, C.T.; LIU, J.; ZHOU, Q.; LIU, J. *Rapid degradation of bisphenol A using air as the oxidant catalyzed by polynuclear phthalocyanine complexes under visible light irradiation*. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 172 (2005) 275-282.
- ¹¹⁹ KANG, H-Y.; SCHOENUNG, J. *Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options*. *Resources, Conservation and Recycling* 45 (2005) 368-400.
- ¹²⁰ BARNABÉ, S.; BRAR, S.K.; TYAGI, R.D.; BEAUCHESNE, I.; SURAMPALLI, R.Y. *Pre-treatment and bioconversion of wastewater sludge to value-added products-Fate of endocrine disrupting compounds*. *Science Of Total Environment* 407 (2009) 1471-1488.
- ¹²¹ KIM, W.B.; JOSHI, U.A.; SUNG, J. *Making polycarbonates without employing phosgene: an overview on catalytic chemistry of intermediate and precursor syntheses for polycarbonate*. *Ind. Eng. Chem. Res.* 43 (2004) 1897-1914.
- ¹²² SCHILT, M.V.; KEMMERE, M.; KEURENTJES, J. *Process development for the catalytic conversion of cyclohexene oxide and carbon dioxide into poly(cyclohexene carbonate)*. *Catalysis Today* 115 (2006) 162-169.
- ¹²³ LG. CHEMICAL Ltd. *Phosgene-free process cuts polycarbonate costs*. *Process Engineering* 11 (2003).
- ¹²⁴ GLENN, M. *Photoacid generators for catalytic decomposition of polycarbonate*. Thesis Master, Georgia Institute of Technology. (2006) 2,8,14,61,80,87,88,91,105 p.

- ¹²⁵ ALLEN, D.T.; SHONNARD, D.R. *Green engineering: environmentally conscious design of chemical processes and products*. AIChE Journal. 47 No. 9 (2001) 1906-1910.
- ¹²⁶ SRIVASTAVA, R.; SRINIVAS, D.; RATNASAMY, P. *Syntheses of polycarbonate and polyurethane precursors utilizing CO₂ over highly efficient, solid as-synthesized MCM-41 catalyst*. Tetrahedron Letters 47 (2006) 4213-4217.
- ¹²⁷ BAYER HISPANIA, S.L. *El Mercado del policarbonato. Un plástico perfecto*. Online. Jun. 2003. Plast Univers. Disponible en: <<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=6625>> (Visitado Marzo 2010)
- ¹²⁸ BINKOWSKA, P.; CORD, B.; WOHLFART, P. *Mass production of DVDs: faster, more complex but cheaper and simpler*. Microsyst Technol. 13 (2007) 139-144.
- ¹²⁹ ESKICIOGLU, A.; TOWN, J.; DELP, E. *Security of digital entertainment content from creation to consumption*. Signal Processing: Image Communication 18 (2003) 237-262.
- ¹³⁰ KIDO, H.; MAQUIEIRA, A.; HAMMOCK, B.D. *Disc-based immunoassay microarrays*. Analytica Chimica Acta 411 (2000) 1-11.
- ¹³¹ KOBAYASHI, S.; HORIGOME, T. *An advanced signal processing technique designed for multilevel signal optical disc system*. Optical Review 4 No. 3 (1997) 376-384.
- ¹³² SOMALINGAM, S.; HAIN, M.; TSCHUDI, T.; KNITTEL, J. RICHTER, H. *Aberration compensation using nematic liquid crystals* 102 No. 0930-8989 (2003) 35-43.
- ¹³³ MEDEROS, M.R.; SÁNCHEZ, A.M.; DORTA, J. *Utilización y conservación de los soportes electrónicos*. Acimed (Ciudad de La Habana) Vol. 10 No. 6 (2002) (Visitado Marzo 2010) Disponible en: <<http://eprints.rclis.org/1829/1/utilizacion.pdf>>
- ¹³⁴ BOSCH, V. *Discos ópticos y sus unidades*. Online. (Visitada Abril 2010) Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos5/discopti/discopti.shtml>>
- ¹³⁵ GALÁZ, S.; BORDET, M. *Periféricos*. Online. (Visitada Abril 2010) Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos5/losperif/losperif.shtml>>
- ¹³⁶ DOBRUSINA, S.A.; GANICHEVA, S.I.; TIKHONOVA, I.G.; VELIKOVA, T.D.; ZAVALISHIN, P.E. *Influence of external factors on the longevity of information recorded on DVD±R discs*. Scientific and Technical Information Processing 34 No. 5 (2007) 258-263.
- ¹³⁷ SOTELO, J.L.; AGUADO, J.; SERRANO, D.P.; GRIEKEN, R.V. *Reciclado químico de plásticos y aceites lubricantes usados mediante catalizadores zeolíticos*. Online. (Visitada Abril 2010) Disponible en: <<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?idarticulo=787>>
- ¹³⁸ SERRANO, D.P.; AGUADO, J.; ESCOLA, J.M.; GARAGORRI, E. *Reciclado químico de plásticos*. Revista de Plásticos Modernos 82 No. 542 (2001) 155.

- ¹³⁹ DAHMUS, J.B.; GUTOWSKI, T.G. *What gets recycled: an information theory based model for product recycling*. Environ. Sci. Technol. 41 (2007) 7543-7550.
- ¹⁴⁰ CERRO, M. *Reciclaje de plásticos*. Online. (Visitado Abril 2010). AlephZero 4 (1996) Disponible en: <<http://hosting.udlap.mx/profesores/miguela.mendez/alephzero/archivo/historico/az04/reciclaje.html>>
- ¹⁴¹ GOTO, M.; KOYAMOTO, H.; KODAMA, A.; HIROSE, T.; NAGAOKA, S. *Depolymerization of polyethylene terephthalate in supercritical methanol*. J. Phys.: Condens. Matter. 14 (2002) 11427-11430.
- ¹⁴² GARCÍA, J.; PÉREZ, L.; COCERO, M.J. *New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering*. Chemical Engineering Journal 133 (2007) 7-30.
- ¹⁴³ YANG, Y.; LU, Y.; XIANG, H.; XU, Y.; LI, Y. *Study on methanolytic depolymerization of PET with supercritical methanol for chemical recycling*. Polymer Degradation and Stability 75 (2002) 185-191.
- ¹⁴⁴ REYNOLDS, A. *Thermoplastics compounding set for growth and chance*. Plastics Additives & Compounding. March (2000) 26-29.
- ¹⁴⁵ MATSUMURA, S. *Enzyme-catalyzed synthesis and chemical recycling of polyesters*. Macromolecular Bioscience 2 No. 3 (2002) 105-126.
- ¹⁴⁶ PUGA, J. *Resinas de intercambio iónico*. Online (Visitado Abril 2010). Monografias.com Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos51/intercambio-ionico/intercambio-ionico.shtml>>
- ¹⁴⁷ ZERQUERA, A.; PÉREZ, G.R.; DÍAZ, I.; DELGADO, S.A. *Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármacos*. Rev. Cubana Farm. 34 No. (3) (2000) 196-206. Online (Visitado Abril 2010). Disponible en: <http://bvs.sld.cu/revistas/far/vol34_3_00/far07300.pdf>
- ¹⁴⁸ LINSAY, E. *Recuperación de la bentonita, utilizada en el proceso de filtrado de aceites vegetales y su aplicación en la eliminación de los principales cationes metálicos contenidos en las aguas residuales provenientes de los talleres de galvanoplastia*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2008. (Director: GUTIÉRREZ, J.C.)
- ¹⁴⁹ ANAYA, B.; LUNA, J.A. *Determinación de metales pesados en agua residual en proceso de Galvanoplastia*. Online. (Visitada Marzo 2007). Disponible en: <<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=1533>>
- ¹⁵⁰ HEREDIA, S. *Experimentos de química recreativa con sulfato de cobre pentahidratado*. Rev. Eureka. Enseñ. Divul. Cien. 3 No. (3) (2006) 467-484.
- ¹⁵¹ Laboratory Quality Management & Accreditation. *Technical report: guidance to operation of water quality laboratories*. Online. (Visitada Abril 2010). September (2002) Disponible en: <<http://www.unece.org/env/water/publications/documents/guidancelaboratories.pdf>>

- ¹⁵² CIARDELLI, G.; CORSI, L.; MARCUCCI, M. *Membrane separation for wastewater reuse in the textile industry*. Resources, Conservation and Recycling 31 (2000) 189-197.
- ¹⁵³ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC 5637. *Etiquetas ambientales tipo I. Sello ambiental colombiano. Criterios ambientales para artesanías, manualidades, hilos, telas, y otros productos del diseño, elaborados en fibras de fique con tecnología artesanal*. (Visitada Abril 2010). (2008) Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/documentos/NTC5637_criterios_ambientales_artesantias_en_fique.pdf>
- ¹⁵⁴ WIKIPEDIA. *La enciclopedia libre. Enfermedad de Wilson*. Online. (Visitada Abril 2010). Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Enfermedad_de_Wilson>
- ¹⁵⁵ Ministerio de la Protección Social. República de Colombia. DECRETO 1594 de 1984. *Usos del agua y residuos líquidos*. Online. (Visitado Abril 2010). Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/documentos/dec_1594_260684.pdf>
- ¹⁵⁶ NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. *Normas oficiales para la calidad del agua Colombia*. Online. (Visitada Abril 2010) Disponible en: <<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/normas2/Norma-Col.pdf>>
- ¹⁵⁷ *EJERCICIOS DE ELECTROQUÍMICA*. Online. (Visitada Abril 2010). Disponible en: <<http://www.fqdiazescalera.com/ejercicios/q2/09.pdf>>
- ¹⁵⁸ SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T.A. *Principios de análisis instrumental*. Quinta edición. Editorial Mc Graw Hill. México (2001) Capítulos 16, 22.
- ¹⁵⁹ EUROFLON S.A. *Forma de trabajar con el equipo de termofusión*. Online. (Visitado Abril 2010). Disponible en: <<http://www.euroflon.com.ar/Polipropileno/Procedimiento%20Termofusion.pdf>>
- ¹⁶⁰ CALDERON, C.E. *Manual para la interpretación de espectros infrarrojos*. Universidad Nacional de Colombia. (1985) 50-59, 63-71 p.
- ¹⁶¹ PERKIN ELMER. *Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry*. (1976)
- ¹⁶² GOODFELLOW. *Policarbonato (PC) material de información*. Online. (Visitado Abril 2010). Disponible en: <<https://www.goodfellow.com/S/Policarbonato.html>>
- ¹⁶³ EL ESPECTADOR. (Visitada Mayo 2010) Disponible en: <<http://www.elespectador.com/articulo167361-patentado-un-sistema-reciclar-cddvd>>
- ¹⁶⁴ *ECOLOGÍA*. Online. (Visitada Abril 2010). Disponible en: <<http://cetis-ecologia.blogspot.com/feeds/posts/default>>

ANEXOS

ANEXO A.

¿CÓMO BUSCAR EN LA PÁGINA DE LA DIAN?

Consulta por índice alfabético

<http://www.dian.gov.co/>

Cifras y gestión

Estadística

Estadísticas del comercio exterior

SIEX

Importaciones

Subpartida arancelaria

Totales por subpartida

A continuación se llena la tabla que aparece con los siguientes datos para su verificación:

NOMBRE	CÓDIGO	CANTIDAD	AÑO	Valor Fob (US\$)	Valor Cif (US\$)
Policarbonato (en forma primaria)	39-07-400000 Capitulo- partida- subpartida	2'648.638 Kg	2008	8,073,702.94	8,505,973.04
		2'688.972 Kg	2007	8,029,827.82	8,431,181.20
		2'255.997 Kg	2006	6,707,335.10	7,069,717.89
		2'296.633 Kg	2005	7,206,596.14	7,206,596.14
		2'267.045 Kg	2004	5,312,373.27	5,631,409.58
		1'473.288 Kg	2003	3,301,936.97	3,481,449.05
Discos compactos para reproducir imagen o imagen y sonido	8523.40.22.00	2'457.394 U	2008	7,565,238.99	8,138,146.86
		2'023.982 U	2007	6,218,411.83	6,627,379.68
Discos compactos musicales	8523.40.21.00	652.747 U	2008	1,202,694.63	1,350,705.84
		2'810.096 U	2007	1,789,884.89	2,033,859.14
Discos compacto sin grabar	8523.40.10.00	14'964.838 U	2008	4,451,169.47	4,743,686.16
		66'247.587 U	2007	4,534,147.73	4,839,178.94

ANEXO B.

GRADO DE PUREZA DEL AGUA

Pureza del agua en base a las sales disueltas.¹⁵¹

Grado de Pureza	Máxima Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Concentración aproximada de sales disueltas (mg/L)
Pura	10	2-5
Muy Pura	1	0,2-0,5
Ultrapura	0.1	0,01-0,02

Cuando la calidad del agua no reúne las características para su directo aprovechamiento debe ser acondicionada para diferentes procesos que son realizados en una planta de tratamiento, proceso cuya selección depende básicamente de la calidad del agua cruda y de la calidad del agua tratada.¹⁷

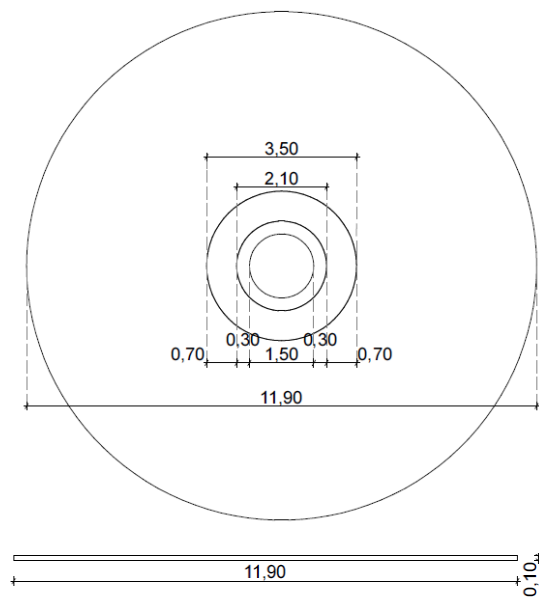
ANEXO C. DISEÑO DEL REACTOR

A continuación se presentan los modelos de reactor, arandela y disco empleados en el desarrollo del actual proyecto. * Las medidas están dadas a razón de centímetros.

Programas:

- ARCHICAD 13: Diseño y Moldeo
- ARTLANTIS RENDER 3.0: Renderización
- PHOTOSHOP CS3: Ajustes de dibujo

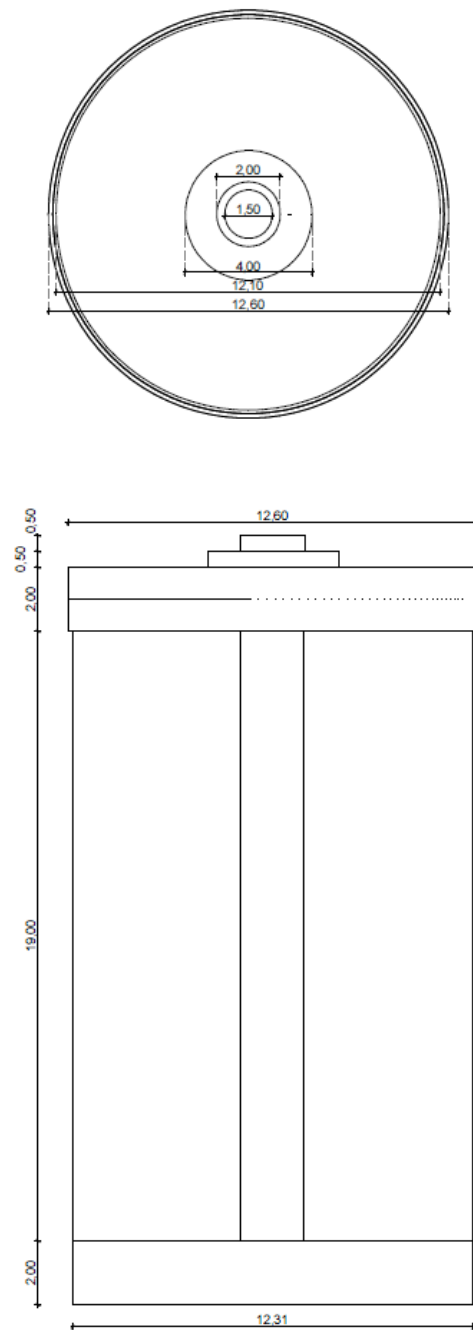
I. CD/DVD (escala 1:100)



II. ARANDELA (escala 1:100)



III. REACTOR TIPO A (escala 1:200)



A partir de este diseño a escala se puede mejorar automatizándolo e implementándolo en un proceso industrial de limpieza de CDs y DVDs.

ANEXO D.

COMPATIBILIDAD QUÍMICA DEL POLICARBONATO

Compatibilidad química del policarbonato ante diversos compuestos químicos.^{39,162}

Agente	Efectos
Ácidos	No causa efectos en condiciones de temperatura y concentración normales
Alcohol, Álcalis	Generalmente no causa problemas a bajas concentraciones y temperatura ambiente. Altas temperaturas y concentraciones resulta perjudiciales para el material
Hidrocarburos alifáticos	Generalmente compatibles
Aminas	Causan ataque químico. Evitar
Detergentes y agentes de limpieza	Soluciones de jabón neutro son compatibles materiales fuertemente alcalinos deben ser evitados
Ésteres	Solventes parciales, causan cristalización parcial. Evitar
Aceites y grasas	Derivados de petróleo puro generalmente son compatibles, pero los aditivos usados en ellos no lo son
Hidrocarbonatos	Son solventes. Evitar
Cetonas	Son solventes. Evitar
Aceite de siliconas y grasas	Generalmente compatibles hasta 85°C algunos contienen hidrocarbonatos aromáticos que deben ser evitados
Hidrocarbonatos aromáticos	Solventes parciales. Evitar.

ANEXO E.

ESTIMACIÓN DE RECUPERACIÓN DEL POLICARBONATO POST-CONSUMO

Estimación de recuperación del policarbonato post-consumo

Año	Importación soportes ópticos	Material reciclado	\$ FOB
2008	18'074.979 U	271TON	825.962

Para el estimativo (costo/unidad) se contó con los datos reportados por la DIAN y se realizaron unos cálculos sencillos que indican lo que se podría estar percibiendo al reciclar este material.

- Son 18'074.979 unidades legalmente importadas en el año 2008:

$$18'074.979U \times \left(\frac{15g}{1Ucd} \right) = 271124685g \times \left(\frac{1Kg}{1000g} \right) \Rightarrow 271124,685Kg$$

- Si la cantidad de kilo de CDs usados se paga a 0,3 euros⁶ se tiene que:¹⁶³

$$271124,685Kg \times \left(\frac{0,3euros}{1Kg} \right) \times \left(\frac{\$2444,97}{1euro} \right) \Rightarrow 198'867.516,3$$

El éxito de esta nueva tecnología es la disponibilidad a gran escala de grandes cantidades de soportes ópticos (CDs/DVDs) desechados, logrando llegar hacer competitiva frente a la producción de polímero virgen y como contrapeso a los altos costos del petróleo y sus derivados logrando ser esta iniciativa la primera no solo regional sino latinoamericano.

⁶ 1 euro = 2.444,97 pesos. Lunes 17 de Mayo de 2010.

ANEXO F.

SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE ENVASES Y EMPAQUES

El sistema de codificación de envases plásticos, es utilizado internacionalmente, ayuda a identificar envases, botellas, contenedores y recipientes, el tipo de material plástico usado para su fabricación. Ello facilita notablemente la selección, recuperación y reciclaje de diferentes resinas y compuestos plásticos.⁸

Sistema de identificación de envases y empaques.^{8,138,164}

PET	PEAD	PVC	PEBD	PP	PS	Otros
						

1. PET (Polietileno Tereftalato o Tereftalato de Polietileno)
2. PEAD (Polietileno de alta densidad)
3. PVC (Policloruro de vinilo)
4. PEBD (Polietileno de baja densidad)
5. PP (Polipropileno)
6. PS (Poliestireno)
7. Otros (Policarbonato y mas)

ANEXO G.

PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES PARA LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN DE COBRE, NÍQUEL Y CROMO

A continuación se muestra en una tabla de datos los cálculos necesarios para realizar la preparación de las soluciones:

Tipo de sal	Masa teórica	Masa experimental	Concentración	Factor de dilución $V_1 * C_1 = V_2 * C_2$
CuSO ₄ .5H ₂ O	3,9291g	3,9296 g	1000mg/L de Cu ⁺² en 1L	20 ppm en 50mL
NiSO ₄ .6H ₂ O	4,4771 g	4,4776 g	1000mg/L de Ni ⁺² en 1L	
K ₂ CrO ₄	3,7349 g	3,7358 g	1000mg/L de Cr ⁺⁶ en 1L	

A partir del factor de dilución se elaboraron las siguientes curvas de calibración:

Curva elaborada a partir de 20 ppm Cobre, Cu⁺²

Concentración/[ppm]	Volumen/[mL]
0,12	0,3
0,2	0,5
0,4	1,0
0,6	1,5
0,8	2,0
1,0	2,5
1,2	3,0

Curva elaborada a partir de 20 ppm Cromo, Cr⁺⁶

Concentración/[ppm]	Volumen/[mL]
0,2	0,5
0,4	1,0
0,6	1,5
0,8	2,0
1,0	2,5
1,2	3,0
1,4	3,5
1,6	4,0
1,8	4,5
2,0	5,0

Curva elaborada a partir de 20 ppm Níquel, Ni⁺²

Concentración/[ppm]	Volumen/[mL]
0,2	0,5
0,4	1,0
0,6	1,5
0,8	2,0
1,0	2,5
1,6	4,0
2,0	5,0

Se utilizó agua ultra pura grado 2 durante el proceso