



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENALES

EULA-CHILE

**Implementación de nuevas secuencias de
blanqueo en pulpa de Eucalipto para maximizar el
desarrollo de la fibra y minimizar la materia
orgánica en el efluente**

Ingeniero Ambiental

Maribel Roxana Rivera Arriagada

CONCEPCION (Chile), 2012



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENALES

EULA-CHILE

Implementación de nuevas secuencias de blanqueo en pulpa de Eucalipto para maximizar el desarrollo de la fibra y minimizar la materia orgánica en el efluente

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniero Ambiental

Alumno: Maribel Roxana Rivera Arriagada
Profesor guía: Dra. Gladys Cecilia Vidal Sáez

CONCEPCION (Chile), 2012

INDICE

RESUMEN	11
1. INTRODUCCION	13
2. HIPOTESIS	18
3. OBJETIVOS	19
3.1. Objetivos generales.....	19
3.2. Objetivos específicos.....	19
4. ANTECEDENTES	20
4.1. Producción de celulosa en Chile.....	20
4.2. Propiedades de la madera.....	24
4.3. Proceso del pulpaje.....	27
4.4. Posibles impactos ambientales generados por efluentes industriales	33
4.5. Normativa Chilena aplicable al tratamiento de las aguas residuales.....	33
4.6. Blanqueo ECF.....	36
4.6.1. Primera etapa de blanqueo (D0).....	37
4.6.2. Etapa de Extracción (Eop).....	39
4.6.3. Etapa D1 y D2 (dióxido de cloro).....	40
4.7. Secuencias de blanqueo de bajo impacto, pero de alto nivel de blancura.....	41
4.7.1. Secuencia D0EopDP.....	41
4.7.2. Secuencia a pH neutro.....	42
4.7.3. Secuencia con quelantes.....	43

5. METODOLOGIA.....	45
5.1. Pulpa.....	45
5.2. Procedimiento.....	46
5.3. Métodos analíticos.....	48
6. RESULTADOS.....	51
6.1. Caracterización de la secuencia normal de blanqueo.....	51
6.2. Caracterización de las secuencias de blanqueo.....	53
6.2.1. Aporte de materia orgánica de las secuencias de blanqueo.....	53
6.2.2. Relación de la materia orgánica ver su rendimiento de las secuencias.....	55
6.2.3. Efecto de la carga química ver su materia orgánica.....	57
6.3. Aporte de color verdadero de cada secuencia de blanqueo al efluente	58
6.3.1. Aporte de color verdadero por secuencia de blanqueo y compuestos fenólicos totales.....	59
6.4. Conductividad en las secuencias de blanqueo.....	61
6.5. Consumo de químicos en cada secuencia de blanqueo.....	63
7. DISCUSION.....	64
8. CONCLUSION.....	70
9. REFERENCIA.....	71
10. ANEXO.....	

Índices de figuras

Figura 1. Producción de madera pulpable por país.....	19
Figura 2. Producción de celulosa 2010.....	20
Figura 3. Producción de celulosa en Sudamérica.....	20
Figura 4. Proceso producción de celulosa.....	26
Figura 5. Secuencia tradicional de blanqueo.....	36
Figura 6. Blanqueo con dióxido de cloro.....	37
Figura 7. Imágenes de metodología.....	44
Figura 8. Equipamiento utilizado para medir los parámetros.....	48
Figura 9. Aporte DQO, color y conductividad en cada etapa de la secuencia.	50
Figura 10. Aporte por etapa de la secuencia de blanqueo de materia orgánica en el efluente.....	53
Figura 11. Efecto secuencia de blanqueo en carga de DQO al efluente....	54
Figura 12. Relación Rendimiento V/S DQO.....	55
Figura 13. Efecto de DQO V/S carga de químicos.....	56
Figura 14. Aporte color por etapa de secuencia de blanqueo.....	57
Figura 15. Aporte de color por secuencia de blanqueo al efluente.....	58
Figura 16. Carga al efluente de compuestos fenólicos totales.....	59
Figura 17. Conductividad por etapa de secuencia de blanqueo en efluente	60
Figura 18. Conductividad de cada mezcla de efluente de las secuencias de blanqueo.....	61

Figura 19. Consumo de químicos.....	62
Figura 20. Composición de la madera	77
Figura 21. Esquema de balance de la industria de celulosa.....	79
Figura 22. Planta de tratamiento de efluentes.....	80

Índice de tablas

Tabla 1. Principales plantas de celulosa en Chile.....	21
Tabla 2. Componentes de la madera presente en las materias primas más usadas por la industria de celulosa.....	23
Tabla 3. Características físico-químicas de los efluentes secundarios de la industria celulosa.....	30
Tabla 4. Modificaciones en el proceso y su gestión ambiental.....	31
Tabla 5. Límites máximo de concentración para descargar al mar del efluente tratado. Parámetros adicionales a la tabla N°5 del D.S. N°90/2000	35
Tabla 6. Condiciones de las etapas de blanqueo.....	45
Tabla 7. Parámetros analizados.....	45
Tabla 8. Parámetros de la mezcla de la secuencia D0EpD1D2.....	51
Tabla 9. Datos de las secuencias de blanqueo DQO v/s Rendimiento.....	55
Tabla 10. Parámetros generales de cada secuencia de blanqueo.....	62
Tabla 11. Valores de reactivos químicos.....	65
Tabla 12. Especies derivadas del cloro presente en el blanqueo.....	78
Tabla 13. Consumo de agua de la industria de celulosa.....	79

NOMENCLATURA

TCF	Totalmente libre de cloro (Total Chlorine Free)
ECF	Libre de cloro elemental (Elementary Chlorine Free)
BHK	Fibra corta kraft blanqueada (Bleached Hardwood Kraft)
BSK	Fibra Larga kraft blanqueada (Bleached Softwood Kraft)
DBO5	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ClO ₂	Dióxido de Cloro
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrógeno
O ₂	Oxígeno
Do	Primera etapa de Dióxido de Cloro
D1	Segunda etapa de Dióxido de Cloro
D2	Tercera etapa de Dióxido de Cloro
Eop	Etapa de extracción alcalina reforzada con Oxígeno y Peróxido
BDT	Tonelada de pulpa totalmente seca
ADT	Tonelada de pulpa seca al aire

AGRADECIMIENTOS

A Dios por entregarme la sabiduría, la capacidad para alcanzar un sueño más en mi vida y la fuerza cada día durante estos años de esfuerzo. No ha sido fácil, pero será un avance para mi desarrollo profesional.

A mis Padres y hermano por su apoyo, comprensión durante este tiempo.

En especial a mi novio Iiro Pulkkinen por su amor, apoyo y en especial su comprensión durante este tiempo. Por ser mi acompañante en mi meta que me propuse.

A mi tutor Dra. Gladys Vidal quien me guió, orientó y entregó el conocimiento para la culminación de esta carrera.

A mi empresa Bioforest S.A. por su apoyo, comprensión y ayuda monetaria que me permitió terminar este desafío de perfeccionarme.

A Silvana Mariani, ingeniera investigadora de la empresa, quien me guio, orientó y por su buena disposición en ayudarme.

Y como no agradecer a Dios por darme la posibilidad de conocer a mis compañeros de carrera, cada uno es una historia de vida, por su simpatía, amistad, humor y apoyo.

..... Dedicado a mi familia, los cuales han estado presente cada día de mi vida con su apoyo, amor y comprensión.

“TODO LO PUEDO EN DIOS QUE ME FORTALECE”.

RESUMEN

En los últimos años, la industria de celulosa kraft ha realizado esfuerzos para disminuir sus descargas de efluentes modificando, recirculando y sustituyendo sus tecnologías de tratamiento. A pesar de la tecnología introducida tanto en el proceso de fabricación de la pulpa, como en los sistemas de tratamientos de los efluentes.

El objetivo de esta tesis es implementar nuevas secuencia de blanqueo en pulpa de Eucaliptus para maximizar el desarrollo de la fibra, es decir, obtener una pulpa de mejor calidad y obtener menor cantidad de materia orgánica en el efluente. Para la determinación de esto, realizaron cinco secuencias de blanqueo, La primera consistió en una secuencia referencial ($D_0EpD_1D_2$) la que se utiliza en la industria, las cuatro secuencias restantes se utilizaron condiciones de operación diferentes y la utilización de reactivos específicos (dióxido de cloro, quelantes, peróxido de hidrógeno y buffers). El objetivo en todas las secuencias es que la pulpa alcance una blancura mayor a 90% ISO. Con este fin se utilizó quelantes en la etapa Ep ($DoQEpDP$), peróxido de Hidrógeno al final de la secuencia ($DoEpDP$), una etapa Dhot ($DhotEpD_1P$) y para finalizar una secuencia con una etapa de D_2 a pH neutro ($DoEopD_1Dn$).

En cada secuencia se cambió una etapa o condición de blanqueo, para observar como variaba la calidad de la fibra (viscosidad, blancura, reversión) y los parámetros del efluente (pH, DQO, color verdadero, conductividad y compuestos fenólicos totales), un parámetro importante de esta tesis es la cantidad de materia orgánica del efluente.

En base a los resultados obtenidos en el estudio de la calidad de la pulpa y la cantidad de materia orgánica en el efluente, se determinó que la secuencia de blanqueo D_0EpD_1P es la más indicada para maximizar la calidad de la pulpa y disminución de la cantidad de DQO en el efluente.

Al realizar la comparación con la secuencia tradicional que se utiliza hoy en día se observa que la secuencia de blanqueo D₀EpD₁P tiene diferencias significativas en calidad, mejor viscosidad, blancura, reversión y es una secuencia más económica, ya que se utiliza peróxido de hidrogeno en la última etapa, el cual es más barato que el dióxido de cloro.

Referente a los efluentes se determinó que la secuencia de D₀EpD₁P es una de las secuencias que aporta menos DQO, Color, Compuestos fenólicos totales.

Basados en los resultados se determinó que la secuencia D₀EpD₁P puede ser implementada en la industria de celulosa obteniendo mejor calidad de la pulpa y menos impacto al medio ambiente según los parámetros estudiados en esta tesis.

1. INTRODUCCION

La producción mundial de celulosa en el 2010 alcanzada por región son; Europa con 27%, Asia 12%, África/Oceanía 2%, N. América 32% y Latinoamérica 27%. Chile posee aproximadamente el 8% de la capacidad instalada de producción de celulosa a nivel mundial, y el 29% de la capacidad instalada en Latinoamérica.

Durante el año 2009, el 35% de la producción total forestal chilena fue dirigida hacia la producción de celulosa Kraft blanqueada equivalente a 4,8 millones de toneladas de pulpa (Chiang *et al.*, 2010). Se estima que hacia el 2015 la producción de celulosa en Chile será cercana a los 5,15 millones de toneladas, posicionando al país como el cuarto mayor productor de pulpa del mercado (CORMA, 2010).

Las condiciones climáticas, pluviométricas y el tipo de suelo, favorecen el desarrollo y crecimiento de variadas especies forestales, principalmente *Pinus radiata*, *eucalipto globulus* y *eucalipto nitens*, que equivalen a un 45% de la superficie total del país apta para esta actividad (Papelnat, 2012).

En Chile, alrededor del 35% de la producción forestal se emplea en la industria de celulosa kraft, siendo de las principales regiones que sustenta esta producción, la Región del Biobío (41%).

Actualmente, la industria de forestal y en particular la industria de la celulosa kraft blanqueada busca la sustentabilidad en todo su ciclo de vida. Esto significa una explotación sostenible de la madera, pero también, un uso equilibrado del ecosistema forestal, sin producir daños a la productividad del suelo, ni a la biodiversidad.

La madera utilizada en el proceso de celulosa, se basa en dos especies a nivel mundial, las que son *Pinus radiata* y *Eucalipto globulus*. Durante los últimos años, la proporción de Latifoliadas (fibra corta) ha experimentado un aumento llegando al 46% de la producción total. Esto se explica por un aumento en la producción de rollizos provenientes de eucaliptus (CORMA, 2010).

La celulosa de fibra corta está presente en muchos productos de uso cotidiano. Obteniendo de ello papel para impresión y escritura, papeles de uso doméstico y principalmente papel tissue.

Las plantas de celulosa aumentan cada vez más en tamaño y capacidad de producción, lo que conlleva un crecimiento en los impactos de su proceso industrial, que de por sí representa riesgos ambientales. El impacto sobre el medio ambiente de la fabricación de celulosa depende de muchos factores, como la materia prima, el método de obtención de celulosa a partir de madera (kraft, sulfito, métodos mecánicos), el proceso de blanqueo de la pulpa (cloro gas, dióxido de cloro, oxígeno, ozono, soda cáustica, peróxido de hidrógeno, tratamientos enzimáticos), los sistemas de depuración que tengan instalados o la ubicación de las fábricas y las necesidades de transporte.

Una de sus tantas preocupaciones es que la producción de celulosa sea amigable con el medio ambiente, buscando solución al gran consumo de agua y reactivos químicos para la conversión de la madera en productos finales.

Por esto es de gran importancia el estudio de los efluentes de las distintas etapas de producción de celulosa, prestando especial interés a los efluentes de blanqueo.

La composición química de la madera está formada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. El porcentaje que cada uno de estos constituyentes ocupa dentro de la madera depende del tipo de materia prima utilizada.

En el caso del pino la proporción de celulosa y lignina corresponde a 57,8% y 27,4% y en eucalipto es de 57,6% y 25,1%, el resto de los constituyentes corresponden a resinas y otras azúcares (Vignate y Martínez, 2006).

El proceso de producción de carácter químico etapa en la que se separan las fibras de celulosa de los otros componentes de la madera (lignina, terpenoides extraíbles y ácidos resínicos, entre otros), se denomina pulpaje, luego de lo cual las fibras pasan a una secuencia de blanqueo en la que se remueve la lignina residual que le da color a la pulpa (Mc Master *et al.* 2003). Este proceso es más eficiente en la remoción de compuestos no-celulósicos (90-95% de lignina) y por lo tanto, los que más se utiliza.

En particular, el proceso químico que emplea sulfato (denominado kraft) es el que más se usa ya que puede aplicarse a diferentes tipos de madera. (Mc Master *et al.*, 2003).

La industria de celulosa kraft, que corresponde al 92% de la producción en Chile, se basa en dos procesos principales: pulpaje y blanqueo, para el proceso de pulpaje, las astillas son cocidas en una solución alcalina de sulfuro de sodio (Na_2S) e hidróxido de sodio (NaOH) para extraerles la lignina; estos compuestos químicos son posteriormente recuperado para su reutilización, después de esta etapa conocida como digestión, se genera la pasta de celulosa y un residuo denominado licor negro (Pokhrel y Viraraghavan, 2004).

Actualmente, el licor negro es recuperado y forma parte en el sistema de recuperación de productos químicos y energía, pero existe una parte de este filtrado que permanece entre las fibras y es arrastrado a los procesos de lavado y blanqueo.

Algunos procesos industriales han incorporado un paso previo al blanqueo, que consiste en una etapa de deslignificación prolongada con oxígeno.

En los últimos 20 años, con la aparición de los métodos TCF (Totalmente libre de cloro) y ECF (Libre de cloro elemental), las plantas de celulosa han logrado reducir considerablemente la contaminación en sus desechos, al punto de que hoy en día contaminan en niveles similares que cualquier otro tipo de industria.

Los procesos de blanqueo están dirigidos hacia la mejora del color y al grado de pureza de la pulpa de celulosa, esto se logra mediante la eliminación de lignina o bien su oxidación, productos que se encuentran posteriormente en los residuos líquidos, los cuales dependerán directamente del tipo de agente blanqueante y de la materia prima empleada (Xavier y Vidal, 2003).

Como todo proceso productivo, la producción de celulosa genera a su vez compuestos que pueden alterar el medio ambiente debido a la presencia en la madera de compuestos orgánicos complejos distintos a la celulosa (lignina, extractivos de la madera), la utilización de elevados volúmenes de agua (30 m³) y de energía (60 toneladas de gas natural), e insumos químicos (140 kg), que provocan la generación de residuos líquidos cuya descarga directa puede alterar las condiciones iniciales de los cuerpos de agua (Seoanez, 1995; Zaror, 2007; CORMA, 2009; Ciputra *et al.*, 2010; Chun-Yan Yin, 2010).

Finalmente los efluentes líquidos provenientes tanto del proceso de pulpaje como blanqueo contienen altos contenidos de sólidos suspendidos, carga orgánica, color y toxicidad (Thompson *et al.*, 2001), Además, tanto en procesos ECF como TCF se ha detectado una serie de compuestos derivados de hormonas vegetales (fitoesteroles) o productos de la degradación de componentes no-celulósicos de la madera (principalmente lignina, terpenos y ácidos resínicos) (Mc Master *et al.* 2006). Los cuales presentan distintas características fisicoquímicas que dependen de la materia prima, tecnología y procesos utilizados.

Se han implementado optimizaciones al proceso kraft tendientes a reducir los impactos de la carga orgánica de los efluentes.

Es así como se han diseñado sistemas de recirculación de agua y recuperación de compuestos químicos, como también modificaciones en la etapa de digestión y cambio en los procesos de blanqueo con cloro como agente oxidante, por procesos libre de cloro (Xavier y Vidal, 2003; Pokhrel y Viraraghavan, 2004).

En la industria de celulosa es ampliamente conocida la tecnología de tratamientos primario y secundario, el primero se basa en la eliminación de sólidos suspendidos, además de neutralizar pH, enfriar y homogeneizar el efluente (Metcalf y Eddy, 1995).

El tratamiento secundario es un tratamiento biológico, ya sea bajo condiciones aeróbicas y/o anaeróbicas que consiste en la degradación de la materia orgánica mediante el uso de microorganismos los que requieren de una fuente de carbono y nutrientes para su crecimiento (Slade *et al.*, 2004; Gerardi, 2006), muchos de los cuales involucra consumo de oxígeno.

El tratamiento biológico logra eficiencias de eliminación de carga orgánica biodegradable DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días) entre 65-99% y una reducción en la DQO (Demanda Química de Oxígeno) entre 25-65% (Diez y col., 2002).

Una de las principales cuencas receptoras de efluentes provenientes de la industria de celulosa kraft, corresponde a la cuenca del Río Bio Bio. Dicha cuenca sustenta entre el 32-35% de la producción nacional de celulosa (Xavier, 2006; Belmonte *et al.*, 2006), y es en éste ecosistema acuático donde se han evidenciado y registrado problemas ambientales que van desde la pérdida de calidad del agua hasta efectos sobre organismos acuáticos (Orrego *et al.*, 2005; 2006).

Estos efectos ambientales están asociados principalmente a las características físico-químicas que presentan este tipo de efluentes, específicamente al contenido de materia orgánica compleja, expresada como Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) y la presencia de color en el efluente. Estas características se deben a la presencia de fragmentos lignínicos y extractivos de la madera los que separados de la celulosa, son eliminados durante el proceso productivo (Yadav y Garg, 2011).

2- HIPOTESIS

El consumo de reactivo en las etapas de blanqueo, influye en la calidad de la pulpa de eucalipto y en el contenido de materia orgánica de los efluentes generados.

3.- OBJETIVOS

3.1- Objetivo general

Implementar nuevas secuencias de blanqueo en pulpa de eucaliptus, para maximizar la calidad de la pulpa y minimizar el contenido de materia orgánica en el efluente.

3.2- Objetivos específicos

3.2.1- Optimizar el consumo de reactivo en las etapas de blanqueo, a partir de las secuencias actuales de blanqueo y evaluar la calidad de la pulpa obtenida.

3.2.2- Evaluar los efluentes obtenidos de las etapas optimizadas de blanqueo considerando el contenido de materia orgánica.

3.2.3- Evaluar las características de los efluentes obtenidos de la secuencia optimizada y compararlo con los procesos tradicionales.

4- ANTECEDENTES

4.1.- Producción de Celulosa en Chile

La producción de Madera Pulpable creció 26,8 % desde 1996 a 2006, diez países producen el 74% del total mundial. USA es el mayor productor de madera pulpable, produciendo un 28% del total mundial en el año 2009 (CORMA, 2005).

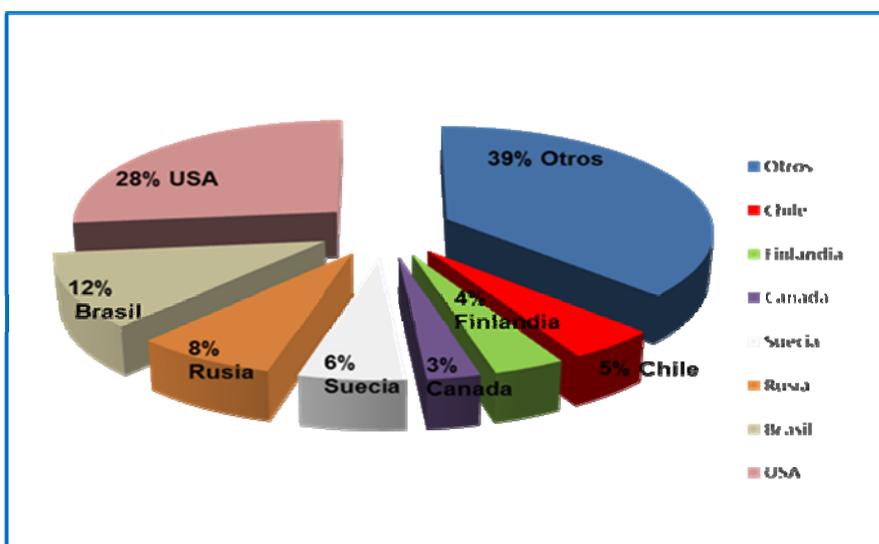


Figura 1. Producción de madera pulpable por país

Fuente: FAO 2010

La producción mundial de celulosa en el 2010 alcanzada por región son; Europa con 27%, Asia 12%, África/Oceanía 2%, N. América 32% y Latinoamérica 27%. Encontrándose Chile como el cuarto productor de celulosa de mercado.

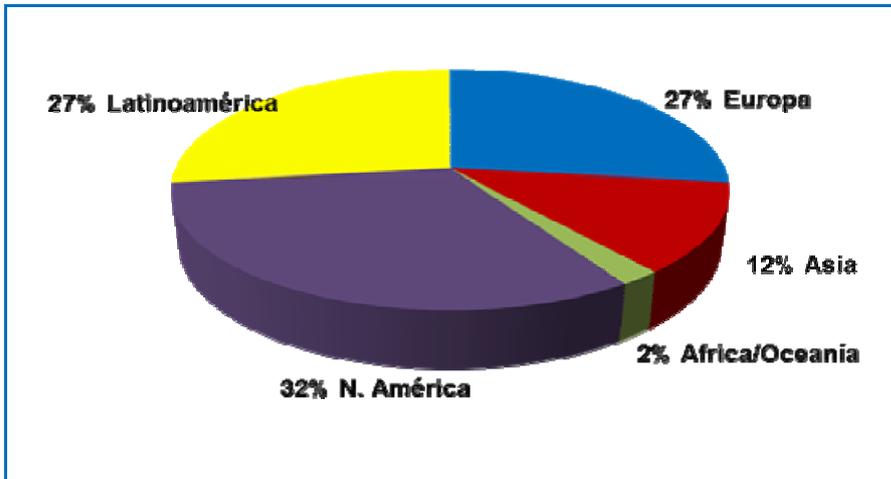


Figura 2 Producción de celulosa 2010

Fuente: H&W July 2010

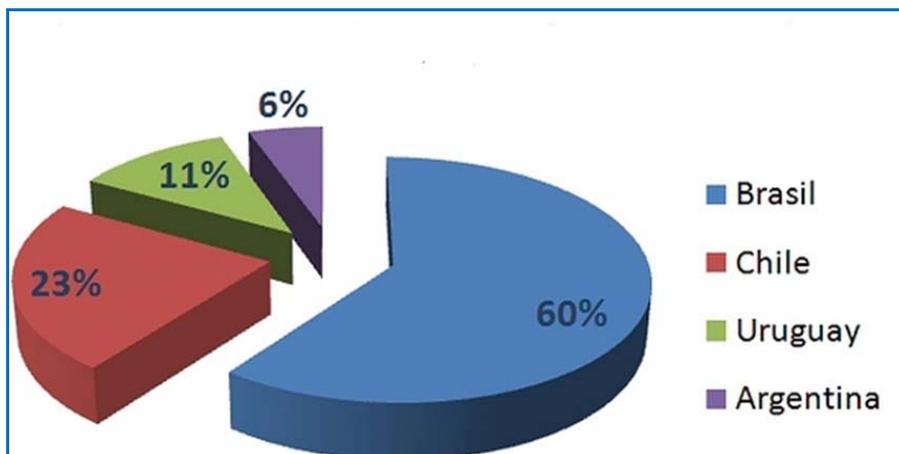


Figura 3. Producción de celulosa en Sudamérica

Hacia el 2015 la producción de celulosa en Chile será cercana a los 5,15 millones de toneladas aproximadamente el 8% de la capacidad instalada de producción de celulosa a nivel mundial. Se estima que Chile también será uno de los principales productores de celulosa a nivel internacional, ocupando el tercer lugar de las exportaciones nacionales.

La producción de celulosa, es la base de la actividad forestal a nivel nacional, representando una actividad económica del 3% del producto interno bruto (PIB) (Venegas, 2003), destacando que es el tercer país que exporta celulosa BHK (fibra corta kraft blanqueada) y cuarto en BSK (fibra Larga kraft blanqueada). Sus empresas Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones (CMPC) y Celulosa Arauco y Constitución S.A. (CELCO), las cuales distribuyen a lo largo del país, 9 plantas operantes de dicha industria, como se observa en la **Tabla 1** (Vidal *et al.*, 2007; Chiang *et al.*, 2010). Localizadas entre la Región del Maule (VII) y de la Araucanía (IX), destacándose la Región del Biobío (VIII), con una producción nacional entre un 41% del total (Xavier, 2006; Belmonte *et al.*, 2006; Chiang *et al.*, 2010).

Tabla 1 Principales plantas de Celulosa en Chile

Planta	Región	Empresa	Proceso	Producción (miles ton/Año)	Cuerpo Receptor
Contitución	VII	CELCO	kraft/SB	350	Pacifico
Laja	VIII	CMPC	kraft/ECF	340	Bio Bio
Arauco I	VIII	CELCO	kraft/ECF	260	Pacifico
Santa Fé	VIII	CMPC	kraft/ECF	1160	Bio Bio
Pacifico	IX	CMPC	kraft/ECF	500	Bio Bio
Arauco II	VIII	CELCO	kraft/ECF	495	Pacifico
Licancel	VII	CELCO	kraft/ECF	145	Rio Mataquito
Valdivia	XIV	CELCO	kraft/ECF	685	Rio Cruces
Nueva Aldea	VIII	CELCO	kraft/ECF	856	Rio Itata

SB: Sin Blanqueo; ECF: Libre de Cloro Elemental. Fuente: Vidal *et al.* (2007); Chiang *et al.* (2010).

Los productos fabricados a partir de la celulosa, como el papel, los cartones y cartulinas, son parte integral de nuestra vida diaria. En el futuro, no se prevé que aparezcan substitutos. Tienen la ventaja de ser fabricados a partir de un recurso renovable: el bosque, en especial las plantaciones de *Pinus radiata* (fibra larga) y *Eucaliptus* (fibra corta).

En los últimos años se ha incrementado la producción de celulosa de fibra corta, debido fundamentalmente al rápido crecimiento que presenta el eucalipto. Que corresponde a la mitad del tiempo en que el pino alcanza la madurez (Videla *et al.*, 2003). Para producir 1 tonelada de celulosa de fibra larga se requieren 5 a 6 metros cúbicos de pino radiata y para producir 1 tonelada de celulosa de fibra corta, se requieren 3 a 4 metros cúbicos de eucalipto (CORMA, 2005).

Esta industria comenzó su desarrollo hace 50 años, en base al pino radiata. No obstante, en los últimos años se ha incorporado en forma creciente la madera de eucalipto como materia prima para la fabricación de celulosa. Desde el punto de vista de la demanda, la celulosa de eucalipto reúne una serie de atributos que la transforman en la materia prima ideal para la producción de papeles tissue de alta calidad y papeles finos para impresión y escritura. Estos mismos atributos hacen que la celulosa de eucalipto se incorpore también en la producción de cartulina, la cual se utiliza para la fabricación de envases de productos de consumo masivo.

Desde el punto de vista de la oferta, la superficie plantada con bosques de eucalipto se ha expandido a una tasa de un 10% anual en los últimos 10 años, fundamentalmente porque tienen una rotación menor que las plantaciones de pino, alcanzando la edad de cosecha entre los 12-18 años. La industria de la celulosa, sustentada en un recurso natural renovable, posicionó a este producto como el segundo en importancia, representando un 3,8% del valor total de las exportaciones chilenas.

4.2.- Propiedades de la madera

Materia prima, Alrededor del 99,5% de la pulpa y papel se obtiene a partir de fibra natural. La madera es lejos el principal insumo en la producción de celulosa, representando alrededor del 50% del costo total del producto. Los árboles utilizados para producir celulosa se clasifican en dos grandes grupos dependiendo de las características de su madera: Las coníferas o árboles de fibra larga (Softwood) y las latifoliadas, o árboles con maderas de fibra corta (Hardwood).

La diferencia fundamental entre ambas está dada por: sus propiedades físicas y anatómicas (densidad, longitud de la fibra) y sus propiedades químicas las cuales varían en los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina con que está constituida cada tipo de madera, tal como lo indica el **Tabla 2**. Las dos especies de eucaliptus más conocida y utilizada en Chile son nitens y globulus, ubicadas principalmente desde la VII a la X Región (CERTFOR, 2005).

Tabla 2 Componentes de la madera presente en las materias primas más usadas por la industria de celulosa

Componentes de la madera	Eucalipto (%)	Pino (%)
Celulosa	42-46	43-50
Hemicelulosa	35	25
Lignina	17-26	25-31
Compuestos Extraíbles	0,2-3,5	0,5-7,0

Fuente: Oñate (2006); La Fleur (1996).

- **Celulosa:** Es el principal componente de las paredes celulares de los árboles y otras plantas. Desde el punto de vista bioquímico, la celulosa ($C_6H_{10}O_5$), es un polímero natural, constituido por una larga cadena de carbohidratos polisacáridos de alto peso molecular. La estructura de la celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa a través de enlaces β -1,4-glucosídico, lo que hace que sea insoluble en agua.
- **Hemicelulosa:** Las poliosas son heteropolisacáridos de alta masa molar, que se encuentran constituidos por diferentes unidades de monosacáridos: pentosas, hexosas y ácido urónicos, enlazados entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y en general amorfas. La función de las hemicelulosas en la madera parece ser de intermediario entre la celulosa y la lignina, tal vez facilitando la incrustación de las microfibrillas. Las hemicelulosas son importantes en la fabricación de pulpa, ya que aumenta su rendimiento y aumentan la resistencia del papel.
- **Lignina:** Es una estructura mucho más compleja de alto peso molecular, Forma parte de la lamina media que limita las fibras, y actúa como cementante entre las fibras. Polímero heterogéneo, hidrófobo, incoloro, tridimensional, formado por unidades fenol propano. Las ligninas son polímeros insolubles en ácidos y solubles en álcalis fuertes como el hidróxido de sodio.

El contenido de lignina en eucalipto disminuye con la altura y es mayor en el duramen. Además poseen menor cantidad de lignina, cuya reactividad es función del tipo de lignina. Mientras mayor es la razón Siringilo/Guayacilo más fácil blanquear.

- **Componentes Extraíbles:** Además de celulosa, hemicelulosas y lignina, los árboles contienen otras sustancias en menor proporción, que no entran en la composición de las paredes celulares. Químicamente están compuestos por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, terpenos, fenoles, ácidos grasos y resinosos, resinas, grasas, esterinas, aceites esenciales y otros Ejemplos de Extraíbles.

Dependiendo de su estructura química son solubles en diversos solventes como: agua fría, agua caliente, alcohol, acetona, éter, benceno, tolueno, etc. Tiene propiedades de la madera: color, olor, flamabilidad. Tiene efectos para la transformación de la madera a productos elaborados: aumento consumo de reactivos. Aumento en corrosión de equipos. Coloraciones no deseadas en los productos.

En relación a los compuestos fenólicos presentes en la madera, estos actúan como fitoalexinas, es decir, en respuesta a posibles ataques fúngicos o bacterianos, y contribuyen a la pigmentación de la madera. Estos compuestos al ser oxidados, dan lugar a las quinonas, produciendo el indeseable color pardo característico para este tipo de efluente (Gimeno, 2004; Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

4.3.- Proceso del pulpaje

El proceso de producción de la celulosa consta de varias etapas, las que corresponden a preparación de la madera, pulpaje o digestión, deslignificación, y blanqueo, hasta llegar al producto final **Figura 4**.

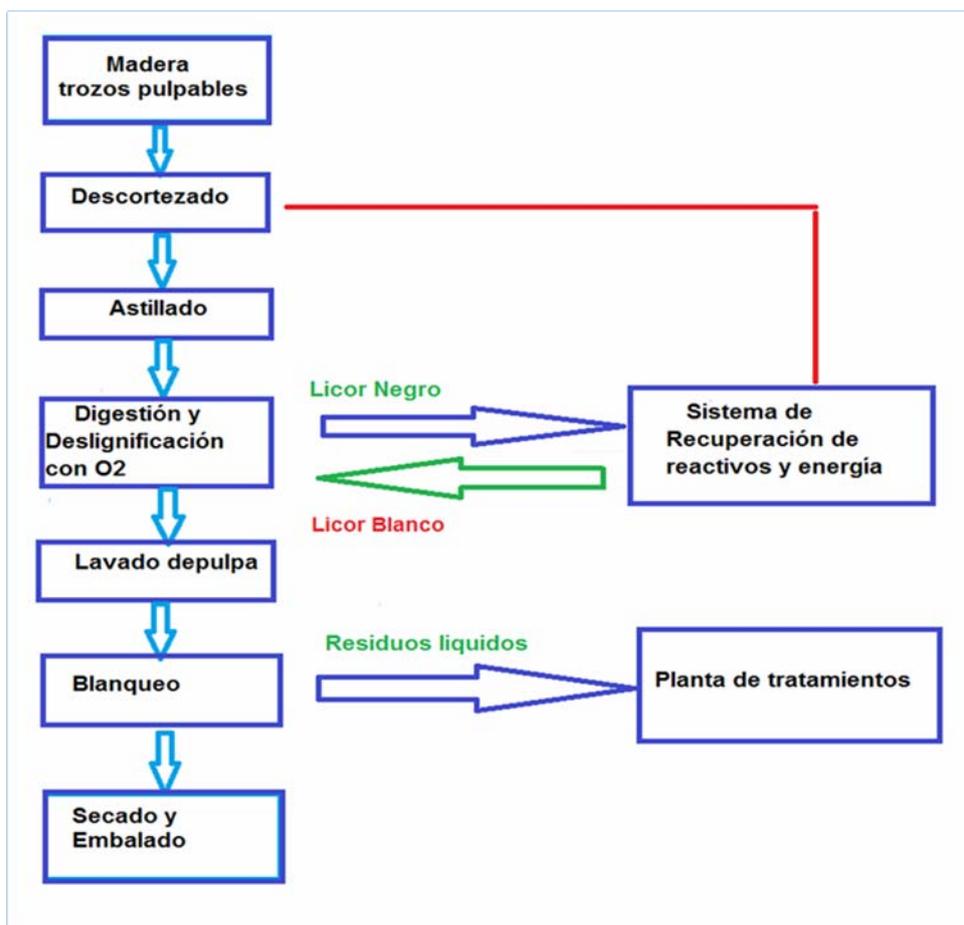


Figura 4. Proceso productivo de Celulosa

Fuente: Chamorro, (2011)

- **Preparación de la madera**, el proceso de preparación de la madera, abarca desde el momento en que la materia prima llega a la industria (Arauco 2010), es una de las etapas más importante previo a la cocción es acondicionar la madera: descortezar, astillar y clasificar (David, 2000). Las astillas deben ser uniforme, para que exista una Cocción uniforme. Tamaño ideal de astilla para difusión uniforme: 15-25mm (largo) x 20mm (ancho) x 3-5mm (espesor).

Otros parámetros importantes:

Baja humedad en astilla afecta difusión de licor, bajo rendimiento de cocción, alto rechazo. Iones inorgánicos como calcio y potasio favorecen la formación de incrustaciones, mientras que metales como el hierro, cobre y manganeso descomponen reactivos de blanqueo y favorece la reversión de pulpa. La madera de compresión o nudos disminuye rendimiento, aumenta el rechazo y el consumo de álcali en cocción. Además la cocción es poco uniforme.

- **Cocción kraft**, La etapa de cocción de las astillas en el digestor, ocurre en presencia de licor blanco (una mezcla de NaOH y Na₂S), temperatura, dependiendo de la especie de madera la temperatura varia en 155-175 °C y presión, lo que permite disolver gran parte de la lignina que une a las fibras de la madera (Zaror, 2002). De este proceso, se genera licor negro (licor blanco, lignina removida, extraíbles y carbohidratos) el cual debe ser tratado para su recirculación al proceso, lo que recibe el nombre de recuperación química, en donde se generan residuos inorgánicos (Zambrano, 2007).

- **Lavado y Deslignificación**, El lavado de la pulpa cruda tiene como objetivo la remoción del licor negro, por lo cual se hace ingresar agua al sistema generando así un residuo líquido que contiene agua y restos de lignina.

Posteriormente se realiza la deslignificación, en esta etapa se agrega en algunos casos oxígeno con el mismo objetivo anterior, disminuir la lignina presente en las paredes de las fibras, pero con menor daño a las cadenas de celulosa, hemicelulosa que en la cocción antes de pasar a la etapa blanqueo. (Arauco, 2010; Davis, 2000).

- **Secuencias de Blanqueo**, proceso químico aplicado a pulpa café para aumentar su blancura, busca eliminar compuestos coloreados (carbonilos, extraíbles de la madera, ácidos resínicos, ácidos grasos, polifenoles) o transformarlos de cromóforos a leucocromóforos.

Se utiliza dióxido de cloro (Zaror, 2002), produciéndose efluentes que son dirigidos a la planta de tratamiento, en donde son tratados para su posterior vertido.

Parámetros en etapa de blanqueo: Carga de agentes blanqueante, Concentración del agente blanqueante, Consistencia, Tiempo de reacción, Temperatura de reacción, pH de reacción o pH final, Presión de reacción y Eficiencia de lavado entre etapas. La secuencia de blanqueo y el consumo de reactivos para alcanzar una blancura dada depende del tipo de madera, del nivel de cocción (número de kappa) y de la reactividad de la lignina remanente presente en la pulpa (instructivo Celulosa Arauco, 2008). Una utilización óptima de los reactivos tiene un efecto positivo en la mantención de la calidad de la fibra y la generación de filtrados con menor toxicidad a tratamiento de efluentes.

- **Secado y disposición final**, La pulpa ya blanqueada es secada mediante flujo de aire caliente, al cual se le eleva la temperatura con adición de vapor, para su posterior embalado en correas con dimensiones específicas, almacenado y venta.

Sin embargo, se debe mencionar, que la generación de energía utilizada durante el proceso productivo, es producida mediante generadores, caldera de recuperación con la quema del licor negro y gracias a los vapores provenientes de la caldera de biomasa, lugar donde se procede a la incineración de residuos orgánicos, como las cortezas y la mezcla de lodos de tratamiento de efluentes, los cuales en su reducción forman cenizas. Actualmente éstas se disponen en vertederos.

- **Generación residuos industriales líquidos (RILES)**, Con respecto a los residuos líquidos vertidos a cuerpos de agua por la industria de celulosa kraft, estos se caracterizan por presentar un contenido de carga orgánica, debido a fragmentos de compuestos lignínicos, compuestos azufrados, compuestos extractivos, provenientes principalmente de la madera.

Para determinar la calidad del agua y las alteraciones ambientales que causan estos residuos del tipo físico, químico y biológico sobre los cuerpos de agua se han establecidos ciertos indicadores físicos (color, turbidez, conductividad eléctrica y temperatura); indicadores químicos (pH, potencial óxido-reducción y dureza) e indicadores de la contaminación orgánica (COT: Carbono Orgánico Total; DBO₅: Demanda Biológica de Oxígeno; DQO: Demanda Química de Oxígeno, etc.), (Seoanez, 1995). Los residuos líquidos son uno de los principales aspectos ambientales de la producción de celulosa, el cual se genera en diversas etapas, siendo el más importante aquel generado en la etapa de blanqueado (Luraschi, 2007; Terram, 2012). Esto es debido por la composición de los químicos utilizados mencionados anteriormente, para obtener el blanqueo requerido por la norma ISO-2470.

Un prolífico acceso a los mercados internacionales, pasa actualmente por cumplir exigencias medioambientales, las industrias de celulosa firman el primer Acuerdo Nacional de Producción Limpia suscrito en Chile, en mayo de 1999, donde incorporan a su gestión ambiental mejorar la calidad de los residuos, utilizando tecnologías de tratamiento para los RILES.

Dentro de los cuales se encuentran los tratamientos primarios (clarificadores gravitacionales) para la separación de sólidos suspendidos, principalmente fibra; tratamientos secundarios (lagunas aeróbicas, reactores de lodos activados) dirigidos a disminuir la materia orgánica presente en los efluentes y tratamientos terciarios para abatir el color, los que han sido incorporados en los últimos dos proyectos correspondientes a plantas Valdivia y CFI-Nueva Aldea.

Tabla 3 Características Físico- químicas de los efluentes secundarios de la industria Celulosa (modificado de Chamorro *et al.*, 2010b)

Parámetros (unidades)	P. Radiata	E. Globulus
pH	7,2±0,2	7,1± 0,1
DQO (mg/L)	213,7± 8,3	135,5± 3,7
DBO5 (mg/L)	34,0± 11,0	25,0± 2,8
Fenoles Totales (mg/L)	204,2± 17,0	177,0± 3,1
Color (1x1 cm)	0,2± 0,3	0,2±0,1
Amonio (N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,5±0,3	0,4±0,2
Nitrógeno total (mg/L)	1,7±0,1	1,1±0,1
Fosforo total (P-PO ₄ ^{- 3})	0,8±0,3	0,5±0,1

Además de realizar monitoreo a los RILES, en conformidad con regulaciones para las emisiones líquidas a cuerpos de aguas superficiales (D.S.90/2000), a partir del 2000, también se aplica la normativa de emisión para olores molestos (gases TRS), entre otras disposiciones que incluyen sólidos, líquidos y gases. Todo esto con el objetivo de asegurar pleno resguardo ambiental, **Tabla 4** (Videla, *et al.*, 2003)

Tabla 4 Modificaciones en el proceso y su gestión ambiental

ITEM	OBJETIVOS	MODIFICACIONES
Proceso	Mejoramiento	Modificación en el proceso de cocción Deslignificación con oxígeno (1y2 etapas)
	Reduccion de compuestos clorados	Tecnologías ECF (Elemental Chlorine Free)
	Disminucion consumo agua	Antes 1990: 120-140 m /ADT; 1990: 60 m /ADT 2000: 40m /ADT;Futuro inmediato: Ajuste a (BAT) alrededor 30m /ADT
Tratamiento	Residuos líquidos	1990: Tratamiento primario y secundario 000: Tratamiento Primario, secundario y terciario
	Residuos sólidos	1990: Disposición en vertederos residuos orgánicos e inorgánicos 2000: Vertederos industriales controlados para inorgánicos
	Residuos gaseosos	1990: utilización de filtros 2000: Incineradores para reducir los TRS, de gases no condensables
Gestión Ambiental	Certificaciones	1990: ISO 9000 Control de calidad del proceso 2000: ISO 14000 Sistemas de gestión OHSAS 18001 Seguridad y salud ocupacional
	Acciones de control	Auditorias ambientales, internas y externas monitoreos de calidad de agua (superficial y subterráneas), Riles, gases; internos y externos
		Nuevas normas de calidad ambiental
		Remediación de sitios contaminados Publicación y comunicación

4.4- Posibles impactos ambientales generados por efluentes industriales

El aumento de la actividad productiva de la industria de celulosa puede generar impactos tanto en los suelos destinados a plantaciones forestales, efluentes líquidos (Panario *et al.*, 2006). Por esto la industria ha desarrollado distintos tratamientos, con el fin de evitar la generación de un impacto ambiental al cuerpo receptor.

Las descargas de los efluentes residuales debido a su carga orgánica pueden generar efectos en el sistema acuático (Ham *et al.*, 2006), es decir, pueden aumentar su concentración progresivamente a lo largo de las cadenas alimenticias afectando tanto a nivel individual como poblacional (Chamorro, 2011).

Los efluentes de las plantas de celulosa pueden producir, en caso de no poseer un tratamiento adecuado dos efectos en cuerpos de agua que presenten poblaciones de peces, aumenta la producción primaria lo que se refleja en cambios desfavorables en el factor de condición de los peces y la disminución de la concentración de oxígeno debido al aporte de materia orgánica al ser vertidos al cuerpo receptor.

4.5- Normativa chilena aplicable al tratamiento de las aguas residuales

La industria de celulosa kraft en Chile, desde 1994 ha tenido que enfrentar grandes desafíos relacionados con cumplir la legislación ambiental vigente y modificar su proceso productivo, aplicando nuevas tecnologías con el objetivo de mejorar su eficiencia y calidad del producto como es el cambio en etapa de blanqueo a ECF o TCF), minimizando los residuos, con la finalidad de reducir los impactos ambientales, e incorporar el concepto de gestión ambiental y sustentabilidad, para acceder a nuevos mercados y exigencias, por lo cual, se ha visto en la necesidad de certificar sus procesos y productos, la gestión ambiental, además de la seguridad y salud ocupacional de los trabajadores (ISO 9000, ISO 14001, OHSAS 18001) (Vidal *et al.*, 2007).

El año 1916 se dictó la Ley N° 3.133 sobre la Neutralización de los Residuos Provenientes de Establecimientos Industriales. El año 2002 se publica la Ley N° 19821 la cual deroga la Ley N° 3.133 y modifica la Ley N° 18.902 en materia en residuos industriales. (BCN, 2012).

En el año 1998 se establece el decreto supremo 609, el cual estipula que las aguas residuales industriales que descargan a redes de alcantarillado que cuentan con sistema de tratamiento, deben ser tratadas antes de vertirse a éste, estableciendo un plazo de un año para su cumplimiento (MOP, 1998), con la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a sistemas de alcantarillado.

Durante el año 2000, se publicó el Decreto Supremo N° 90 (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2001), que establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

La cual determina límites máximos para diversos contaminantes en función del cuerpo receptor.

La norma clasifica 5 tipos de receptores, para los cuales establece valores máximos, que las descargas líquidas deberán cumplir: Los cuerpos de agua fluviales, sin capacidad de dilución; los cuerpos de agua fluviales, con capacidad de dilución; los cuerpos lacustres; los cuerpos marinos que están dentro de la zona de protección litoral; los cuerpos marinos que están fuera de la zona de protección litoral (BCN, 2012). Sin embargo, esta normativa no establece límites relacionados a los parámetros de DQO y Color en efluentes secundarios, los cuales son descargados al mar.

También a partir del 2000, aplicar la normativa de emisión para olores molestos (gases TRS), que incluyen sólidos, líquidos y gases (Vidal *et al.*, 2007).

Por ejemplo el diseño del proyecto de ampliación de Celulosa Planta Horcones se ha comprometido según el proyecto que entrego en el SEIA con tratar con un tratamiento primario y secundario. Luego, previo control de parámetros, los efluentes líquidos tratados, serán descargados al mar a través del sistema de evacuación, compuesto por una cámara de carga, emisario y difusores.

Dicha descarga se realizará fuera de la Zona de Protección Litoral (ZPL) calculada según las disposiciones de la D.S. N°90/00 MINSEGPRES y establecida en 249,5 m mediante ORD. 12.600/20 del 10 de enero de 2003 de la D.G.T.M. y M.M.

La calidad del efluente cumplirá con los límites establecidos en la Tabla N° 5 del Decreto Supremo N° 90/2000, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, que establece la “Norma de Emisión que Regula los Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales”.

Cabe indicar que la Tabla 5 establece los límites máximos de concentración para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la Zona de Protección Litoral, Por su parte, y aun cuando el D.S. N°90/00 no consideró ambientalmente relevante establecer límites específicos para los parámetros coliformes fecales, DBO₅, DQO, Nitrógeno Total Kjeldahl, Fósforo, AOX y color verdadero para las descargas que se efectúen fuera de la Zona de Protección Litoral.

El Proyecto, además de dar cumplimiento a los límites de la Tabla 5, se ha propuesto voluntariamente asumir como criterio el cumplimiento de los valores señalados en la dicha Tabla (SEIA).

Tabla 5. Límites Máximo de concentración para descargar al mar del efluente tratado. Parámetros adicionales a la tabla 5 del D.S. N°90/2000

Parámetro	Unidad	Expresión	Límite
Coliforme Fecales o Termotolerantes	NMP/100 mL	Coli/100 mL	1000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg O ₂ /l	DBO ₅	60
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	560
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NTK	50
Fósforo	mg/L	P	5
Halógenos adsorbibles	mg/L	AOX	10,7
Color Verdadero	mg/L	Color	1120

4.6- Blanqueo ECF

El blanqueo ECF es dominante, pero existen diversas variaciones en la forma de practicar este blanqueo a la pulpa kraft de eucaliptus. La secuencia del tipo D(Eop)DD parece predominar **Figura 5**. Pero existen variaciones, especialmente en las formas de aplicar el dióxido de cloro y peróxido de hidrógeno. En las plantas de blanqueo más antiguas, la primera etapa con cloro se ha remplazado por dióxido de cloro u ozono. En el caso del ozono, este reemplazo ha sido total (Z/E) o parcial (Z/D). En algunos casos, la etapa D2 ha sido remplazada por una etapa-P final. Las plantas más modernas han incorporado el dióxido de cloro/ácido en la primera etapa (tecnologías DHT o AHT/D) en lugar de una etapa D0 de 30 min. Sólo unas pocas plantas, interesadas en minimizar el consumo de agua han recurrido al uso de ozono como primera etapa de blanqueo.

Los químicos típicamente usados en el blanqueo de pulpa incluyen:

Agentes oxidantes: Cloro, Dióxido de Cloro, Oxígeno, Ozono y Peróxido de hidrógeno.

Álcali: Hidróxido de Sodio.

Últimamente, se han propuesto algunas secuencias de blanqueo alternativas para la pulpa kraft de eucaliptus, con dos motivaciones fundamentales: (1) disminuir los costos de capital y (2) facilitar el cierre de una planta. Con el fin de minimizar el consumo de agua y el volumen de tratamiento de efluentes.

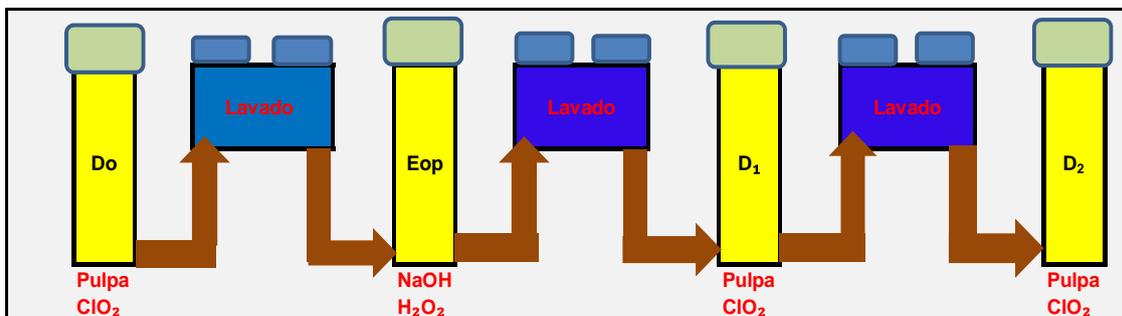


Figura 5 Secuencia tradicional de blanqueo

4.6.1-Primera Etapa de Blanqueo (Do)

La tecnología preferida para el blanqueo ECF de pulpa kraft de eucaliptus consiste en una secuencia de 4 etapas del tipo D(Eop)DD. Existen muchos matices para esta secuencia. La etapa Do puede realizarse en forma convencional (30-60 min, 50-70°C) o bien a alta temperatura (120 min, 90-95°C) para prolongar la extracción de ácido hexenurónico de la pulpa.

El ClO₂ es uno de los principales químicos usados para el blanqueo de pulpas kraft, porque reacciona directamente con la lignina y no tiene reacciones de importancia con los carbohidratos en las condiciones en que se aplica.

Puede ser usado en las primeras etapas de una secuencia de blanqueo como agente deslignificante, o en etapas finales para alcanzar altos niveles de blancura. La lignina reacciona rápidamente con el dióxido generando clorito y ácido hipocloroso y la menor cantidad de clorato. De ahí que el pH se trabaja en Do alrededor de 3,5-4,0. Para beneficiar la regeneración del reactivo.

La carga total de dióxido de cloro se calcula en base a la lignina remanente en la pulpa, es decir, el número kappa, utilizando un factor empírico denominado **Factor Kappa**.

FK: carga de dióxido * 2,63/ N° de Kappa (observar en la **Figura 6**). Se realiza la etapa Do a una consistencia entre 10-14% otorga una mayor eficiencia de trabajo. La eficiencia de lavado cuando se trabaja con dióxido de cloro es muy importante puesto que el arrastre (DQO) consume agente blanqueante. En promedio por cada 3 kilos de DQO se consume 1 kilo de ClO₂ (Instructivo Celulosa, 2008).

Figura 6 Blanqueo con Dioxido de Cloro



$$\frac{\text{gCl}_2}{\text{gCl}_2} = \frac{5 \text{ eq ClO}_2}{2 \text{ eq Cl}_2} * \frac{71 \text{ PM Cl}_2}{67,5 \text{ PM ClO}_2} = 2,63 \text{ g Cl}_2/\text{g ClO}_2$$

Por lo tanto existe el Factor Kappa como cloro activo para calcular la carga de ClO₂:

$$\text{FK} = \frac{\text{Carga de dioxido} * 2,63}{\text{N}^\circ \text{ de Kappa}}$$

4.6.2- Etapa de Extracción (Eop)

El rol de la extracción es solubilizar a lignina y productos de las reacciones de oxidación ocurridas en las etapas oxidantes (ClO_2 , O_3) y al mismo tiempo, reactivar las moléculas de lignina que aún se encuentran remanente en la pulpa. Adicional a este rol también ayuda, pues saponifica ácidos grasos y resínicos. El medio de la etapa de extracción es alcalino y se logra con la adición de NaOH; esta etapa se refuerza con oxígeno y peróxido de Hidrógeno.

Se debe tener la precaución que esta etapa no sea drástica porque los carbohidratos como celulosa y hemicelulosa sufren degradación. Por otra parte la extracción alcalina reforzada con oxígeno y peróxido reduce el número de Kappa en un 25% y aumenta la blancura de salida de la etapa cerca de 10 unidades ISO comparado con la extracción reforzada sólo con oxígeno (1,5).

La carga de peróxido se recomienda que varíe entre 0,25 a 0,75% bps; el incremento en la blancura y la disminución del número de Kappa tienen una relación casi lineal con la carga de peróxido en este rango y beneficia el poder reducir la carga de los agentes químicos en las etapas de blanqueo (Instructivo Celulosa, 2008).

Carga de NaOH

En la práctica la carga óptima de NaOH para la etapa de extracción es la cantidad necesaria para obtener un pH mínimo al final de la etapa de 10,5. Este valor de pH indica el casi total consumo del NaOH y es consecuencia de la alcalinidad asociada al carbonato de sodio formado durante la extracción. Normalmente la carga de reactivo fluctúa entre 0,5 a 3% bps y se fija el pH de entrada muy cercano a 12.

Carga de H₂O₂

El peróxido de hidrógeno remueve la lignina parcialmente y transforma los grupos cromóforos en grupos carbonilos y carboxílicos incoloros. La especie activa que blanquea es el ion perhidroxilo (HOO⁻) que se genera en medio alcalino. Sin embargo, el mayor problema de aplicación de H₂O₂ es su rápida descomposición frente a metales de transición como Fe, Cu, Mn, etc.

En contacto con la pulpa, el peróxido de hidrógeno participa en tres tipos de reacciones.



La velocidad de reacción en la extracción aumenta con la temperatura, siendo rangos de trabajos típicos entre 60 y 110°C y una consistencia óptima de 10-14%.

4.6.3- Etapa D₁ y D₂ (con Dióxido de Cloro)

Estas etapas consisten a igual que la primera en una mezcla con dióxido de cloro, hasta poder obtener la blancura deseada de la pulpa. Blancura ISO mayor 90% (D₂). En estas etapas es de tipo blanqueante y se puede trabajar con pH alrededor de 5,0.

Se trabaja a una consistencia de 10-14%, son reacciones entre 150-180 minutos cada una y se trabaja a una temperatura entre 70-75°C. La carga de dióxido de cloro en la etapa D₁ es de 40% y en D₂ el 20% del total agregado en la secuencia de blanqueo con respecto a la cantidad agregada en D₀. (Instructivo Celulosa, 2008).

4.7- Secuencias de blanqueo de bajo impacto pero alto nivel de blancura

Por las necesidades de los clientes papeleros la blancura de papel se ha incrementado de 89 hasta > 92 ISO. El alto consumo de blanqueantes que se utiliza en las plantas para llegar a esa blancura (utilizando secuencias normales o tradicionales), incrementa de manera significativa los costos.

La industria de celulosa en el último tiempo está en búsqueda de mejorar más su proceso, reducir consumo de químicos, cambio de secuencias (pH, Carga, blanqueantes, etc) para obtener mejor calidad y mayor blancura.

4.7.1- Secuencia DEopDP

Una opción es DEopDP, significa menos uso de dióxido de cloro, ya que El uso de solamente dióxido de cloro normalmente impide alcanzar 92% ISO.

Para re-emplazar una etapa de D₂ con una etapa de P, obteniendo pulpa con mejores propiedades ópticas y físico-mecánicas. Esto se alcanza blanqueando la pulpa hasta ISO 87 en D₁ después de que se ha degradado las estructuras fenólicas, y utilizando peróxido para eliminar los quinonas por ende alcanzando mayor blancura y más estable. (Süss, *et al.*, 2000, McDonough *et al.*, 2001, Carvalho *et al.*, 2008).

Con peróxido como última etapa se obtiene: A) mayor blancura final, B) menor reversión de blancura y C) ahorros en dióxido de cloro D) también hay menor carga para el ambiente. Aumenta la refinabilidad de la pulpa. (Parthasarathy *et al.* 2007, Carvalho *et al.*, 2008).

Las pulpas de secuencias D0EopD₁D₂ y D0EopD₁P se sujetaron a ensayos físicos, ópticos y estructurales. Los resultados más importantes son: Las propiedades ópticas y físico-mecánicas se obtienen blanqueando la pulpa hasta 87 ISO; las propiedades de tensión y la refinabilidad es mejor (utilización de menos energía de refinación).

La excepción es el índice de rasgado por la bajada en la viscosidad. La opacidad en el mismo nivel de tensión es mejor para las pulpas blanqueadas con etapa final P.

4.7.2- Secuencia a pH neutro (DoEopDD_N)

Es bien sabido que el pH afecta a la eficacia del tratamiento de dióxido de cloro, pero la recomendación estándar ha sido mantener un rango de pH después de la etapa para dar blancura con dióxido de cloro entre 3,5 y 4,0. Se confirma que el pH óptimo para el dióxido de cloro depende de la carga de dióxido de cloro, pero que esta etapa debe ser operada con un pH final cercano a la neutralidad cuando una carga de dióxido de cloro típica se aplica.

Se demuestra que el mantenimiento de un pH cercano a la neutralidad a lo largo de la etapa de blanqueo es la estrategia ideal, para reducir carga de dióxido de cloro

Este resultado se puede lograr bajo condiciones tamponadas en algunos casos, pero es más consistente obtenida mediante la generación de bicarbonato de sodio in situ mediante la adición de dióxido de carbono a la pasta alcalina o carbonato de sodio a la pasta ácida.

En 1964, Sepall describe un proceso para el dióxido de cloro neutro en blanqueo en el que las condiciones neutrales se mantuvieron mediante la adición de carbonatos y óxidos de metales de baja solubilidad alcalinotérreos.

Sin embargo, ninguno de estos procesos se practica comercialmente; los tampones solubles, tales como potasio di hidrógeno fosfato son demasiado caros para aplicación industrial, mientras que el manejo de buffers escasamente solubles, tales como bicarbonato de sodio (Rapson. W.H.).

En las últimas etapas de D, al aumentar el pH casi neutro reduce el consumo de dióxido de cloro, aumenta la blancura, disminuye la reversión de blancura, pero el problema que afecta a la caída de la viscosidad.

Los resultados obtenidos en un ensayo mostraron un ahorro neto estimado en el costo total de producto químico de 2,68 dólares canadiense/tonelada seca al aire a una alimentación equivalente número kappa y blancura final.

Estos resultados se lograron con una blancura final más estable, que fue bien recibido en la fábrica, a pH cercano a neutro la blancura muestra una disminución de la reversión. El dióxido de cloro casi neutro es la última tecnología de blanqueo (NNB).

4.7.3- Secuencia con quelantes

La adición de quelantes inmediatamente después de una etapa Do, tecnología (DQ), reduce en 2,2 kg/t el dióxido de cloro necesario para blanquear al nivel de 90% ISO cuando se usa la etapa convencional. Además el tratamiento de quelación protege la viscosidad de la pulpa, pero solo cuando no se agrega magnesio en la etapa (OP).

El uso de quelantes después de la etapa de dióxido disminuye la reversión de la blancura en la pulpa blanqueada en forma convencional. El tratamiento de quelación no afecta significativamente el rendimiento del blanqueo o las características generales de los efluentes (pH, Color).

El efecto positivo del uso de quelantes sobre el ahorro general de dióxido de cloro se explica por el mejor desempeño de la etapa (OP) después de la primera etapa de dióxido en una pulpa con menor cantidad de metales.

Los quelantes tienen un efecto positivo en la remoción de metales de la pulpa después de la etapa Do. La adición de quelantes después de la etapa Do (sin un lavado intermedio) aumenta significativamente la remoción de metales de transición lo cual es beneficioso para un blanqueo con peróxido.

5- METODOLOGIA

5.1- Pulpa

Se utilizó pulpa industrial a la salida de la etapa de deslignificación con oxígeno y se caracteriza en base a su número de kappa, blancura y viscosidad. Proveniente de mezcla de eucalipto, (80% *eucalipto glóbulus*, 20% *eucalipto nitens*). La pulpa fue lavada y almacenada en la cámara de frío a 4°C.

Baño termostatzado

Se utilizó un baño termostatzado con un volumen 40 litros de agua a diferentes temperaturas para realizar las etapas del proceso de blanqueo.



Figura 7. Pulpa de eucaliptus, Baño termostatzado utilizado en el blanqueo

Proceso de blanqueo

El proceso de blanqueo se llevó a cabo por un periodo de dos meses en la que se realizó etapas de blanqueos de pulpa de Eucaliptus en los cuales se probaron diferentes secuencias de blanqueo para obtener la mejor optimización del proceso de blanqueo y la menor cantidad de materia orgánica en los efluentes.

En cada etapa se utilizó condiciones de operación diferentes y la utilización de reactivos específicos (dióxido de cloro, quelantes, peróxido de hidrógeno y buffers). Teniendo como objetivo alcanzar una blancura mayor a 90% ISO.

Tabla 6- Condiciones de las etapas de blanqueo

Condiciones	D ₀	Ep	D ₁	D _{hot}	EpQ	D _N	P
Consistencia, %	10	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	70	80	75	85	80	75	75
pH final	3,8	11,0	5,0	3,0	11,0	7,0	11,0
ClO ₂ residual kg/BDT	Trazas		0,01-0,02	Trazas		0,01-0,02	Trazas

5.2- Procedimiento

Se efectuó tres ensayos “blancos”: Contempla la realización de tres corridas de blanqueos utilizando condiciones idénticas a las que emplean en la industrial de celulosa, a fin de obtener un patrón de comparación que permita correlacionar los resultados obtenidos en laboratorio con los que se obtendrían en fabrica. Los efluentes obtenidos en cada etapa de blanqueo se realizaron medición de DQO, pH, conductividad, color verdadero y compuestos fenólicos totales.

Tabla 7. Parámetros analizados

Pulpa	Efluentes
Microkappa	DQO
HexA's	Color Verdadero
Viscosidad	Conductividad
Rendimiento	Residual de ClO ₂
Blancura	Residual de H ₂ O ₂
Reversión	pH
	Compuestos Fenolicos totales

Se realizó una etapa Do a pH 3,5- 4,0, antes de comenzar se midió el Kappa de la pulpa para poder determinar la carga de Dióxido, se pesó 300 gramos de pulpa seca (su equivalente en peso húmedo) dentro de una bolsa de polietileno, donde se agregó el agua y los reactivos (dióxido de cloro, soda para ajustar pH), luego al baño termostatzado a temperatura y tiempo definido según el tipo de etapa.

Posteriormente se realizó una etapa Ep de la pulpa saliente de Do se agregan los reactivos hidróxido de soda, peróxido de hidrogeno. En baño termostatzado a temperatura y tiempo definido para la etapa.

Se realizó 4 secuencias de blanqueo utilizando quelantes en la etapa Ep (DoQEpDP). Luego se realizó una secuencia utilizando una etapa con peróxido de Hidrógeno al final de la secuencia (DoEpDP), otra realizando etapa Dhot (DhotEpD₁P) y para finalizar una secuencia con una etapa de D₂ a pH neutro (DoEopD₁Dn). Cabe señalar que luego de finalizada cada etapa la pulpa es lavada con agua.

En cada secuencia se cambió una etapa o condición de blanqueo, para observar como variaban los parámetros del efluente (pH, DQO, color verdadero, conductividad y compuestos fenólicos totales) y la calidad de la fibra (viscosidad, blancura, reversión), un parámetro importante de esta tesis es la cantidad de materia orgánica del efluente.

Es muy importante el pH en cada etapa de blanqueo debido que a diferente pH se forman diferentes especies formadas en la reacción. Como ejemplo de esto, en la etapa 1 (D₀) se trabaja a pH 3,5- 4,0 y a este pH el dióxido de cloro trabaja como deslignificante, no así en la etapa D₁ o D₂ que ocurre la reacción a pH 4,5- 5,0 y el dióxido de cloro actúa como un agente blanqueante. A pH neutro es más estable el dióxido de cloro.

Otro parámetro importante es la temperatura se realizó un etapa con Dióxido de cloro en caliente (Dhot) y a pH 3,0 para extraer metales, los cuales afectan en la etapa posterior de extracción descomponiendo el peróxido de hidrogeno.

Se realizó una etapa ocupando un quelante en la etapa de extracción. Se sabe que los quelantes son compuestos orgánicos o ligandos que atrae a los metales formando complejos y protegiendo la cadena de celulosa. Esto debe permitir que actuara el peróxido de hidrogeno de mejor forma.

5.3- Métodos analíticos

Caracterización parámetros operacionales y eficiencia

Se realizó una caracterización físico-química del efluente en las distintas etapas de blanqueo, mediante DQO (Demanda Química de Oxígeno), mediante el método fotómetro Merck (test en cubeta DQO), se midió en el espectrofotómetro DR 5000 a longitud A620nm. Se determinará la medición del color mediante longitud de onda de A465nm en un espectrofotómetro DR 5000 HACH, pH en un pH Benchtop (Termo scientific) y conductividad en conductivity Benchtop (termo Scientific). Todas las muestras fueron previamente filtradas por membranas Wathman 0.45 µm.

Los parámetros evaluados durante los distintos ensayos fueron según los protocolos descritos en *Standard Methods* (APHA-AWWA, 2005). Parámetro, tales como pH, fue medido a través de electrodos (**Figura 8**).



Figura 8. Equipamiento utilizado para medir los siguientes parámetros: a) DQO (espectrofotómetro de absorción molecular modelo DR 5000, HACH); b) DQO (termoreactor, modelo D98 200, HACH); c) pH (pHmetro, Thermo scientific modelo orion 2 star, sonda modelo 9157 BN, arquimed). Filtros membranas Wathman 0.45 μm .

Determinación de Color Verdadero, o sea el color de la muestra una vez que se ha removido su turbidez, y el color aparente, que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido (Arboleda, 2000). Se midió utilizando un espectrofotómetro de absorción molecular modelo DR 5000 UV-VIS 465 nm, marca HACH USA, de acuerdo al Standard Methods, método platino-cobalto 2120 C.

Determinación de pH, es una medida de la concentración de iones hidronio (H_3O^+) en la disolución. En las medidas de pH hay que tener presente que estas sufren variaciones con la temperatura (Aznar, 2000). Se utiliza un pHmetro, marca Thermo scientific USA, modelo orion 2 star con sonda modelo 9157 BNMD. El cual se calibra cada semana con soluciones buffer de pH 4,7 y 10. Se determina mediante Standard Methods, método Electrometría 4500 HB.

Determinación de Demanda Química de Oxígeno, la demanda química de oxígeno corresponde al oxígeno equivalente de la materia orgánica de una muestra que es susceptible a la oxidación por un fuerte oxidante químico. La muestra de agua se oxida con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. A continuación se determina fotométricamente la concentración de iones $Cr_2 O_7^{2-}$ amarillos o iones Cr verdes. Se determina

mediante el espectrofotómetro de absorción molecular DR 5000 UV-VIS a 620 nm y un termoreactor DRB 200, HACH, USA. Utilizando la técnica fotométrica mediante un test en cubetas DQO para fotómetros, marca Merck, Alemania. Basados en Standard Methods, método 5220 D.

Compuestos fenólicos totales (UV215): Los compuestos fenólicos totales se determinaron por medición de la absorbancia a 215 nm, de una muestra a pH 6 (Tampón KH_2PO_4 0,2 mol/L), en cubeta de cuarzo 1×1 cm (Chamorro, 2005).

Se realizó un curva de patrón de fenol en el espectrofotómetro de absorción molecular DR 5000 UV-VIS, cada muestra se filtró con Filtros membranas Wathman 0.45 μm y finalmente se midió las mezclas de efluentes de cada secuencia de blanqueo utilizando un factor de dilución en el espectrofotómetro.

6- RESULTADOS

6.1 Caracterización de la secuencia normal de blanqueo

El análisis de aporte por filtrado de cada etapa de secuencia de blanqueo tradicional D0EpD₁D₂, muestra que es la primera etapa la que otorga el mayor aporte en DQO de un 37% del total del blanqueo y el color verdadero del filtrado se obtiene alrededor de un 75,0%, como lo muestra la Figura 9. Esto se debe a que la pulpa ingresante al blanqueo viene con lignina residual entre 2 y 3 %, la cual es oxidada con agentes blanqueantes. En la etapa1 el dióxido de cloro actúa como deslignificante extrayendo mayormente la lignina y aumentando el porcentaje de blancura ISO de la pulpa que entra al blanqueo con una blancura de un 51% ISO y sale de la etapa1 con una blancura de 67% ISO.

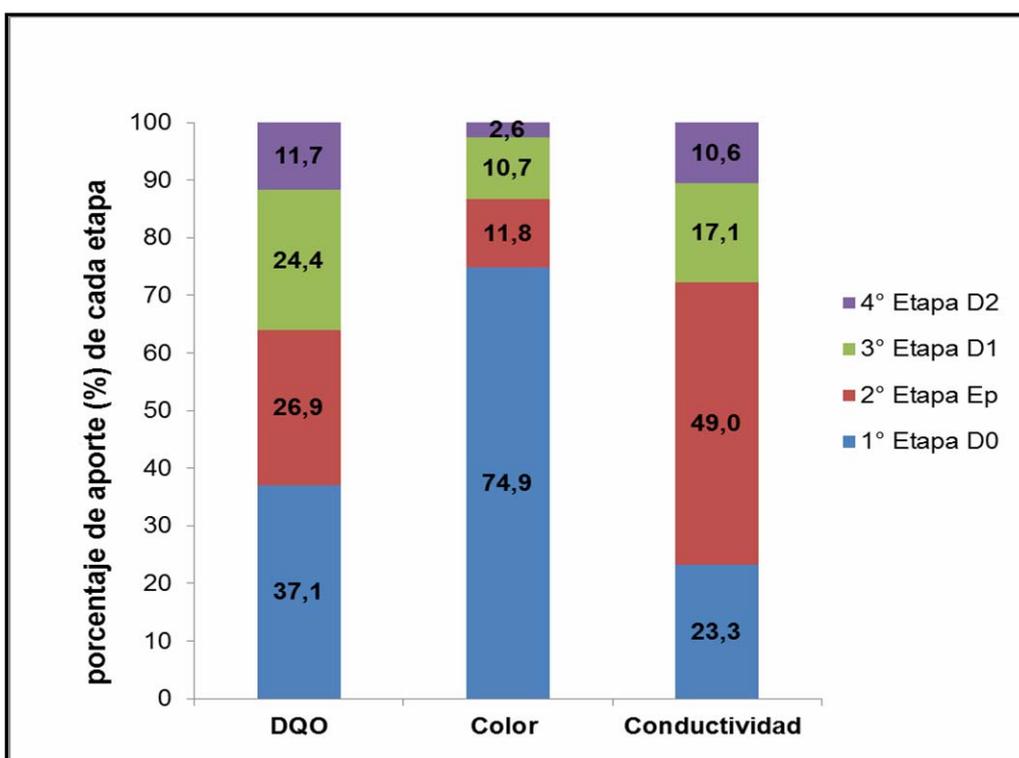


Figura 9 Aporte de DQO, Color y Conductividad en cada etapa de la secuencia tradicional (D0EpD₁D₂)

No existe relación entre la carga de DQO que entrega el blanqueo y el nivel de color en el efluente, aunque presentan la misma tendencia de ir disminuyendo mientras se avanza en la secuencia de blanqueo.

En el blanqueo de pulpa de Eucalipto, el mayor aporte de DQO al efluente, independiente de la secuencia aplicada corresponde a la primera etapa (38%).

En el caso de la conductividad se encuentra su mayor aporte en la 2^o etapa esto es debido que es una etapa con hidróxido de sodio el cual ayuda a que haya electrolitos que conduzcan electricidad y es por eso que tiene una mayor conductividad.

Los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización de la mezcla del efluente se observa en la tabla 8.

Tabla 8 Parámetros de la mezcla de la secuencia D0EpD₁D₂

Secuencia	Parámetros	Unidad	Resultados
D0EpD₁D₂	pH		9,75 ± 0,03
	DQO	kg/ADT	5,3 ± 0,1
	Color Verd.	kg/ADT	0,38 ± 0,02
	Conductividad	uS/cm	1113 ± 10
	Compuestos Fenoles totales	mg/L	97,5 ± 5
	Carga Química	kg Cl ⁻ /ADT	29,5

6.2- Caracterización de las secuencias de blanqueo

Para determinar que secuencia tiene mayor aporte de materia orgánica, color, conductividad, aporte o cantidad de compuestos fenólicos totales que se puede encontrar en el efluente y la cantidad de carga de reactivos químicos que se utilizan en la secuencia de blanqueo.

6.2.1- Aporte de materia orgánica de las secuencias de blanqueo

En la **Figura 10** se muestra el aporte de materia orgánica de cada secuencia por etapa del blanqueo. En la etapa de D_{hot} de la secuencia $D_{hot}EpD_1P$ se observa la etapa1 con mayor aporte de materia orgánica al efluente, debido que es una etapa en condiciones más severas que el resto, se trabajó a una temperatura $85^{\circ}C$ donde hay un mayor daño a la fibra.

En el caso de las otras etapa1 fueron hechas en las mismas condiciones, siendo los valores de DQO muy similares.

En la Etapa 2 se observa que la secuencia con una etapa EpQ (D_0EpQD_1P), tiene un mayor aporte de materia orgánica esto debido a que es una etapa con quelante, el cual aporta materia orgánica al efluente. Las otras secuencias en la etap2 se obtienen un aporte similar.

En la etapa3 la cantidad de materia orgánica comienza a disminuir y no hay una gran diferencia.

En la etapa4 hay diferencias, ya que se cambió el tipo de blanqueante. En las secuencias $D_{hot}EpD_1P$ y D_0EpQD_1P , hay un aporte considerable de materia orgánica, aunque cabe mencionar que hay una disminución de pérdida de materia a medida que avanza el blanqueo a su etapa final.

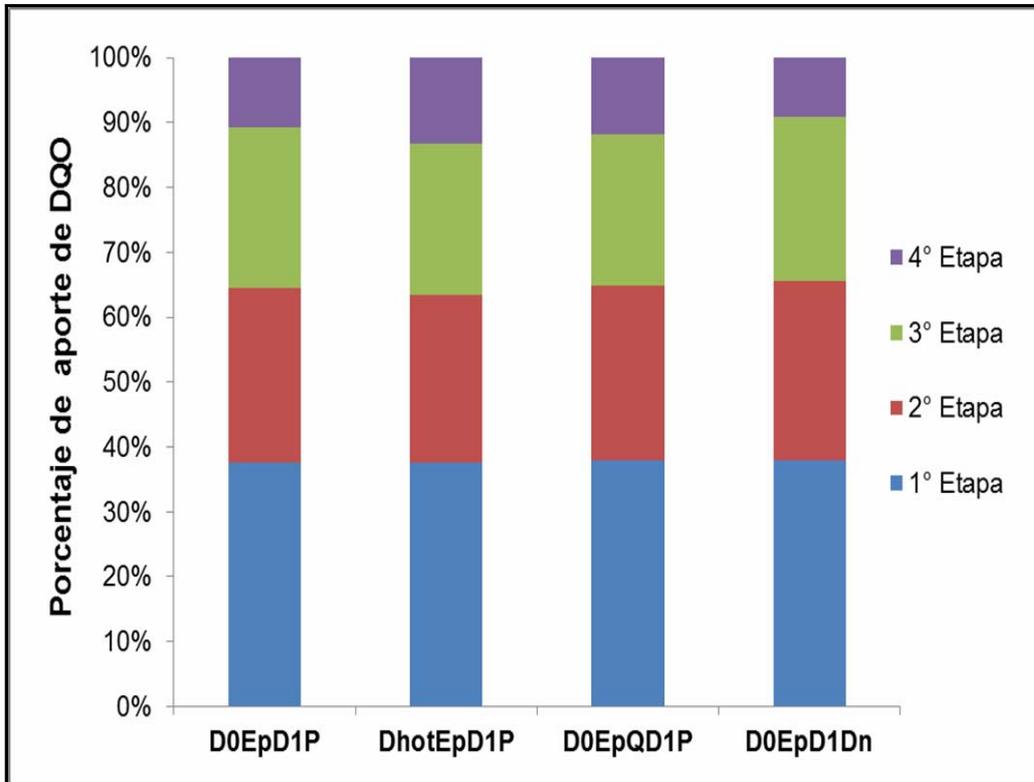


Figura 10 Aporte por etapa de secuencia de blanqueo de materia orgánica en el efluente de Blanqueo.

En la **Figura 11** se analiza la cantidad de materia orgánica por secuencia entregada al efluente. Se observa que las secuencias $D_0EpD_1D_n$ con 5,1 kg/ADT de DQO y D_0EpD_1P con 5,1 kg/ADT de DQO son las que aportan menor cantidad de materia orgánica comparado con la secuencia de referencia $D_0EpD_1D_2$ que tiene un 5,3 Kg/ADT.

La secuencia D_0EpQD_1P con 5,8 kg/ADT de DQO es la que aporta mayor carga de materia orgánica comparado con las otras secuencias estudiadas.

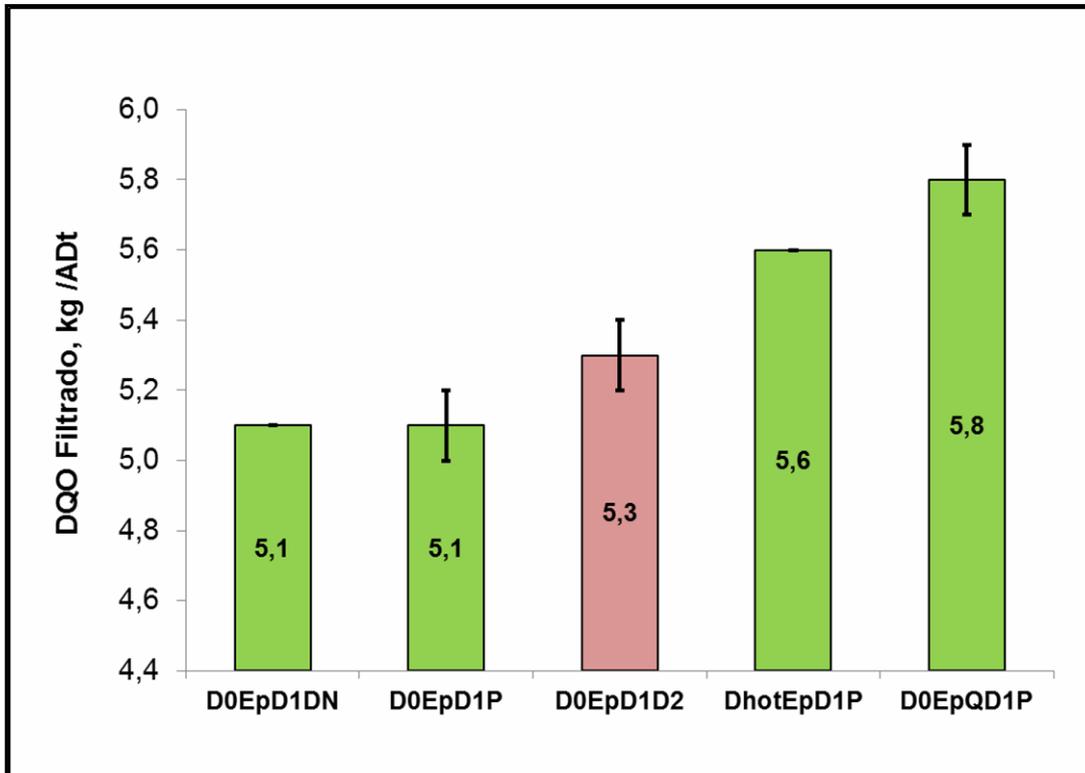


Figura 11 Efecto secuencia blanqueo en carga de DQO al efluente

6.2.2- Relación de la materia orgánica ver su rendimiento de la secuencia de blanqueo.

Al realizar la secuencia de blanqueo se puede relacionar la carga de materia orgánica ver su rendimiento de cada secuencia estudiada en la **Figura12**.

Se observa que a medida que el aporte de materia orgánica en el efluente esta en mayor cantidad, el rendimiento del blanqueo disminuye, es decir, en una secuencia de blanqueo cualquiera, ejemplo $D_0EpD_1D_2$, en la etapa1 el porcentaje es alrededor de un 37% materia orgánica en el efluente y a medida que avanza el blanqueo la materia orgánica en el efluente disminuye a un 11% en la última etapa (D_2).

En el caso del rendimiento del blanqueo aumenta a medida que avanza el blanqueo comenzando con un rendimiento en la primera etapa de 97,9% y obteniendo en la última etapa de blanqueo un rendimiento de 99,5%, ya que se está perdiendo más lignina y compuestos orgánicos que están en la pulpa de celulosa. Como lo muestra la Figura12 el valor de DQO del efluente de blanqueo se correlaciona ($R^2=0,8$) inversamente con la pérdida de rendimiento de la pulpa en la secuencia de blanqueo.

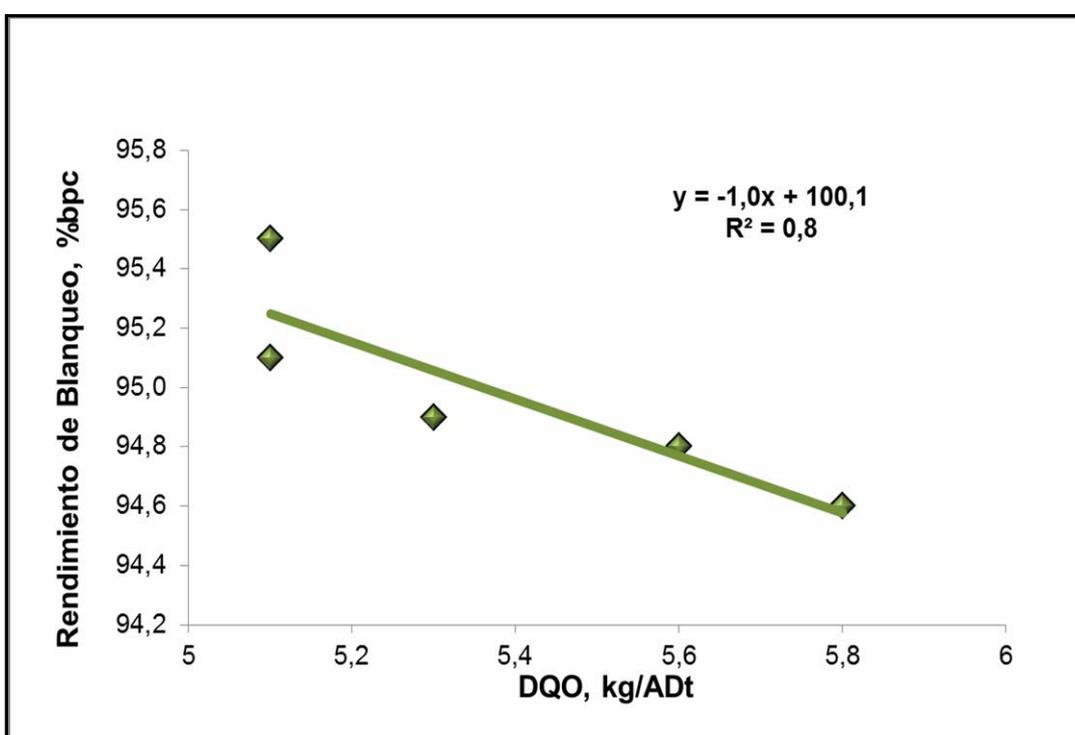


Figura 12 Relación rendimiento secuencia de blanqueo vs DQO

Tabla 9. Datos de las secuencias de blanqueo DQO VS Rendimiento

D0EpD1Dn	DoEpD1P	D0EpD1D2	D0Ep(Q)D1P	DhotEpD1P
95,5	95,1	94,9	94,8	94,6
5,1	5,1	5,3	5,6	5,8

6.2.3- Efecto de la carga de químicos v/s DQO

La carga de químicos en una secuencia de blanqueo se obtiene sumando los blanqueantes (dióxido de cloro y peróxido de hidrógeno) y multiplicando por un factor (2,63 si es dióxido y 2,09 peróxido), para llevarlos a cloro activado.

La **Figura13** muestra que en las secuencias D_0EpQD_1P y $D_{hot}EpD_1P$ son las que tienen menor cargas de químicos (28,3 y 28,8 kg Cl^-/ADt) pero el DQO es mayor (5,6 y 5,8 kg/ADt), pero esto se debe que las secuencias con menores cargas de químico en una se utilizan quelante y en la otra tiene una etapa D_{hot} la cual es una etapa severa, ya que se utiliza una temperatura entre 20-30 °C mayor a lo que se utiliza normalmente.

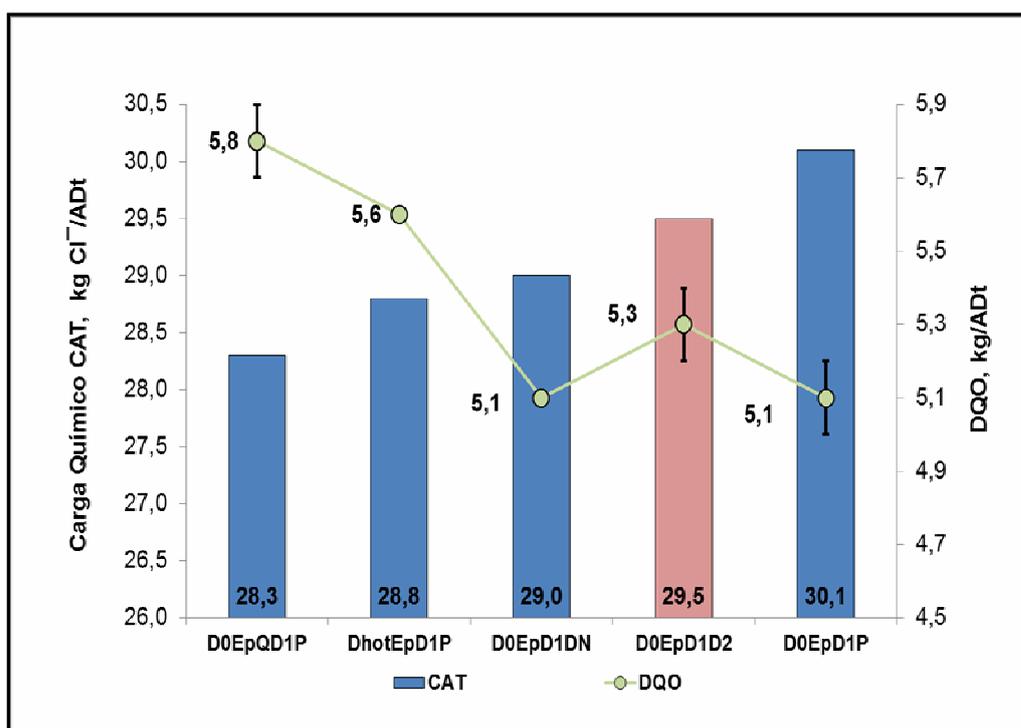


Figura13 Efecto de la carga de químico v/s carga de materia orgánica al efluente

6.3 Aporte de Color verdadero de secuencias de blanqueo al efluente

Por otra parte, se analizó en cada secuencia de blanqueo su aporte de color atribuido a los grupos cromóforos.

Se observa en la **Figura14** los aportes por etapa de color al efluente, donde la etapa1 (D₀) es el mayor aporte de color que va desde un 70 a 80 %, debido a la pérdida de lignina y otros grupos orgánicos. A medida que se avanza en el blanqueo o se llega a la etapa4 hay una menor carga de color al efluente alrededor de un 11% del total del blanqueo, es decir, se obtiene una pulpa con menos lignina (la cantidad de lignina es tan baja en la última etapa de blanqueo que es muy difícil cuantificar) y mayor blancura que comienza con una blancura de 51% ISO y termina con una blancura de 90% ISO.

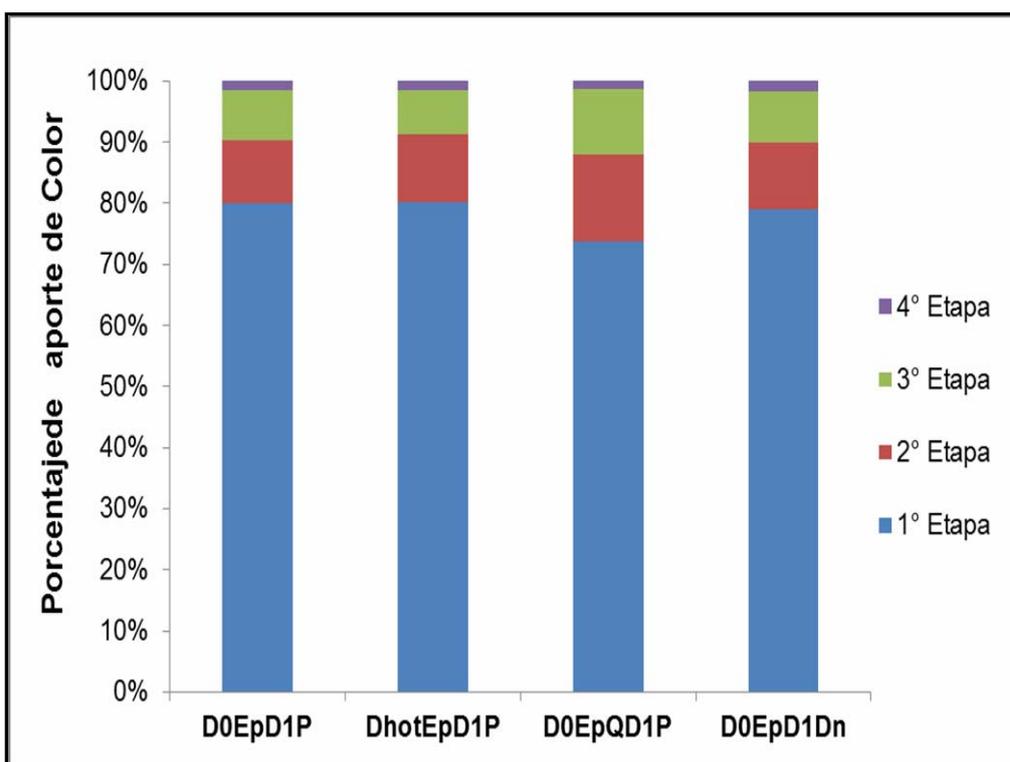


Figura 14 Aporte de color por etapa de secuencia de blanqueo a efluente de blanqueo.

6.3.1 Aporte de color verdadero por secuencia de blanqueo y compuestos fenólicos totales

En la **Figura15** se observa la carga de color de cada secuencia al efluente. La secuencia $D_{hot}EpD_1P$ aporta mayor carga de color con un 0,54 kg/ADT debido a su etapa D_{hot} , hay más daño de la pulpa extrae más lignina y metales los cuales van a dar al efluente. La secuencia D_0EpD_1P tiene menor carga de color al efluente con un 0,28 kg/ADT al comparar con la secuencia tradicional $D_0EpD_1D_2$ la cual se obtiene un 0,38 kg/ADT.

La determinación de color se puede deber a metales, materia orgánica que aportan color al efluente. Es un parámetro importante cuando debe volver al sistema acuático de un río o lago, en la cual el efluente debe ser incoloro.

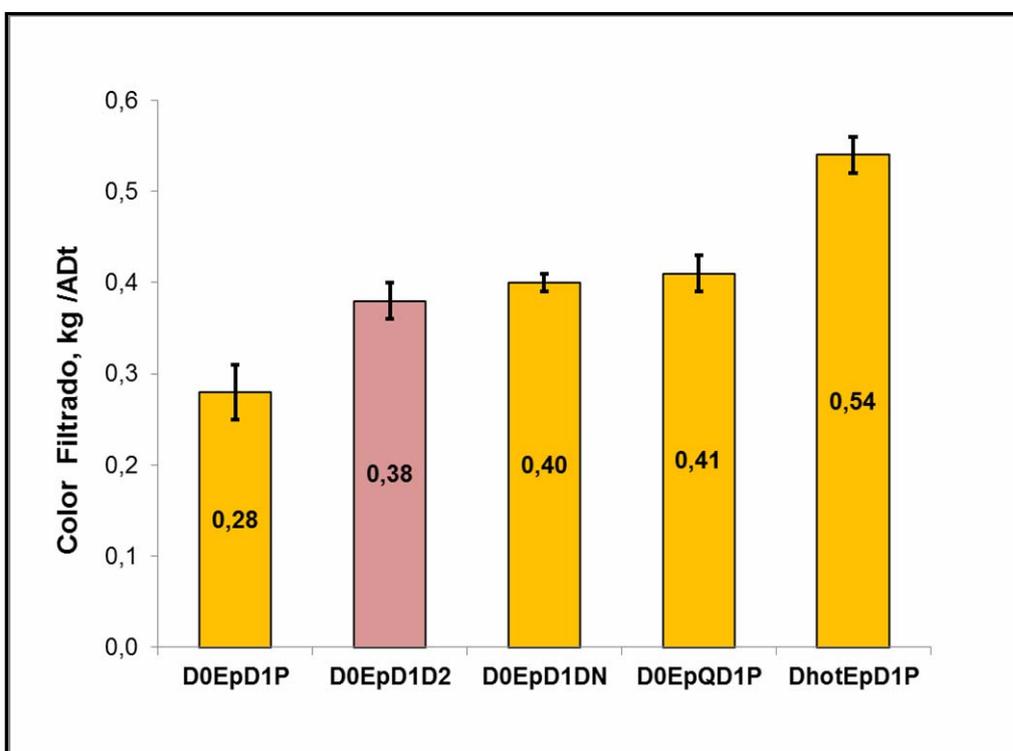


Figura 15 Aporte de color por secuencia de blanqueo al efluente.

Los efluentes generados en el proceso de blanqueo, se caracterizan por presentar, compuestos orgánicos y color. Los principales compuestos orgánicos, son carbohidratos, compuestos fenólicos y derivados de la lignina. Los compuestos fenólicos tienen relación con el color, ya que los compuestos fenólicos corresponden a los grupos de la cadena de lignina y el color es debido a la lignina y sus compuestos cromóforos.

La idea es tener un conocimiento de cuanto compuestos fenólicos aporta el blanqueo al efluente.

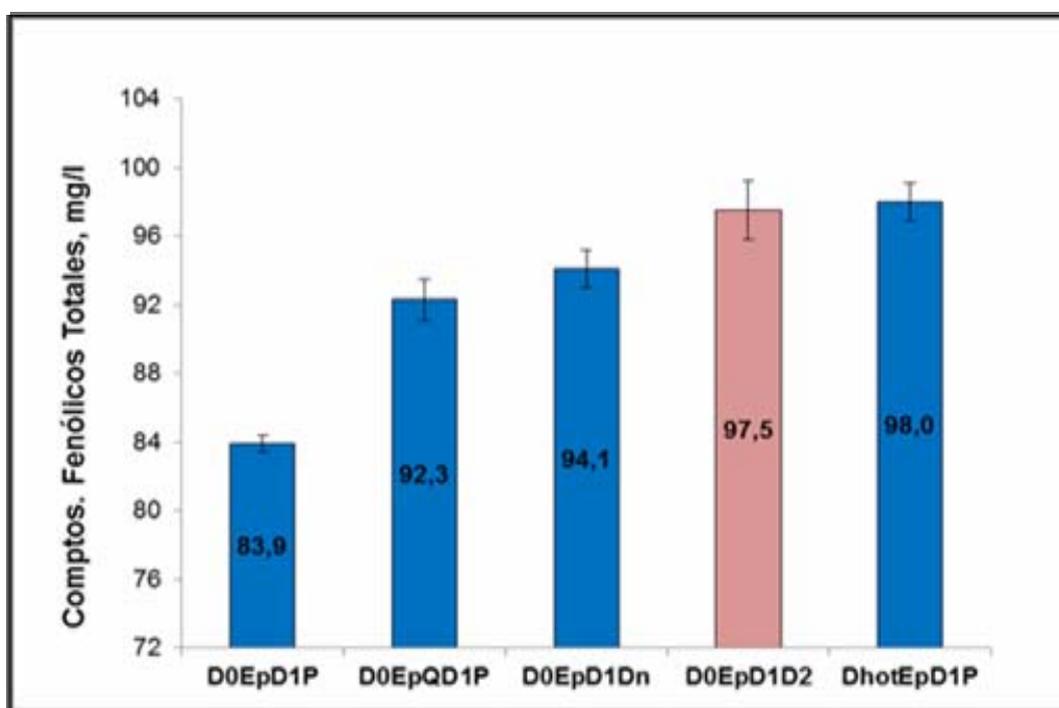


Figura 16 Carga al efluente de compuestos fenólicos totales

La secuencia $D_{hot}EpD_1P$ es la que se observa con mayor aporte de compuestos fenólicos totales con un 98,0 mg/L, muy similar a la secuencia de referencia $D_0EpD_1D_2$. La secuencia D_0EpD_1P es la que aporta menos compuestos fenólicos totales al efluente con un 83,9 mg/L al compararlo con la secuencia de referencia.

6.4- Conductividad en las secuencias de blanqueo

Se determinó la conductividad a cada etapa, a la mezcla de efluentes de cada secuencia de blanqueo y se analizó el comportamiento en las secuencias.

En la **Figura17** Se observa como varia la conductividad dependiendo la etapa del blanqueo, donde la mayor conductividad se obtiene en la etapa 2 alrededor de 2900 Us/cm debido a que afecta el pH y el hidróxido de sodio donde se encuentra más especies que conduzcan electricidad.

En el caso de la etapa 4 que se utilizó peróxido aumentó la conductividad debido a que aumentó las especies que conducen electricidad comparado con las etapas que terminan con dióxido de cloro, pasando de una conductividad de 600 Us/cm en la etapa con dióxido de cloro a 1900 Us/cm aproximadamente en la etapa con peróxido.

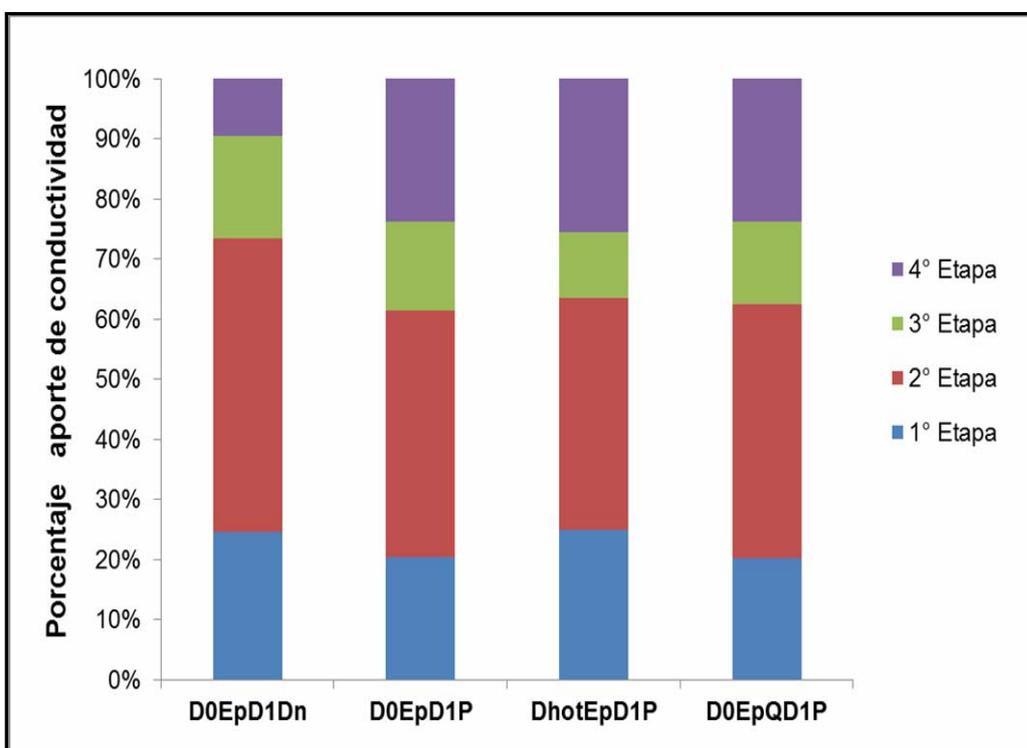


Figura17 Conductividad por etapa de secuencia de blanqueo en efluentes.

Se analizó la conductividad de la **Figura18** observando que la mayor conductividad se obtiene en la mezcla del efluente $D_{hot}EpD_1P$ con 1479 $\mu S/cm$, ya que hay un mayor aporte de especies que conduce electricidad.

La secuencia de referencia es la que tiene menor conductividad con 1113 $\mu S/cm$ con respecto a las secuencias estudiadas.

Las secuencias que tienen una etapa P son las que tienen mayores conductividad entre 1300 y 1500 $\mu S/cm$, esto debido que esta etapa se utiliza hidróxido de sodio para ajustar pH, el cual aporta especies que aumenta la conducción eléctrica.

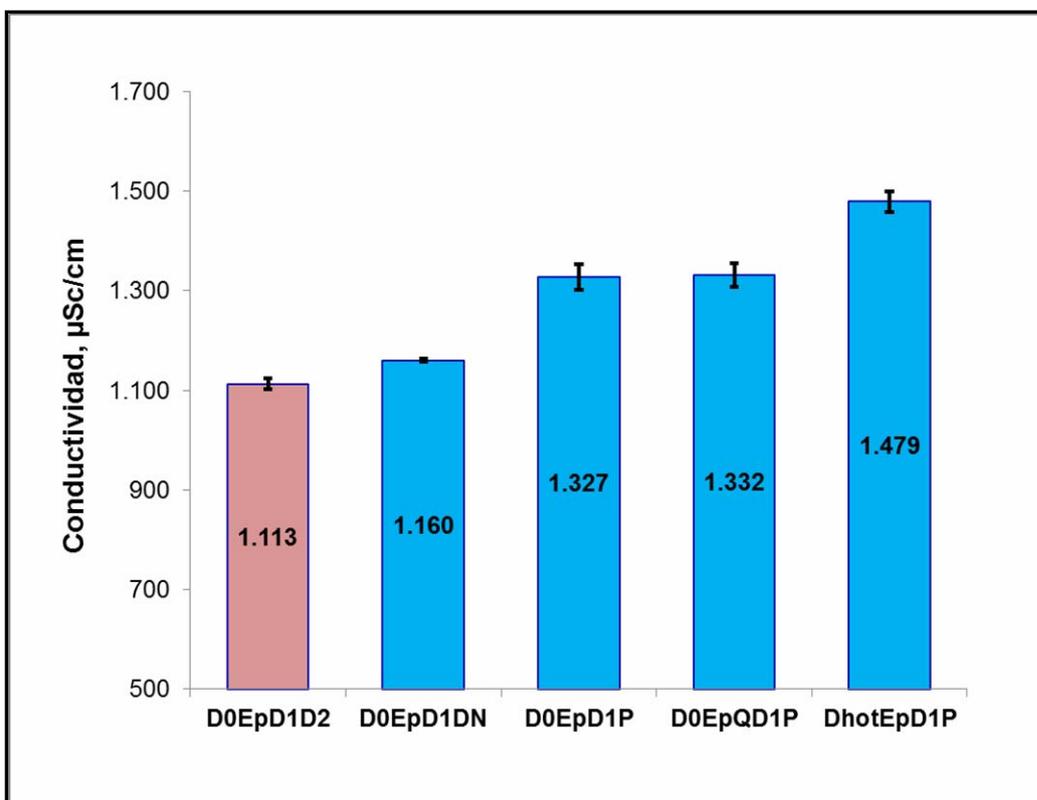


Figura18 Conductividad de cada mezcla de efluente obtenido en las secuencias de blanqueo.

6.5- Consumo de químico en cada secuencia de blanqueo

Se analizó el gasto de químicos en casa secuencia de blanqueo realizada, expresada en kg Cl⁻/ ADT.

Se observaron sus diferencias al comparar con la secuencia tradicional D₀EpD₁D₂.

El mayor consumo se obtuvo en la secuencia D₀EpD₁P con un 30,1 kgCl⁻/ADT, esto debido a que hubo más consumo de peróxido de hidrogeno que de Dióxido de cloro el cual tiene un mayor impacto en el medio ambiente.

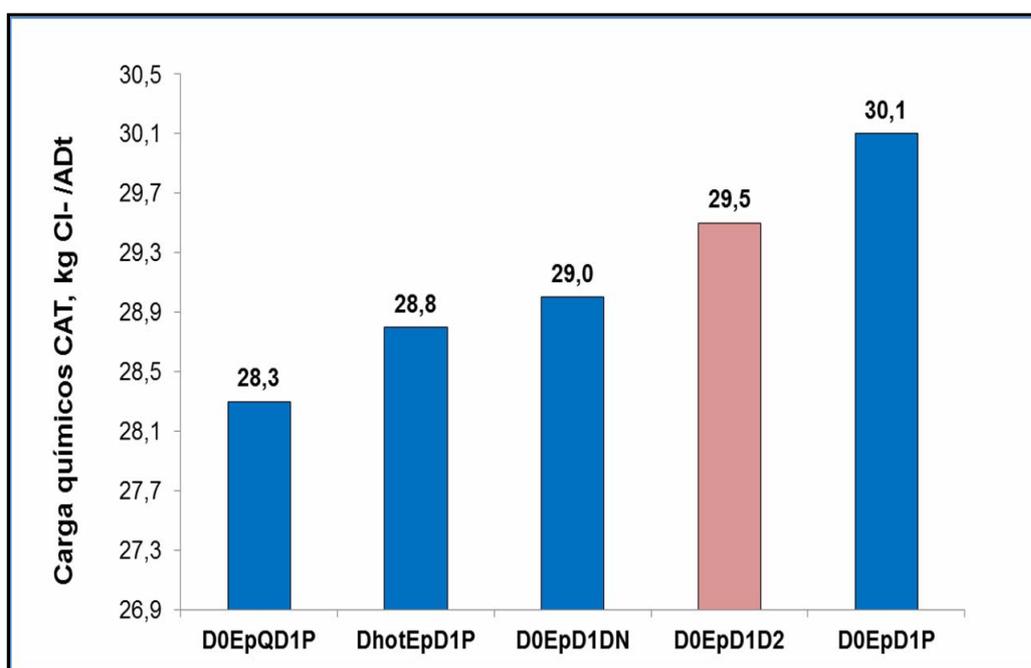


Figura 19 Consumo de químicos por secuencia de blanqueo.

Si bien la industria de celulosa su objetivo es blanquear la pulpa y obtener una pulpa de buena calidad, también es importante el consumo de reactivos químicos ya sea por un tema económico y también ambiental.

Hoy en día la industria de celulosa está trabajando en disminuir su consumo de reactivo y mejorar su proceso.

7. DISCUSION

La **Tabla10** muestra los parámetros de cada secuencia de blanqueo para determinar en qué secuencia se obtienen mejores resultados a nivel de la calidad de la pulpa de eucalipto y del impacto al medio ambiente de sus efluentes a partir de los parámetros estudiados en esta tesis (DQO, color, conductividad, compuestos fenólicos totales, consumo de reactivos químicos).

Permite tener una visión clara de cada secuencia y cuál es la que cumple mejor la norma.

Tabla10 Parámetros generales de cada secuencia de blanqueo

SECUENCIAS	DQO kg/ADt	COLOR kg/ADt	CONDUCTIV. μ Sc/cm	REVERSION %ISO	CONSUMO kg Cl ⁻ /ADt	VISCOSIDAD cm ³ /g	RENDIMIENTO %	BLANCURA % ISO
DoEpD1D2	5,3 ± 0,1	0,38 ± 0,02	1113 ± 10	2,2	29,5	931 ± 1	94,5	90,1
DoEpD1P	5,1 ± 0,0	0,28 ± 0,03	1327 ± 24	1,7	30,1	984 ± 1	95,1	90,7
DhotEpD1P	5,6 ± 0,0	0,54 ± 0,02	1479 ± 22	1,7	28,8	905 ± 1	94,6	90,0
DoEpD1Dn	5,1 ± 0,0	0,40 ± 0,01	1160 ± 3	2,2	29,0	957 ± 1	95,5	90,0
DoEp(Q)D1P	5,8 ± 0,1	0,41 ± 0,02	1332 ± 20	1,5	28,3	959 ± 1	94,8	90,0

Uno de los parámetros analizados para ver la calidad de la fibra de celulosa es la viscosidad la cual es un indicador del grado de ataque a la cadena de celulosa que conforma la pulpa. Se comenzó con una pulpa de eucalipto ya deslignificada traída de la industria con una blancura de 51,3 %ISO y una viscosidad de 1125 ± 1 cm³/g antes de iniciar el proceso de blanqueo.

El menor daño de la cadena de la celulosa se observa en la secuencia D_0EpD_1P disminuyendo en un 12,4% en la secuencia de blanqueo y el mayor daño se encuentra en la secuencia $D_{hot}EpD_1P$ disminuyendo la viscosidad en un 19,5 %, debido que la fibra de celulosa fue sometida a parámetros más severos como a una D_{hot} .

Referente al análisis de la blancura ISO en todas las secuencias de blanqueo se cumplió el objetivo, todas tiene una blancura 90% ISO o sobre 90% ISO. La secuencia de blanqueo D_0EpD_1P es la que tiene mayor blancura cercana a 91 % ISO.

Un parámetro importante es la reversión de la blancura ISO, la cual consiste en someter la pulpa de celulosa a una temperatura $105^{\circ}C$ por cuatro horas, al final de estas horas se mide blancura. Los valores que se obtuvieron permiten determinar que secuencia de blanqueo realizada conlleva a obtener una pulpa más estable y con mejores propiedades tales como mejor viscosidad, tensión, rasgado, porosidad, etc. La secuencia de blanqueo D_0EpD_1P es una de las secuencias que tiene menor porcentaje de reversión 1,9% de disminución de la blancura y como termina el blanqueo con una etapa (P) permite que la cadena de celulosa sea más estable, ya que se forman grupos carbonilos.

En el caso del porcentaje de rendimiento de cada secuencia de blanqueo. Se observa que la secuencia de D_0EpD_1P tiene mayor rendimiento de blanqueo 95,1%, es decir, hay 4,9% de pérdida en el proceso o pérdida de los compuestos orgánicos, Mientras mejor sea el rendimiento mayor es la producción de celulosa. Para la industria el rendimiento es muy importante, porque se busca obtener un producto con la menor pérdida en el proceso, sería ideal que el 100% de materia prima que entra saliera un 100% de producto.

La carga de reactivos químicos y el tipo de blanqueante son también un parámetro importante para la empresa, si se tiene un buen rendimiento en el blanqueo sobre un 95,0 %, un menor consumo de reactivos químicos y una mejor calidad de la pulpa referente a lo que se obtiene con la secuencia tradicional $D_0EpD_1D_2$, económicamente es un buen resultado para la industria.

En la secuencia D_0EpD_1P es donde se obtiene mejores parámetros de calidad, tales como mayor viscosidad con un $984 \text{ cm}^3/\text{g}$, una menor reversión 1,7% y es una pulpa más estable por la especie de blanqueante utilizada, aunque el consumo de reactivo es más alto con un $30,1 \text{ kgCl}^-/\text{ADt}$, pero es una secuencia más económica por el uso del peróxido de hidrógeno.

Tabla11 Valor económico de los reactivos blanqueantes en una secuencia de blanqueo

Secuencias de blanqueo	Valor US\$/ADt
Secuencia de referencia $D_0EpD_1D_2$	20,3 dólares
Secuencia D_0EpD_1P	19,4 dólares
Secuencia $D_{hot}EpD_1P$	18,8 dólares
Secuencia D_0EpQD_1P	18,6 dólares
Secuencia $D_0EpD_1D_n$	20,0 dólares

En las secuencias de blanqueos los reactivos blanqueantes que se ocuparon son dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno. Cada reactivo tiene un valor, el dióxido de cloro su valor aproximadamente $2,0 \text{ US\$/kg}$ y peróxido de hidrogeno $0,8 \text{ US\$/kg}$. Por lo tanto realizar un blanqueo de diferentes secuencias tendría valores a los que se observan en la Tabla11.

Estos datos son muy importantes para la industria desde la perspectiva económica. En el caso de la secuencia D_0EpD_1P es la que más reactivo químico ocupa (Tabla10), pero no es la más cara, debido que se ocupa peróxido de hidrógeno en la última etapa en vez de dióxido de cloro que es más caro y ambientalmente no produce daño al medio ambiente según los parámetros analizados en esta tesis (DQO, Color, compuestos fenólicos). En este momento sale más caro seguir blanqueando con la secuencia que se ocupa hoy en día ($D_0EpD_1D_2$).

La caracterización del efluente de la secuencia referencial de blanqueo, permite evidenciar en qué condiciones sale del proceso de blanqueo. Analizando sus propiedades físico-químicas tales como; pH, DQO, color verdadero, conductividad y compuestos fenólicos totales.

Los compuestos que presentan alto peso molecular son cuantificados en la medición de DQO y en un valor elevado de color en el efluente, principalmente estos compuestos son residuos de lignina y su presencia se ve reflejada en las primeras etapas de la secuencia de blanqueo (D_0 y Ep). En la determinación del análisis de DQO se puede determinar todo el material orgánico ya sea biodegradable y no biodegradable de cada etapa de una secuencia de blanqueo.

En el estudio de esta tesis se comenzó con un DQO equivalente a 5,3 kg/ADT que es la que se obtiene en la secuencia referencial que se ocupa hoy en la industria. Se experimentó con la secuencia D_0EpD_1P obteniendo una disminución de 0,2 kg/ADT (3,6%) de materia orgánica en el efluente. En la secuencia $D_{hot}EpD_1P$ se obtuvo un aumento de 0,5 kg/ADT (9,4%) de materia orgánica al efluente de blanqueo.

La secuencia $D_0EpD_1D_n$ se obtuvo una disminución de 0,2 kg/ADT (3,8%) de aporte al efluente de materia orgánica y la secuencia D_0EpQD_1P fue la que mayor cantidad de materia orgánica aportó al efluente 0,3 kg/ADT (7,5%), pero no se obtuvieron grandes diferencias en las secuencias estudiadas al observar los resultados, aunque cada disminución que se pueda realizar en el proceso o en la secuencia de blanqueo es un aporte para el medio ambiente.

Las aguas (los filtrados de cada etapa de blanqueo), pueden estar coloridas debido a la presencia de iones metálicos naturales (hierro y manganeso), materia orgánica en el caso de la industria de celulosa que son componentes orgánicos de alto peso molecular con grupos cromóforos y contaminantes domésticos. El color que en el agua produce la materia suspendida y disuelta, se le denomina "Color aparente", una vez eliminado el material suspendido, el color remanente se le conoce como "Color verdadero" siendo este último el que se mide.

Se realizó medición de color verdadero al efluente de la secuencia referencial de blanqueo obteniendo 0,38 kg/ADT. Luego se experimentó con la secuencia de blanqueo D_0EpD_1P obteniendo una carga de color verdadero al efluente de 0,28 kg/ADT (26,3%), disminuyendo así en 0,1 kg/ADT, en un 26,3 % menos que la secuencia referencial. En el caso de la secuencia $D_{hot}EpD_1P$ se obtuvo 0,54 kg/ADT de carga de color verdadero, aumentando en 0,16 kg/ADT en el efluente en un 42,1% mayor a la secuencia utilizada hoy en día (referencial). En la secuencia de blanqueo $D_0EpD_1D_n$ se realizó la medición de color verdadero obteniendo 0,40 kg/ADT, siendo muy similar a la secuencia de referencia en 0,02 kg/ADT mayor, aumentando el color verdadero en 5,3% en el efluente. En la secuencia D_0EpQD_1P el valor de color verdadero es de 0,41 kg/ADT siendo 0,03 kg/ADT mayor, aumentando en 7,9% en el efluente.

La carga de color verdadero no tiene relación con el DQO lo podemos observar al ver los resultados, más bien en las secuencias en que se varió temperatura y pH es donde se obtiene mayor color verdadero.

Los compuestos fenólicos totales tienen relación con el color verdadero obtenido en las secuencias de blanqueo, debido a que estos compuestos pertenecen a la cadena de la lignina y el color del efluente es debido a la lignina eliminada en el blanqueo. La tendencia es la misma en las secuencias que hay mayor carga de color son las que tienen mayor cantidad de compuestos fenólicos totales.

En las secuencias que fueron blanqueadas con dióxido de cloro y etapas D_{hot} se obtiene mayor color 0,54 kg/ADT y en la misma secuencia ($D_{hot}EPD_1P$) se obtiene el mayor valor de compuestos fenólicos 98,1 mg/L.

La presencia de compuestos orgánicos, así como el color del efluente es atribuida principalmente a los derivados de la lignina y a la fracción de los compuestos extraíbles de la madera (Springer, 1993; Leonidas, 2004; Monsálvez, 2009). Los grupos fenólicos pertenecen a la cadena de la lignina la cual se va al efluente.

La lignina, es un biopolímero que contiene alrededor de 10-20% de grupos hidróxilo fenólicos que le confieren rigidez a la pared celular de las plantas y además las protege del ataque de organismos patógenos (Higuchi, 1990).

La conductividad se define como "la habilidad o poder de conducir o transmitir electricidad. El efluente analizado presenta iones que impactan en la dureza del agua como: Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} y otros provenientes de productos químicos usados en cada etapa de blanqueo (todo hidróxido, sales) son los que aumentan la conductividad, Adicionalmente se suman los compuestos orgánicos en cargas importantes que dan lugar a DQO. La conductividad de cada secuencia se ven algunas diferencias, esta aumenta cuando se trabaja con etapas P (D_0EpD_1P , $D_{hot}EpD_1P$, D_0EpQD_1P), es debido que se utiliza NaOH para justar pH, donde Na^+ es un buen ion conductor de electricidad. La conductividad nos permite saber cuan conductor es el efluente de electricidad.

8- CONCLUSION

Dado a los resultados obtenidos en la implementación de nuevas secuencias de blanqueo en pulpa de eucalipto se puede concluir que la secuencia de blanqueo D_0EpD_1P es una buena alternativa a implementar en la industria de celulosa, ya que con esta secuencia se puede obtener mejor calidad de la pulpa y menos impacto al medio ambiente según los parámetros estudiados en esta tesis (DQO, Color Verdadero, compuestos fenólicos totales y conductividad), aunque la disminución del DQO no varía en gran cantidad al compararla con la secuencia de referencia $D_0EpD_1D_2$.

El consumo de reactivos químicos y el tipo de blanqueante si afecta a la calidad de la pulpa de eucalipto, pero no aumenta la cantidad de materia orgánica en el efluente solo Parámetros como temperatura, pH y quelantes afectan al aumento de materia orgánica, Por lo tanto, se confirma la hipótesis parcialmente.

La cantidad de materia orgánica en el efluente es influenciada por los parámetros de Temperatura, pH y el uso de quelantes. Se observó que en las secuencias estudiadas no hay grandes diferencias de la cantidad de materia orgánica en el efluente al comprarlas con la secuencia de referencia ($D_0EpD_1D_2$), solo se podría mencionar la secuencia D_0EpQD_1P la cual aumento en un 9,4 % la cantidad de materia orgánica por el uso de Quelantes.

9. REFERENCIAS

Ali, M., Sreerishnan, T. 2001. Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. *Advances in Environmental Research* 5(2):175-196.

Arias, R.A. 2001. Obtención de celulosa de alta blancura a partir de pino y eucalipto. Informe de memoria de título para optar al título de ingeniero civil químico, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 68 (+22) pp.

ATCP. 2011. Producción de pulpa 2006-2007. Adquirido desde: <http://www.atcp.cl/PDFs/ProdPulpa2006.pdf>.

Belmonte, M., Calderón, M., Chamorro, S., Videla, S. y Vidal, G. 2006. Gestión ambiental de la industria de celulosa en Chile. XXX Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Punta del Este (Uruguay), 27-30 Noviembre.

BCN. 2012. Normativas Chilenas de residuos líquidos. Adquirido desde: <http://www.leychile.cl/Consulta>.

BRACELPA. 2011. Publicación mensual de la asociación Brasileña de celulosa y papel. Adquirido desde: [http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=no de/188](http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=no+de/188).

Celulosa Arauco. 2012. Producto celulosa, Adquirido desde: http://www.Arauco.cl/informacion.asp?idq=697&parent=688&ca_submenu=196&tipo=3&idioma=17.

CERTFOR, 2005. Reporte de Auditoria CMPC Celulosa S.A.-SGS Chile-Ltda. www.sgs.cl

Chang, W., Hua, W. and Qian, Y. 2005. Influence of carrier concentration on the performance and microbial characteristic of a suspended carrier biofilm reactor. *Process Biochemistry*. 40(9):2992-3001.

Ciputra, S., Antony, A., Phillips, R., Richardson, D. and Leslie, G. 2010. Comparison of treatment options for removal of recalcitrant dissolved organic matter from paper mill effluent. *Chemosphere* 81(1):86-91.

Corporación Nacional de la Madera CORMA. 2005. Corporación Chilena de la Madera A.G. Relevancia de la industria de celulosa en Chile. 8 pp.

CORMA. 2005. Relevancia de la industria de la celulosa en Chile. Adquirido desde: <http://www.cormabiobio.cl/informes/documentos/Plan%20Comunicacional/Industria%20Celulosa%20en%20Chile.pdf>. 8 pp.

CORMA. 2009. ¿Hacia dónde va la industria forestal chilena? La Industria de la Celulosa. Adquirido desde: http://www.aipef.cl/subir/industria_celulosa_Guillermo_mullins.pdf. 44 pp.

CORMA. 2010. Panorama de la Celulosa. Sinopsis de la industria, mercados y Proyecciones. Adquirido desde: http://www.corma.cl/_file/file_405_82590_arauco-franco_bozzalla.pdf. 50 pp.

Colodette, L., Gomide, J., Argyropoulos, D., Robles, M., Almeida, M., Melhman, K., Debrito, G.H. 1999. Effect of pulping processes on bleachability with ECF, Z-ECF y TCF bleaching. *Appita J.* 52(5):368-374.

Costa, M.M., Santos C.A., Garcia, J.C., Barberá, L., Vilaseca, F., Pelach M.A., Mutje, P., and Colodette, J.L. 2009. Low environmental impact bleaching sequences for attaining high brightness level with eucalyptus spp pulp 26 (1):11-22.

Costa, M.M., and Colodette J.L. 2007. The impact of kappa number composition on eucalyptus kraft pulp bleachability. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 24(1):61-71.

Chamorro, S., Monsalvez, E., Hernández, V., Becerra, J., Mondaca, M., Piña, B. and Vidal, G. 2010. Detection of estrogenic activity from kraft mill effluents by Yeast Estrogen Screen. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 84(2):165-169.

Chamorro, S., Xavier, C. and Vidal, G. 2005. Behavior of Aromatic Compounds Contained in Kraft Mill Effluents Treated by Aerated Lagoon. *Biotechnology Progress*, 21(5):1567-1571.

Chamorro, S., 2011. Evaluación de la actividad estrogénica presente en efluentes de celulosa Kraft, tratados mediante un sistema biológico, a través de ensayos con *Saccharomyces cerevisiae* recombinante y *Daphnia magna*. Memoria para optar al título Doctor en Ciencias Ambientales con Mención en Calidad de agua y Conservación de Sistemas Acuáticos Continentales. Centro EULA - Chile, Universidad de Concepción. 182 pp.

Diez, M. C., Castillo, G., Aguilar, L., Vidal, G. y Mora, M. L. 2002. Operational factors and nutrients effect on activated sludge treatment for phenolic compounds degradation from *Pinus radiata* kraft mill effluents. *Bioresource Technol.* 83(2):132-138.

Erias, K. and Colodette, J.L. 2003. Eucalyptus kraft pulp bleaching with chlorine dioxide at high temperature. *Journal of pulp and paper science* 29(2):64-69.

F. Potucek., and M. Milichovsky 2000. Kraft pulp Bleaching with Hydrogen Peroxide and Peracetic acid. 54(6a):406-411.

Fundación Terram. 2012. Evaluación de los impactos de la producción de celulosa. Desde: [http://www.terram.cl/images/stories/app4evalauciondelosimpactosdela producciondecelulosa.pdf](http://www.terram.cl/images/stories/app4evalauciondelosimpactosdelaproducciondecelulosa.pdf).

Germgard, U., Boren, I., Aleksic, S. 2003. Formation of dissolved high molecular organic substances in the bleaching of softwood kraft pulp. *Tappi Journal* 2(12):16-20.

Gimeno. E., 2004. Compuestos fenólicos Un análisis de sus beneficios para la salud. 23(06):80-84.

Higuchi, T. 1990. Lignin biochemistry: biosynthesis and biodegradation. *Wood Sci. Technol.* 24(1):23-63.

Gross. TS., NJ. Kernaghan,. DS. Ruessler & Se Holm. 2000. An evaluation of the potential effects of papermill effluents on freshwater mussels. Pp 253-257 en: *Proceedings, 4th International Conference on the Environmental Impacts of the Pulp and Paper Industry*. Ruoppa, M; J Passivirta; KJ Lehtinen & S Ruonala (eds.). Report 417. June 12-15, Helsinki, Finland.

<http://www.reciclapapel.org/htm/info/tecnica/ciclo/impacto2.htm>

<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/materias.htm>

<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/celulosa.htm>

<http://www.monografias.com/trabajos15/composicion-madera/composicion-madera.shtml>

<http://quimica.laguia2000.com/elementos-quimicos/lignina-%E2%80%93-la-quimica-de-la-madera>

http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1667782X2008000300004&script=sci_arttext.

http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/CH10034_Belmonte.pdf

INFOR. 2012. Producción de celulosa 1979-2010. Adquirido desde: http://www.infor.cl/archivos/series_estadisticas/Produccion_y_Consumo/produccion4.pdf.

Lachenal, D., & Chirat, C. 2000. High temperature chlorine dioxide bleaching of hardwood kraft pulp. *Tappi Journal* 83 (8):96-101.

Lapierre, I., Bouchard, J., Berry, R. 2003. The Effect of Magnesium Ions and Chelants on Peroxide Bleaching. *Holzforschung* 57(6):627-633.

Leporini Filho, C., Suess, H. Hydrogen peroxide in chemical pulp bleaching. *Congreso Iberoamericano de investigación en celulosa y papel* 2002:1-26.

Pokhrel, D., and Viraraghavan, T. 2004. Treatment of pulp and paper mill wastewater- a review. *Science Total of Environment* 333(1-3):37-58.

Rapson. W.H. 1956. The Role of pH in Bleaching pulp. *Tappi J.* 39(5):284-295.

Rosemarin, A., Lehtinen, K.J., Notini, M., Mattsson, J. 1994. Effects of pulp mill chlorate on Baltic Sea algae 85(1):3-13.

Silva, M., Lopes, O., Colodette, J., Porto, O., Rieumont, J., Chaussy, D., Belgacemd, M., Silva, G. 2008. Characterization of three non-product materials from a bleached eucalyptus kraft pulp mill, in view of valorizing them as a source of cellulose fibres *Industrial crops and products* 27(3):288-295.

Vidal, G., Belmonte, M., Calderón, M., y Chamorro S., 2007. Significativos avances ambientales registrados en Chile en la industria de celulosa kraft blanqueada. *Induambiente* 15(87):6-30.

Vidal, G., 1999. Revisión bibliográfica sobre los compuestos orgánicos producidos en la industria de la pasta y el papel: Incidencia en la toxicidad y biodegradabilidad anaerobia de sus efluentes. *Afinidad LVI* (481):152-159.

Villamar, C., Jarpa, M., Decap, J. and Vidal, G., 2009. Aerobic moving bed bioreactor performance: a comparative study of removal efficiencies of kraft mill effluents from *Pinus radiata* and *Eucalyptus globules* as raw material. *Water Science and Technology* 59(3):507-514.

Vourinen. T., Buchert. J., Teleman. A., Tenkanen. M., and Fagerström. P. Pulp Bleaching Conf., April 14-18 1996, Washington D.C.; pp. 43-54. Selective Hydrolysis of Hexenuronic acid groups and its application in ECF and TCF bleaching of Kraft pulps.

Xavier, C., 2006. Influencia de la tecnología de tratamiento en la eliminación de fitoesteroides contenidos en efluentes de celulosa kraft y en la toxicidad de estos compuestos en organismos acuáticos, y de genotoxicidad en organismos bacterianos. Tesis doctoral, Universidad de Concepción, Centro EULA-CHILE, 165 pp.

Zambrano, M., Freer, J., Baeza, J., Villarroel, M., and Vidal, G. 2007. Using a second-order polynomial model to determine the optimum dregs/bark ratio for industrial-biosolid composting: the initial conditioning stage, *Waste Management & Research*, 25(4):319-326.

Zaror, C., 2002. Introducción a la Ingeniería Ambiental para la industria de procesos. Universidad de Concepción, Concepción, Chile 613 pp.

Zhi-Hua, J, and Berry, R. 2011. Near-neutral final chlorine Dioxide brightening: theory and practice. Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes 1(1):14-20.

10. ANEXOS

Figura 20 Composición de la Madera

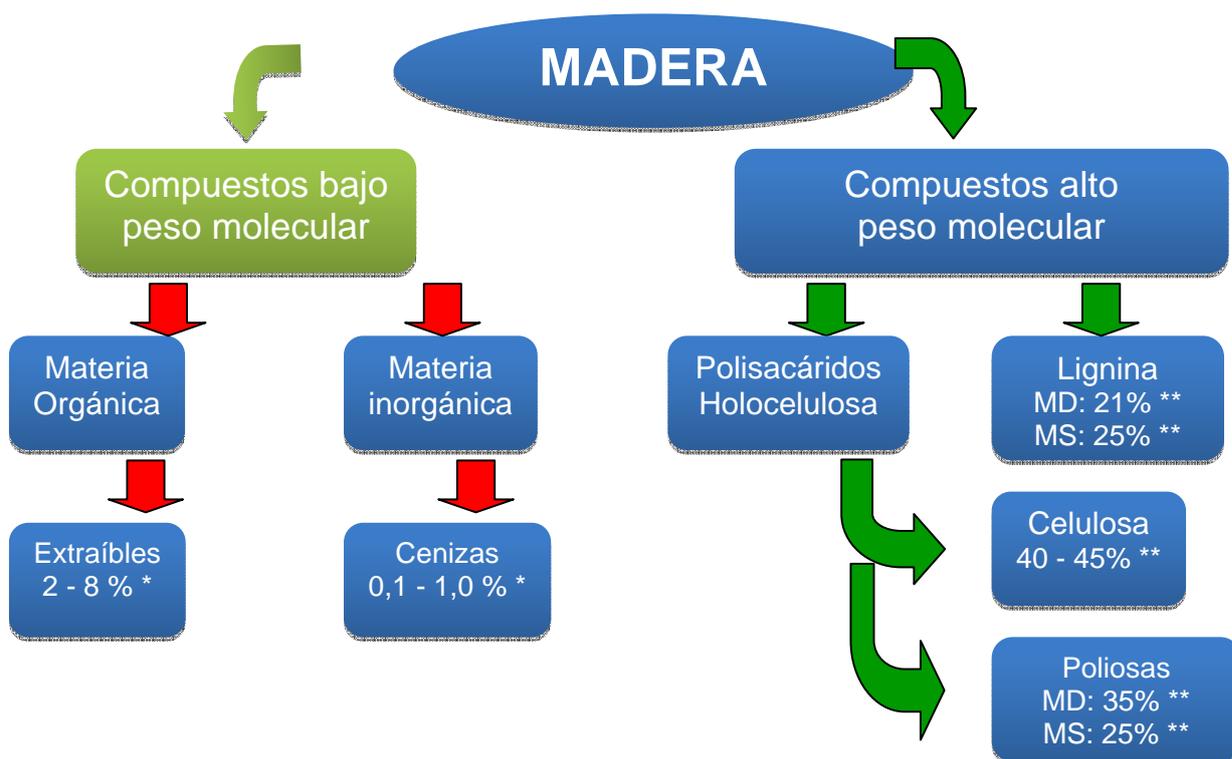
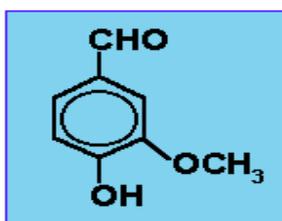


Tabla12 Especies derivadas del cloro presentes en blanqueo

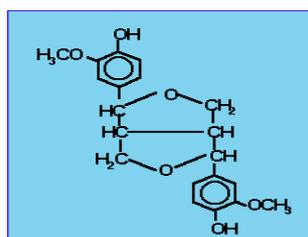
HClO_4 (ác. perclórico) \leftrightarrow ClO_4^- (perclorato) + H^+
HClO_3 (ác. clórico) \leftrightarrow ClO_3^- (clorato) + H^+
HClO_2 (ác. cloroso) \leftrightarrow ClO_2^- (clorito) + H^+
HClO (ác. hipocloroso) \leftrightarrow ClO^- (hipoclorito) + H^+
Cl_2 (cloro elemental)
HCl (ác. clorhídrico) \leftrightarrow Cl^- (clorato) + H^+
Cl^+ (cloronio) – especie transciente inestable

Compuestos fenólicos

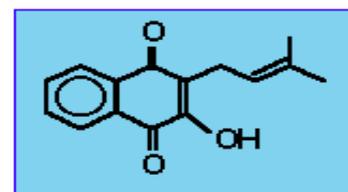
Todos estos compuestos se originan como subproductos de la biosíntesis de la lignina. Se encuentran fenoles sencillos, lignanos, estilbenos, flavonoides, quinonas y polifenoles poliméricos Y se caracterizan por poseer uno o más fenoles en su estructura.



Vainillina



Pinoresinol



Lapacol

Figura 21 Esquema de la industria de celulosa

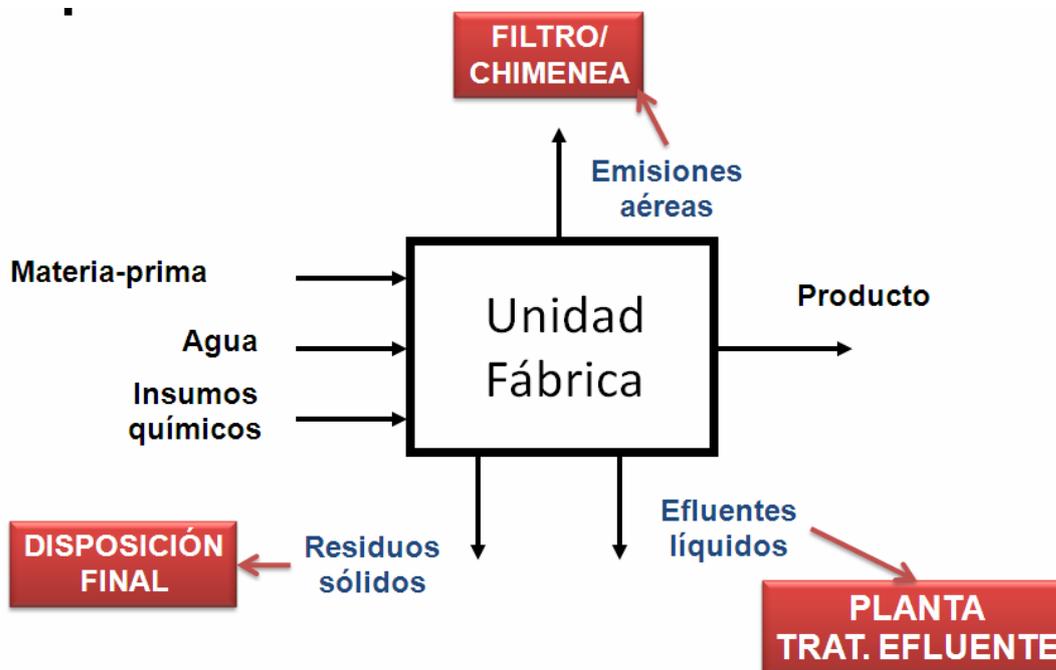


Tabla 13 Consumo de Agua de la industria de celulosa

<u>Año</u>	<u>m³/tsa</u>
1959	240
1969	156
1975	111
1979	96
1985	79
1988	72
1999	60
2007	25

REEVE, 1999

Figura 22 Planta de tratamiento de efluentes

