



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES
EULA-CHILE

Utilización de dregs y grits provenientes de la industria de celulosa Kraft en la estabilización de biosólidos originados en el tratamiento de aguas servidas:

Aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero ambiental

MARIANELA MARLENE SOLEDAD GRANDÓN GONZÁLEZ

CONCEPCION (Chile), 2011



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION



CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES
EULA-CHILE

Utilización de dregs y grits provenientes de la industria de celulosa Kraft en la estabilización de biosólidos originados en el tratamiento de aguas servidas:

Aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero ambiental

Alumno: Marianela Marlene Soledad Grandón González

Profesor guía: Dra. Gladys Cecilia Vidal Sáez

CONCEPCION (Chile), 2011

INDICE

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
1 INTRODUCCION	9
2 HIPOTESIS	12
3 OBJETIVOS	12
3.1 Objetivo general	12
3.2 Objetivos específicos.....	12
4 ANTECEDENTES	13
4.1 Producción de celulosa	13
4.1.1 Proceso productivo Kraft y generación de residuos	17
4.1.2 Recuperación química: Producción de Dregs y Grits.	21
4.1.3 Alternativas de manejo	24
4.1.4 Realidad regional.....	25
4.2 Tratamiento de aguas servidas	27
4.2.1 Descripción del proceso	28
4.2.2 Tipos de tecnologías	31
4.2.2.1 Lodos activados.....	33
4.2.2.2 Lagunas de estabilización	34
4.2.2.3 Lagunas aireadas	34
4.2.2.4 Emisarios submarinos	34
4.2.3 Producción de lodos.....	35
4.2.4 Estabilización de biosólidos.....	37
4.2.5 Estabilización alcalina	38
4.2.6 Caracterización de biosólidos y sus alternativas de manejo	41

4.2.6.1	Caracterización.....	41
4.2.6.2	Alternativas de manejo	45
4.2.7	Realidad regional.....	47
4.3	Aspectos legales	50
4.4	Evaluación de proyectos	54
5	METODOLOGIA.....	58
6	RESULTADOS Y DISCUSION.....	65
6.1	Caracterización de dregs y grits de la industria de celulosa Kraft	65
6.2	Producción regional de dregs y grits provenientes de la industria de celulosa Kraft.....	70
6.3	Producción regional de biosólidos y necesidades de cal.....	71
6.4	Proceso de neutralización de biosólidos mediante la aplicación de dregs y grits	77
6.5	Análisis económico.....	78
6.5.1	Análisis situación actual	78
6.5.2	Análisis escenario 1.....	80
6.5.3	Análisis escenario 2.....	80
7	CONCLUSIONES.....	81
8	BIBLIOGRAFIA	82

Índice de Figuras

Pág.

Figura 1. Proceso productivo y Residuos generados en el proceso de producción de celulosa Kraft	15
Figura 2. Patio de acopio y astillado de la madera	16
Figura 3. Descortezador de madera	17
Figura 4. Corteza sucia	17
Figura 5. Lodos de preparación de madera	17
Figura 6. Digestores	18
Figura 8. Línea de embalaje	20
Figura 7. Mezcla de lodos de tratamiento de efluentes	20
Figura 9. Recuperación química y residuos generados	23
Figura 10. Plantas productoras de celulosa Kraft en la región del Biobío	26
Figura 11. Esquema general de tratamiento de aguas servidas.	29
Figura 12. Tipos de tratamientos biológicos	32
Figura 13. Tratamiento de lodos	39
Figura 14. Tratamiento de lodos con cal.	41
Figura 15. Disposición final de biosólidos	45
Figura 16. Distribución geográfica de plantas de tratamiento de lodos activados en la Región del Biobío.	49
Figura 17. Región del Biobío y sus provincias	56
Figura 18. Funcionamiento y rendimiento de la recuperación de reactivos	58
Figura 19. Acumulado mensual de biosólidos en la Región del Biobío para diferentes años	72
Figura 20. Biosólidos generados en la Región del Biobío.	74
Figura 21. Cantidad de Biosólidos estabilizados en escenario futuro	75

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1. Productores de celulosa a nivel mundial en 2009.	12
Tabla 2. Producción de pulpa 2006 – 2007.....	13
Tabla 3. Producción de celulosa Kraft en la Región del Biobío	27
Tabla 4. Evolución de los tipos de tecnologías en Chile	33
Tabla 5. Tipos de lodos generados durante el tratamiento de aguas servidas	35
Tabla 6. Cantidad de cal utilizada en la estabilización.	41
Tabla 7. Caracterización de lodos activados	42
Tabla 8. Estabilización alcalina de lodos de acuerdo a clasificación sanitaria.	52
Tabla 9. Concentraciones máximas de metales pesados en lodos.	53
Tabla 10. Costos de operación.....	63
Tabla 11. Caracterización físico química de los dregs.	68
Tabla 12. Caracterización físico-química de los grits.	69
Tabla 13. Cuantificación de dregs y grits en la Región del Biobío.....	70
Tabla 14. Producción de biosólidos y necesidad de cal para su neutralización.	73
Tabla 15. Cantidad de biosólidos a estabilizar en escenario futuro y requerimiento de cal.....	76
Tabla 16. Costos de operación mensual asociados a escenario actual	79
Tabla 17. Costos anuales y VAC para cada una de las productoras de celulosa ..	79

AGRADECIMIENTOS

En lo familiar, quisiera comenzar agradeciendo a mis padres, Marianela y Omar por la confianza entregada y el apoyo brindado en cada una de las etapas cursadas a lo largo de mi vida. A mi hermana Carolina y a Emilio quienes son el ejemplo a seguir en cada uno de mis actos, tanto en lo personal como en los futuros retos laborales. No puedo dejar de mencionar a Vicente, la alegría de nuestras vidas, siendo la personita que diariamente me entrega una sonrisa y me enseña que siempre hay tiempo para jugar. A mi familia en general muchas gracias.

De forma muy especial agradecer a Francisco por su incondicional compañía, apoyándome y aconsejándome durante todo este proceso. Apoyo y compañía que quiero, me acompañen siempre.

A mis amigas Paula, Alejandra, Waleska, Patricia, Viviana, Karen, Yesenia y Marcela quienes supieron entender que cada vez adquiría una mayor responsabilidad y menor tiempo para compartir.

Agradezco a la Dra. Gladys Vidal por la enseñanza entregada y al grupo de ingeniería y biotecnología ambiental (GIBA) que lidera, por el apoyo brindado, la preocupación y los buenos momentos compartidos. Especialmente a Soledad, María Cecilia, María José, Gerardo, Juan Pablo y Leonardo. Además agradecer a Dra. Ana Rezende y a Jorge Castañeda quienes en algún momento pertenecieron a él.

A mis compañeros Miguel, Verónica, Raúl, José Miguel, Natalia, Paz, Samuel, Jaime, Soledad, Pablo y Bastian por el constante apoyo e intercambio de vivencias a lo largo de este proceso, las cuales nos han permitido llegar al final de esta etapa.

A mis profesores, especialmente al Dr. Roberto Urrutia, Dra. Carolina Baeza, Dr. Diego Caamaño y por ultimo al Dr. Jorge Jiménez quienes aparte de entregar sus conocimientos académicos dentro de la sala de clase, fuera de ella siempre

tuvieron palabras de motivación, consejos o un reto que hicieron retomar el camino nuevamente.

Por último me gustaría agradecer a todos los Funcionarios del Centro Eula- Chile por el trato para conmigo durante todos los años que me forme profesionalmente en él. Especialmente a Andreita, tia Yeli, tio Guillermo, tio Humberto, tio Héctor, tio Waldo, don Fernando, Jorge y Angelo por el buenos días y la sonrisa entregada cada mañana durante todos los días.

RESUMEN

El proceso unitario de digestión de la madera en la producción de celulosa Kraft, genera residuos sólidos llamados *dregs* y *grits*. Estos son inorgánicos y específicamente se generan durante la recuperación de los reactivos, con la finalidad de recircularlos al proceso. En la Región del Biobío, éstos tienen origen en cuatro plantas de producción de celulosa y generalmente son dispuestos en vertederos provocando un problema a las empresas productoras, por espacio utilizado y desembolso en dinero que significa su disposición. De acuerdo a este escenario, se presentó la opción de utilizar estos residuos en la neutralización de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) de la Región del Biobío, específicamente aquellos provenientes de la tecnología de lodos activados, por su gran cobertura en la región, la que corresponde a un 72%..

La alternativa propuesta abre oportunidades y mercados asociados, disminuyendo el impacto que éstos tienen al tomar contacto con el medio. Es por lo anterior, que en este estudio se analizó el proceso de neutralización de biosólidos como solución al problema presentado y determinar así, un escenario que presente soluciones. Para llevar a cabo lo anterior, se cuantificó las cantidades de los distintos residuos generados por parte del sector celulósico (*dregs* y *grits*) y sanitario (biosólidos), se evaluó la reacción de neutralización entre ambos residuos y cantidad de metales presentes en la mezcla final, para finalmente evaluar y comparar económicamente la práctica actual versus la opción presentada mediante los costos y beneficios obtenidos.

De los resultados se concluye.....

Palabras claves: *Recuperación química, dregs, grits, biosólidos, estabilización alcalina.*

1 INTRODUCCION

El desarrollo de la industria de la celulosa a nivel mundial está directamente relacionado con el crecimiento de la población, aumentando la demanda y por ende el requerimiento de madera para dicho fin. Este desarrollo se produce mayoritariamente en países donde existen condiciones climáticas aptas para el crecimiento de la masa forestal, siendo algunos de ellos Chile, Indonesia, Brasil, Sudáfrica, entre otros (CEPAL, 2005; CORMA, 2005).

En Chile, la producción para el año 2009 consistió en 5,0 millones de toneladas de celulosa al año, siendo el décimo productor de celulosa a nivel mundial (Bracelpa, 2009). La materia prima utilizada corresponde principalmente a *Pino radiata* y *Eucaliptus globulus*, la que proviene directamente de las plantaciones forestales como rollizo o como astillas desde los aserraderos. Es importante destacar que la Región del Biobío aporta un 67% de producción del total nacional (Celis *et al.*, 2010; Venegas, 2003).

Todo proceso productivo y específicamente aquellos asociados a la producción de pulpa y papel generan residuos, ya sean líquidos, sólidos o gaseosos, los que corresponden a aspectos ambientales de creciente preocupación a nivel mundial (Magrama, 2006). Es por lo anterior que el constante crecimiento en la producción, consecuentemente genera un inevitable aumento en la cantidad de residuos, los cuales corresponden a la fracción de la materia prima no útil para el proceso y residuos, producto de la transformación de las mismas. Este aumento de residuos, se transforma en un problema por el espacio y dinero destinado para su disposición, los que se depositan en un medio con límites a su capacidad de absorción, los llamados vertederos (Doldán & Chas, 2001). Siendo además, una pérdida de materiales y energía para la industria que requiere del proceso, obligando a las mismas a invertir en su reducción y manejo (Gullichsen & Paulapuro, 1998; Freeman, 1998). Bajo este escenario, para las industrias resulta económicamente viable reducir la producción de residuos (Mahmood and Elliott, 2006) o buscar alguna alternativa de manejo.

Para la obtención de la celulosa comercial durante el proceso productivo, se debe separar la celulosa de la lignina, componentes ambas de la madera. Actualmente, se conocen diferentes métodos para su producción tales como el mecánico, semiquímico y químico (Freeman, 1998). El proceso químico corresponde al denominado proceso Kraft, el cual es dominante a nivel mundial, teniendo una cobertura de un 80%. Lo anterior debido a las propiedades de resistencia que presenta la pulpa obtenida y a su aplicación a una gran variedad de especies (Magrama, 2006).

La característica del proceso Kraft, corresponde a la remoción de la lignina presente en la madera, mediante agentes químicos más presión y calor. Esto ocurre en el proceso unitario llamado digestión, donde se procede a la cocción de la madera en una solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S) llamada licor blanco (Zaror, 2002). Este tipo de proceso cuenta con un sistema de recuperación de reactivos en donde se produce un alto grado de recuperación de sustancias químicas. Estas sustancias corresponden al licor blanco, el cual se transforma en licor negro (licor blanco mas lignina) luego de la remoción sufriendo una serie de transformaciones, para posteriormente obtener nuevamente licor blanco y reutilizarlo en el proceso (Arauco, 2010). Sin embargo, durante esta recuperación inevitablemente se generan residuos, llamados residuos de licor verde y lodos de cal, conocidos como dregs y grits respectivamente. Estos residuos son inorgánicos y no peligrosos, los que actualmente no tienen ningún valor comercial. Dentro de las características que poseen se encuentran un gran porcentaje de calcio, baja cantidad de metales pesados y un alto poder alcalino al contar con un rango de pH de 12 - 13. Estas características han permitido su utilización tanto como sustitutos en materiales de construcción y como correctores de pH, actuando como neutralizantes en suelos ácidos y residuos ácidos provenientes de la minería, siendo comparados con la cal comercial por los resultados que se obtienen en cada una de las aplicaciones (Castillo, 2008; Gullichen & Paulapuro 1998; Zambrano *et al.*, 2005; Machado *et al.*, 2007; Cabral *et al.*, 2008; Manskinen *et al.*, 2011;). Por todo lo anterior, entonces se presenta

como opción la utilización de estos residuos en la neutralización biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS).

Si bien existen distintas tecnologías para el tratamiento de aguas servidas, aquella que mayor cobertura tiene tanto a nivel nacional como regional, es la tecnología de lodos activados. Esta tecnología versus las otras existentes genera una mayor cantidad de biosólidos, lo cual ocurre en forma periódica. La gran cantidad de biosólidos generados resulta un problema ya que requiere demasiado espacio para disposición (SISS, 2010a). Dentro de las características de los biosólidos se tienen características físicas como la humedad, químicas como la presencia de metales pesados y nutrientes y por último, las biológicas referida a la presencia de microorganismos. Siendo este último, un parámetro de interés sanitario (Cortez, 2003). Todo lo anterior, definirá la valoración de éstos en diferentes áreas, siendo la más estudiada la aplicación al suelo. Aplicación que en Chile comenzó a tomar fuerza con la entrada en vigencia del D.S.4/2009 (Baraño y Tapia, 2004; Diocaretz y Vidal y Vidal, 2009; SISS, 2010a; EPA, 2000a; MMA, 2009). Sin embargo, para llevarse a cabo se deben cumplir una serie de requisitos ambientales como lo son, cantidad máxima de microorganismos, metales pesados, pH entre otros (MMA, 2009), lo que recibe el nombre de estabilización.

Existen diversos métodos para estabilizar los biosólidos, como lo son la digestión (aeróbica y anaeróbica), secado térmico, compostaje y neutralización alcalina. Este último es el método de menor costo y más fácil de utilizar, al necesitar espacios reducidos para su operación (Torres *et al.*, 2005). El objetivo de esta neutralización es minimizar la generación de olores ofensivos, destruir agentes patógenos y finalmente, reducir las probabilidades de atracción de vectores por el potencial de putrefacción mediante la aplicación de cal (EPA, 2000a; Metcalf & Eddy, 1995; MMA, 2009).

2 HIPOTESIS

La utilización de dregs y grits provenientes de la industria de celulosa Kraft en la estabilización de biosólidos originados en el tratamiento de aguas servidas, resulta factible técnica, económica y ambientalmente en relación a su disposición actual en vertederos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar aspectos técnicos, económicos y ambientales del proceso de estabilización de biosólidos generados en el tratamiento de aguas servidas mediante la adición de dregs y grits generado por la industria de celulosa Kraft.

3.2 Objetivos específicos

3.2.1 Evaluar la caracterización y cuantificación de dregs y grits producidos por una planta de celulosa Kraft.

3.2.2 Evaluar las necesidades regionales de uso de un agente estabilizador para los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas.

3.2.3 Estudiar el proceso de neutralización de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas servidas y proponer el reemplazo del agente estabilizador (Ca) por dregs y grits.

3.2.4 Analizar la viabilidad económica de la alternativa propuesta.

4 ANTECEDENTES

4.1 Producción de celulosa

La producción de celulosa a nivel mundial cuenta con un ranking de países productores presentados en la **Tabla 1**, de los cuales Estados Unidos es el mayor productor con un total de 48,3 millones de toneladas anuales. Cabe destacar que existen dos países latinoamericanos insertos dentro de este ranking, Brasil en un tercer lugar y Chile con el lugar número diez, siendo la producción de éstos de 13,3 y 5,0 millones de toneladas anuales respectivamente hasta el año 2009.

En los últimos años, países en desarrollo tales como Brasil, Chile, Indonesia, Sudáfrica, entre otros, han incrementado la producción de celulosa y el comercio mundial. Esto se debe principalmente a las condiciones climáticas aptas para el desarrollo de la masa forestal, lo que es una ventaja para llevar a cabo dicho incremento, esto además ha sido apoyado por políticas públicas, siendo de gran importancia y determinantes para el desarrollo y crecimiento de la industria (CEPAL, 2005; Katz *et al.*, 1999).

Tabla 1. Productores de celulosa a nivel mundial en 2009.

País	Producción (ton/año)
Estados Unidos	48.329.000
China	20.813.000
Canadá	17.079.000
Brasil	13.315.000
Suecia	11.463.000
Finlandia	9.003.000
Japón	8.506.000
Rusia	7.235.000
Indonesia	5.971.000
Chile	5.000.000
India	3.803.000
Alemania	2.542.000
Resto del Mundo	24.898.000
TOTAL	177.957.000

Fuente: Bracelpa, 2011.

En Chile, esta industria se ve ampliamente favorecida debido a que el país posee ventajas naturales debido a factores tales como clima, suelo y pluviometría que le ha permitido un óptimo desarrollo de plantaciones forestales, transformando a las industrias de celulosa en un rubro dinámico a nivel nacional. Esta industria utiliza principalmente como materia prima *Pinus radiata* y *Eucaliptus globulus*, requiriendo grandes volúmenes de madera para la producción. Ambas especies provienen de cultivos forestales y de los subproductos derivados de las plantas de aserrío y remanufacturas de madera. Por esto 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) (Celis *et al.*, 2010; Venegas, 2003).

La demanda de celulosa y por ende el requerimiento de madera, están relacionados directamente con el crecimiento de la población mundial la cual crece

a una tasa de 3% anual (CORMA, 2005). La producción de celulosa en el país se encuentra concentrada en dos grandes empresas, las que corresponden a Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones (CMPC S.A.) y Arauco y Constitución S.A. con un nivel de producción al año 2007 de 2,3 millones de toneladas y 2,6 millones de toneladas al año respectivamente (ATCP, 2011). En la **Tabla 2** se muestran las tecnologías y la cantidad de pulpa producida por las plantas de las empresas mencionadas.

Tabla 2. Producción de pulpa 2006 – 2007.

Empresa	Propietarios	Plantas	Tecnología	Producción (ton/año)
CMPC S.A.	Inversiones y empresas CMPC S.A.	Laja	BSKP - UKP	320.000
		Pacífico	BSKP	380.000
		Santa Fe I	BEKP	340.000
		Santa Fe II	BEKP	780.000
		INFORSA	MECANICA	200.000
		Maule	MECANICA	300.000
		Valdivia	MECANICA	60.000
Arauco y Constitución S.A.	Empresas COPEC (Angelini y Carter Holt Harvey)	Arauco I	BSKP - BEKP	260.000
		Arauco II	BSKP	470.000
		CELCO	UKP	310.000
		Licancel	BSKP	110.000
		Valdivia	BSKP - BEKP	600.000
		Nueva aldea	BSKP - BEKP	856.000

BSKP: Bleached softwood Kraft pulp (Pulpa Kraft blanqueada fibra larga); UKP: Unbleached Kraft pulp (Pulpa Kraft sin blanquear); BEKP: Bleached eucalyptus Kraft pulp (Pulpa blanqueada de eucalipto).

Para el año 2005, la forma en que los cultivos forestales se distribuían en el país para las diferentes actividades del área, correspondía a un 46% para la industria de la celulosa y papel, 46% para la industria de los aserraderos y remanufactura y 8% como combustibles (CORMA, 2005).

En cuanto a la producción de celulosa propiamente tal, se tienen datos desde 1970. El crecimiento en la producción de celulosa varió de 325,5 miles de toneladas a 4.992,5 miles de toneladas generadas en el país (pulpa mecánica y química) en el periodo 1970 - 2009. Desde 1970 hasta 1989, la generación de pulpa fue solo mecánica y varía de 325.000 toneladas a 841.000 toneladas. Ya en el año 1990, el país comienza a producir pulpa química, que en conjunto con la pulpa mecánica, genera en el primer año de funcionamiento 804.000 toneladas hasta llegar aproximadamente los 5,0 millones de toneladas para el año 2009 (INFOR, 2011).

En el año 2006, se observa un aumento considerable en la producción de celulosa, como resultado de la puesta en marcha de la celulosa Arauco Nueva Aldea. Durante el primer año de operación, esta planta produjo 856.000 toneladas de celulosa, superando ampliamente al mayor productor de ese momento CMPC – Santa Fe II que producía 780.000 de toneladas anuales (ATCP, 2011). Esta producción se encuentra estrechamente relacionada con la ubicación estratégica de las plantas de producción, concentrándose en la zona centro sur y sur del país, es decir, entre la Región del Maule y la Región de los Lagos, optimizando los costos de transporte de materia prima y la distancia hacia los puertos de embarques para su posterior exportación (Luraschi, 2007).

4.1.1 Proceso productivo Kraft y generación de residuos

El proceso de producción de la celulosa Kraft consta de varias etapas, las que corresponden a preparación de la madera, pulpaje o digestión, lavado y deslignificación, blanqueo, hasta llegar a la disposición final. Sin embargo, en este tipo de proceso se producen diversos flujos de desechos presentados en la **Figura**

1, los cuales pueden ser gaseosos, particulados, líquidos y sólidos (Davis, 2000; Freeman, 1998).

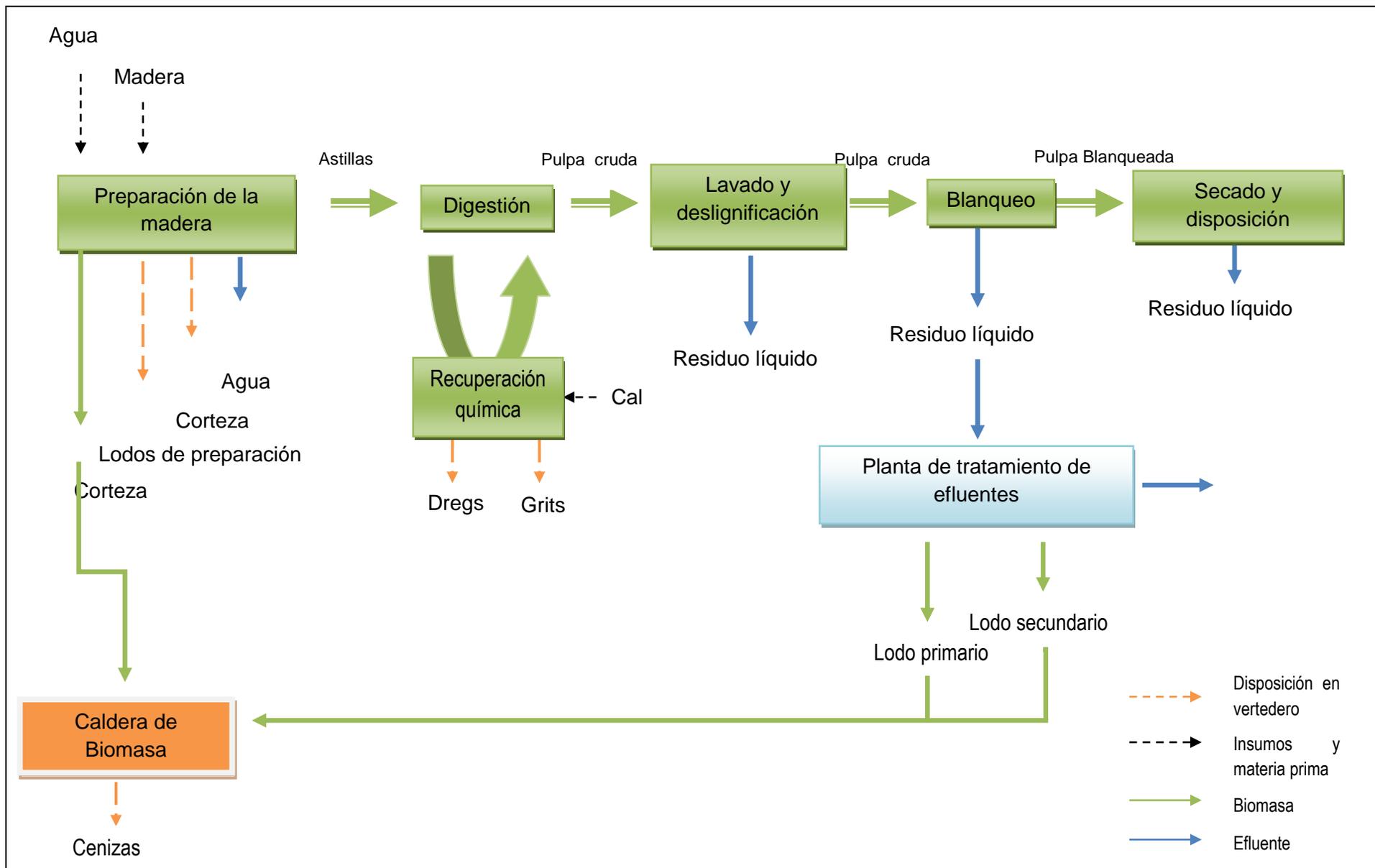


Figura 1. Proceso productivo y Residuos generados en el proceso de producción de celulosa Kraft (Arauco, 2010).

- Preparación de la madera

El proceso de preparación de la madera abarca desde el momento en que la materia prima llega a la industria, donde se acopia en canchas (ARAUCO, 2010). Luego se transforma físicamente, descortezando los rollizos y luego astillandolos, tal como se muestra en la **Figura 2 y Figura 3** (Davis, 2000). De acuerdo a lo anterior, los residuos sólidos generados en esta etapa son orgánicos y corresponden a las partes no utilizables de las materias primas, como las cortezas. Dichas cortezas obtenidas se diferencian en limpias, generadas en el descortezado y sucias, las generadas en el patio de acopio. Como se muestra en la **Figura 4**, las cortezas sucias se caracterizan por la gran cantidad de piedras e impurezas que poseen. Cabe destacar, que se generan también sólidos secundarios correspondientes a lodos de preparación de madera, los que se pueden apreciar en la **Figura 5**. Estos lodos provienen del tratamiento del agua utilizada en el riego de los rollizos durante su acopio en las canchas antes de entrar al proceso, y del agua de lavado de la madera después de descortezar, para eliminar posibles impurezas antes de su cocción.



Figura 2. Patio de acopio y astillado de la madera



Figura 3. Descortezador de madera



Figura 4. Corteza sucia



Figura 5. Lodos de preparación de madera

- Pulpaje o digestión de la madera

La etapa de digestión de madera, corresponde a la cocción de las astillas en digestores como los que se muestran en la **Figura 6**. Estas astillas provienen del astillado mediante cintas transportadoras y su cocción ocurre en presencia de licor blanco (hidróxido de sodio, NaOH y sulfuro de sodio, Na₂S). Esta operación se lleva cabo entre los 160° C - 180° C y altas presiones (aproximadamente 900 KPa), permitiendo remover gran parte de la lignina que une a las fibras de la madera. De este proceso se genera licor negro (licor blanco y lignina removida), el cual debe ser tratado para su recirculación al proceso, lo que recibe el nombre de *recuperación química*. Esta última, genera residuos inorgánicos llamados dregs y grits, los cuales en la actualidad no tienen ningún valor comercial, siendo depositados en vertederos (Zambrano, 2007b; Zaror, 2002).



Figura 6. Digestores

- Lavado y deslignificación

El lavado de la pulpa cruda tiene como objetivo la remoción de fibras que no fueron removidas en la etapa de anterior, por lo cual se ingresa agua al sistema generando así, un residuo líquido que contiene agua y restos de lignina. Posteriormente, se realiza la deslignificación, en donde se agrega oxígeno con el mismo objetivo anterior, disminuir la lignina presente antes de pasar a la etapa blanqueo. La presencia de esta última en la pulpa, determinará la cantidad de agentes químicos a utilizar en la siguiente etapa, es decir, mientras mayor sea la cantidad de lignina presente en la pulpa cruda, mayor será la cantidad de agentes químicos utilizados en el blanqueo. Posteriormente, el flujo producido es conducido a la recuperación química por poseer los mismos componentes que el residuo de digestión pero en menor concentración (Arauco, 2010; Davis, 2000).

- Blanqueo

La etapa de blanqueo corresponde a la adición de químicos y/o agentes oxidantes para eliminar de forma completa y definitiva la lignina que no pudo ser removida durante las etapas previas. Actualmente, en el país se utiliza dióxido de cloro (ClO_2), químico libre de cloro elemental (Zaror, 2002) que produce efluentes que son dirigidos a la planta de tratamiento. En esta última, el efluente es tratado para su posterior vertido. Este tratamiento genera residuos sólidos secundarios o una mezcla de lodos de sedimentación (primarios) y lodos biológicos (secundarios), mezcla que se puede apreciar en la **Figura 7**.



Figura 7. Mezcla de lodos de tratamiento de efluentes

- Secado y disposición final

En esta última etapa del proceso y como se muestra en la **Figura 8**, la pulpa ya blanqueada es secada mediante la adición de vapor, para su posterior embalado en correas con dimensiones específicas, almacenado y venta.



Figura 8. Línea de embalaje

Sin embargo, se debe mencionar que la energía utilizada durante el proceso productivo, es producida mediante generadores y sucede gracias a los vapores provenientes de la caldera de biomasa. Es en esta caldera en donde se procede a la incineración de residuos orgánicos, como las cortezas y la mezcla de lodos del tratamiento de efluentes, los cuales en su reducción forman cenizas que actualmente se disponen en vertederos.

4.1.2 Recuperación química: Producción de Dregs y Grits

La recuperación química es la unidad que diferencia al proceso Kraft de otros métodos de producción de celulosa, puesto que se trata de una tecnología que proporciona la posibilidad de reciclar los químicos utilizados en la cocción de la madera.

El objetivo es transformar el licor negro generado durante la digestión de la madera en licor blanco y así, recircularlo al proceso. De esta forma, se recuperan los químicos adicionados y agotados durante el proceso permitiendo además, evaporar la humedad residual de los sólidos, quemar los constituyentes orgánicos y suministrar calor para la generación de vapor. Finalmente, este calor es utilizado en la generación de energía, minimizando el impacto ambiental relacionado a la cantidad de material residual generado (Arauco, 2010; Tran and Vakkilainen, 2010). Durante el proceso precipitan metales, materiales insolubles que no son necesarios y elementos que no juegan un papel útil en la fabricación de la celulosa como el K, Ba, Mn, Fe, Cu, Ni, Cr, Z, entre otros (Poykio *et al.*, 2006).

Como se representa en la **Figura 9**, la recuperación química se lleva a cabo dirigiendo el licor negro débil (aquel con gran contenido de agua) proveniente del digestor a los evaporadores. En este proceso se evapora el agua a fin de concentrar los sólidos diluidos a 72% y obtener las condiciones para ser quemados en la caldera de recuperación. En esta fase la materia orgánica es quemada, transformando el licor

negro en licor verde (mezcla de sulfuro de sodio, Na_2S y carbonato de sodio, Na_2CO_3), luego de la adición de sulfuro de sodio (Na_2SO_4) con la finalidad de añadir las sustancias que durante el proceso se han agotado (Zambrano *et al.*, 2003). El licor verde generado en la caldera de recuperación es filtrado para extraer los sólidos suspendidos, permitiendo seguir en el circuito solo al licor purificado. Como resultado del filtrado anterior, se genera un residuo sólido llamado *dregs*. El licor verde obtenido es llevado a un proceso de apagado de cal, en donde se agrega óxido de calcio (CaO) reaccionando con el agua presente en él, formando hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). En esta parte de la recuperación se genera un residuo de cal llamado *grits*, el cual corresponde a precipitados de cal que no reaccionan con el licor verde en su proceso de transformación (Arauco, 2010).

El hidróxido de calcio generado en el apagado de cal, reacciona con el carbonato de sodio presente en el licor verde. Esta reacción consiste en transformar el carbonato de sodio contenido en el licor verde a hidróxido de sodio presente en el licor blanco y así ser devuelto al proceso de digestión. Además se produce carbonato de calcio, que al pasar por el horno de cal a $850\text{ }^\circ\text{C}$ se calcina para dar nuevamente óxido de calcio y ser nuevamente utilizado durante el apagado (Tran, 2008).

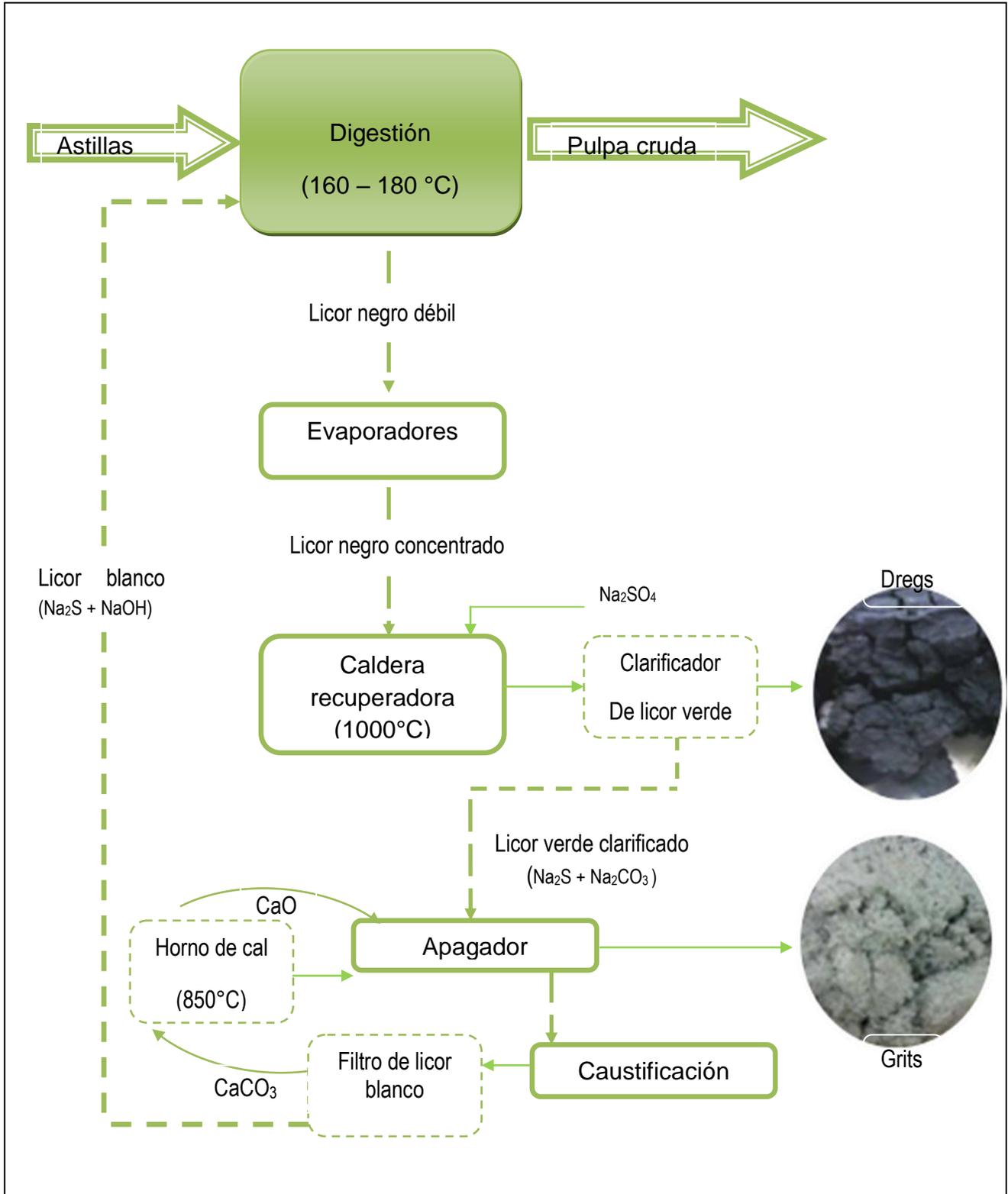


Figura 9. Recuperación química y residuos generados (Machado *et al.*, 2007; Zambrano *et al.*, 2003; Arauco, 2010; Tran, 2008).

4.1.3 Alternativas de manejo

Dentro de las alternativas de manejo o valoración que se conocen para estos residuos, las más estudiadas corresponden a la aplicación en el suelo y su utilización como sustituto en materiales de construcción.

- Aplicación en el suelo

Este tipo de valoración se puede respaldar por la equivalencia que tienen los dregs y grits con la cal comercial (Manskinen et al., 2011), la que actualmente es utilizada en el mejoramiento de suelos mediante la corrección del pH. El objetivo de la corrección, es permitir una mayor absorción de nutrientes por parte de las plantas, resultando atractiva su aplicación en el suelos ácidos (Navarro y Navarro, 2003; Zambrano *et al.*, 2005; Zambrano *et al.*, 2007a).

Para la aplicación anterior, se deben tener en consideración diversos factores tales como el tipo de cultivo a utilizar, ya que la tolerancia es diferente para cada especie, el pH del suelo y su capacidad tampón, lo cual a su vez depende de la cantidad de materia orgánica y el origen del suelo (Manskinen *et al.*, 2011; Lazcano, 2000). Además, se debe considerar que en términos de producción, la aplicación de cualquier sustancia o elemento en el suelo puede aportar metales pesados, lo que podría significar un riesgo para su salud y calidad. Es por lo anterior, que los residuos inorgánicos generados pueden ser adicionados, al contener bajas concentraciones de metales, siempre teniendo presente que éstos tienen carácter acumulativo en el tiempo (Fuentes y Silva, 2007).

- Sustituto en materiales de construcción

En el caso de la construcción, los residuos de la recuperación química pueden ser utilizados en la producción de cemento, siendo los componentes más importantes para dicho fin, calcio, silicio, aluminio y hierro (Bird and Talbert, 2008). Además, se ha comprobado que en mezcla sirven como agregados de asfalto sin que éste pierda sus características de resistencia y apariencia (Modolo *et al.*, 2010).

4.1.4 Realidad regional

Dentro del contexto nacional, la principal región que sustenta la producción de celulosa Kraft corresponde a la Región del Biobío con un 67% de la capacidad instalada, dentro de cuyo territorio la cuenca del río Biobío sustenta el 32% de la producción. Lo anterior, ha impulsado una creciente participación en los mercados globales, generándose un importante eje de desarrollo económico (Celis *et al.*, 2010; Orrego *et al.*, 2005; 2006; 2010).

La Región del Biobío tiene gran importancia, ya que en ella se inauguró la primera planta productora. Se trató de la Planta Laja, inversión privada realizada a mediados del siglo XX por la empresa CMPC con apoyo de la corporación de fomento de la producción (CORFO). Posteriormente, se fueron agregando otras plantas productoras de celulosa y papel, en gran medida debido a la acción directa de la inversión estatal por medio de CORFO. Dentro de esta tendencia de inversión pública, las principales plantas construidas fueron las de Arauco y Constitución que entraron en funcionamiento en 1972 y 1975, respectivamente (Luraschi, 2007).

De la totalidad de plantas que producen celulosa en nuestro país, cinco se encuentran en nuestra región, produciendo cuatro de ellas pulpa química (Laja, Santa Fé I y II, Nueva aldea y Arauco I y II) y que se encuentran distribuidas

geográficamente como se representa en la **Figura 10**. (Celis *et al.*, 2010; ATCP, 2007).

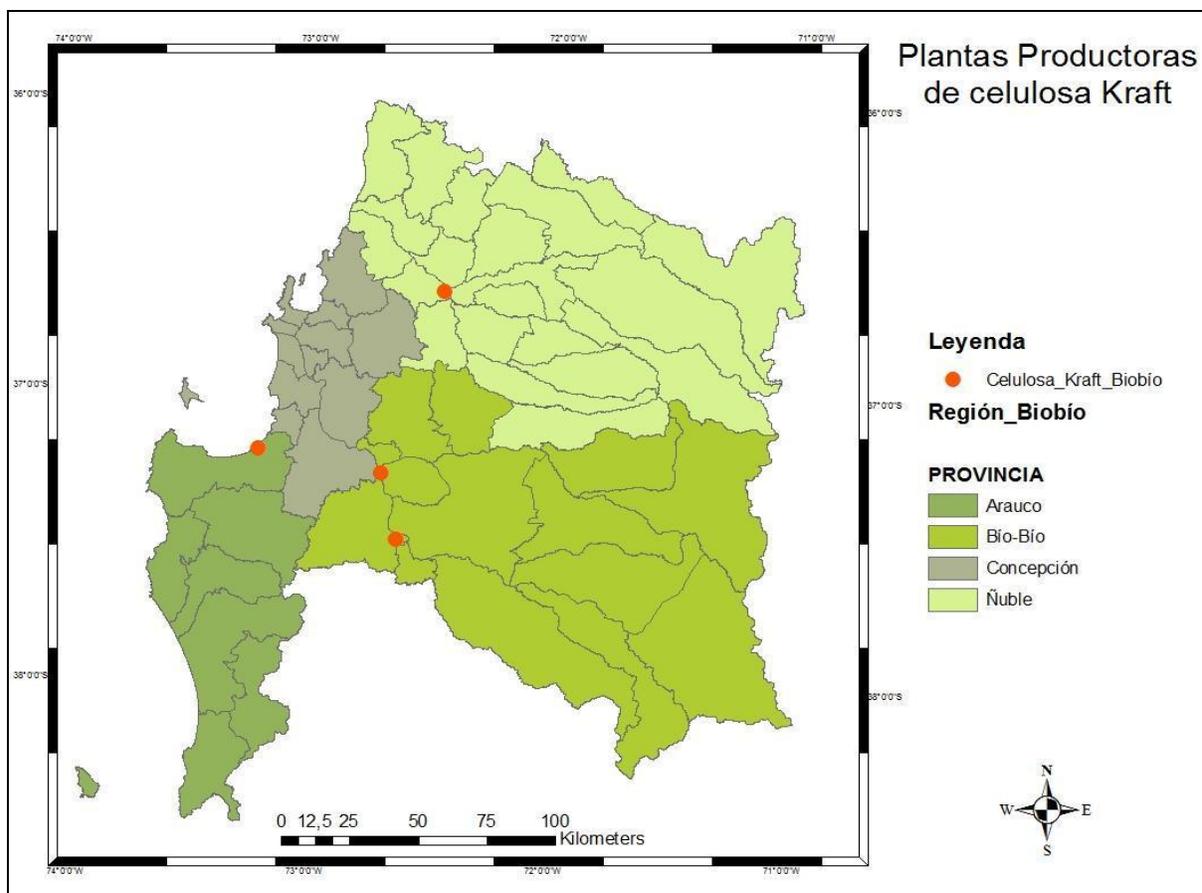


Figura 10. Plantas productoras de celulosa Kraft en la región del Biobío

De la información anterior y de aquella representada en la **Tabla 3**, se desprende que la región cuenta con una gran producción de celulosa en relación a las demás regiones. Esto trae como consecuencia, una mayor producción de residuos sólidos a nivel regional, adquiriendo mayor importancia al momento en que éstos interactúan con el medio ambiente.

Tabla 3. Producción de celulosa Kraft en la Región del Biobío

Plantas	Producción (ton /año)
Nueva aldea	1.027.000
Arauco Horcones	790.000
Santa Fé	1.150.000
Laja	360.000
Total regional	3.327.000

Fuente: CMPC, 2012; Arauco, 2009.

4.2 Tratamiento de aguas servidas

El término de aguas servidas se refiere a aguas residuales residenciales, más aquellos residuos líquidos generados por establecimientos comerciales e industriales que son recogidas del sistema de alcantarillado, para posteriormente ser enviadas a las plantas de tratamiento de aguas (Henry and Heinke, 1999).

En Chile la evolución en el tratamiento de aguas servidas, comienza en el año 1998 con 16,7% de cobertura en el tratamiento, lo que fue aumentando con el tiempo. En el año 2004, la cobertura llegaba al 66% y a fines de 2010 se alcanzó una cobertura de 86,9% a nivel nacional, lo que correspondía al funcionamiento de 265 sistemas de tratamiento en zonas urbanas. De acuerdo a las proyecciones esta situación seguirá en aumento, estimándose que para el periodo 2016 – 2021, la cobertura llegará hasta un 98,9% del total nacional (Baraňao y Tapia, 2004; SISS, 2010a).

Las aguas tratadas son descargadas en el mar o cuerpos de aguas superficiales, por lo que estas plantas quedan afectas al D.S. 90/2000, que corresponde a la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a la descarga de residuos

líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (MMA, 2000). Por lo tanto para cumplir los requerimientos de la normativa, se debe aplicar una serie de etapas para su tratamiento, lo que en su conjunto recibe el nombre de tratamiento de aguas servidas, generando además residuos sólidos secundarios derivados del proceso.

4.2.1 Descripción del proceso

El tratamiento de las aguas servidas, es un procedimiento realizado para reducir la presencia de elementos contaminantes a un nivel aceptable antes de su descarga o vertimiento en los cuerpos receptores sin peligro de contaminación (SISS, 2010a).

Como se muestra en la **Figura 11**, el proceso usual de tratamiento puede dividirse en etapas consecutivas, correspondientes a pre-tratamiento, tratamiento primario o físico, tratamiento secundario o biológico, tratamiento terciario y desinfección. Estas etapas tienen como objetivo la eliminación de sólidos y materia orgánica, entre otras. Como consecuencia de lo anterior, se producen residuos semisólidos llamados lodos, los cuales son un problema en este tipo de proceso por la gran cantidad de volumen generado (Metcalf & Eddy, 1995; Ecoamérica, 2007).

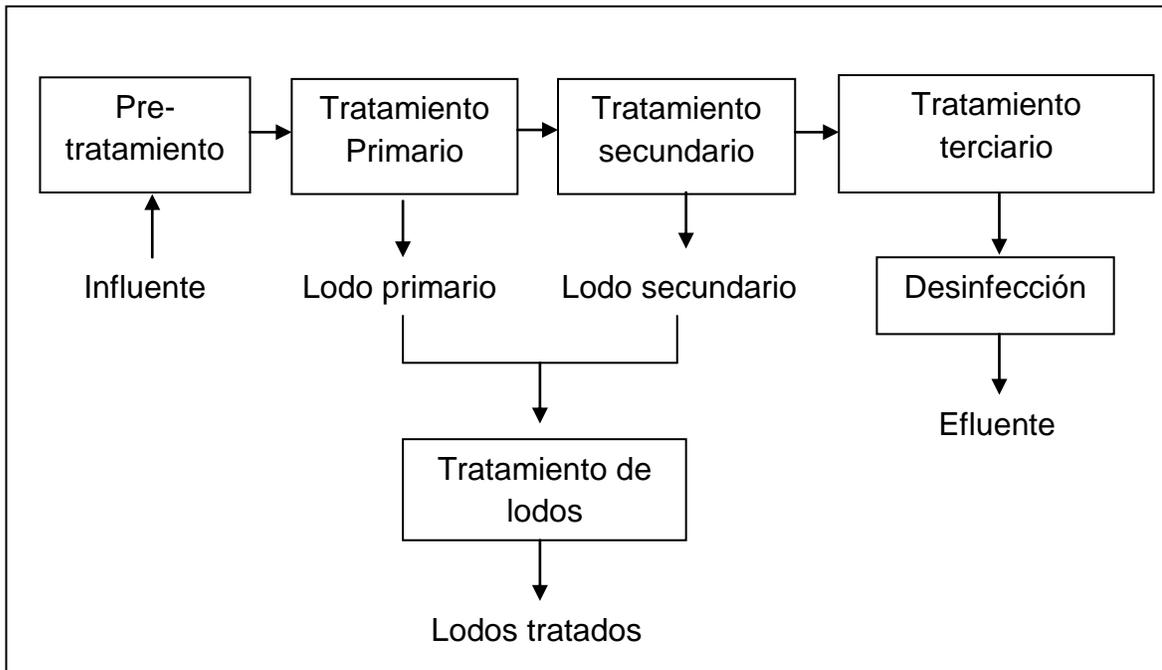


Figura 11. Esquema general de tratamiento de aguas servidas (Metcalf & Eddy, 1995; Barañaño y Tapia, 2004).

De acuerdo a lo anterior, se puede definir cada una de las etapas del tratamiento de la siguiente manera:

- Pre-tratamiento

Tiene como función recepcionar el influente crudo y su objetivo corresponde a la eliminación de cualquier elemento que pueda entorpecer las etapas posteriores. El pre-tratamiento también es conocido como tamizado y es utilizado para la extracción de materiales de gran tamaño (Barañaño y Tapia, 2004).

- Tratamiento primario

Corresponde a la separación de la fase sólido-líquido del influente a tratar. Se trata de una operación física para la eliminación de sólidos sedimentables o insolubles, como arenas y grasas. Dentro de esta operación, se puede encontrar el tratamiento fisicoquímico, en donde ocurre la aglomeración de partículas para su posterior sedimentación en el estanque sedimentador primario.

- Tratamiento secundario

Corresponde a un proceso biológico para la eliminación o degradación de materia orgánica disuelta, típicamente medida como DBO, mediante la actividad bacteriana. Para el buen funcionamiento de esta etapa y del proceso en general, a estas bacterias se les debe proporcionar condiciones controladas para asegurar su estabilidad y duración dentro del proceso. Este tratamiento biológico, se puede dividir según el estado en que se encuentren las bacterias responsables de la degradación, pudiendo éste ser aeróbico o anaeróbico (Ecoamerica, 2007).

- Tratamiento terciario

También conocido como tratamiento avanzado, tiene como objetivo remover los sólidos en suspensión y nutrientes entre otros, obteniendo así, una calidad superior del efluente obtenido de las etapas anteriores. Los tipos de tratamiento corresponden a la remoción de sólidos en suspensión, adsorción en carbón activo, osmosis inversa, oxidación química y eliminación de nitrógeno y fósforo (Ramalho, 1996; McGhee, 1999).

- Desinfección

La desinfección es la última etapa del tratamiento y es necesaria para una descarga segura al cuerpo receptor. Lo anterior, debido a que el agua tratada en las etapas previas aún cuenta con virus y protozoos que son agentes de enfermedades, siendo necesarios muy pocos de ellos para provocar una enfermedad clínica, cuando el cuerpo receptor de esta agua es utilizado con fines recreacionales. Las técnicas de desinfección consideradas potencialmente aplicables son la cloración, cloruro de bromo, dióxido de cloro, ozono y la luz ultravioleta, aunque la utilización de cada una de ellas dependerá de diversos factores como lo son el tamaño de la planta, su capacidad bactericida entre otros (McGhee, 1999).

En la práctica, los tratamientos anteriormente mencionados, se refieren al grado de purificación que se quiere obtener de las aguas relacionado al máximo permitido de contaminantes a descargar a los cuerpos de agua. Sin embargo, la diferencia en los tipos de tratamiento para la purificación de las aguas, corresponde al tratamiento secundario utilizado en el tratamiento de éstas siendo cada uno de ellos una tecnología diferente.

4.2.2 Tipos de tecnologías

Como se observa en la **Figura 12**, las posibilidades o métodos de tratar el agua residual son variados. La utilización de cada uno de ellos, depende básicamente del tamaño de la población a abastecer con el servicio. Estos pueden ser tratamientos biológicos aeróbicos y anaeróbicos, los cuales se diferencian por el tipo de bacterias utilizadas en el proceso, generando una serie de tecnologías.

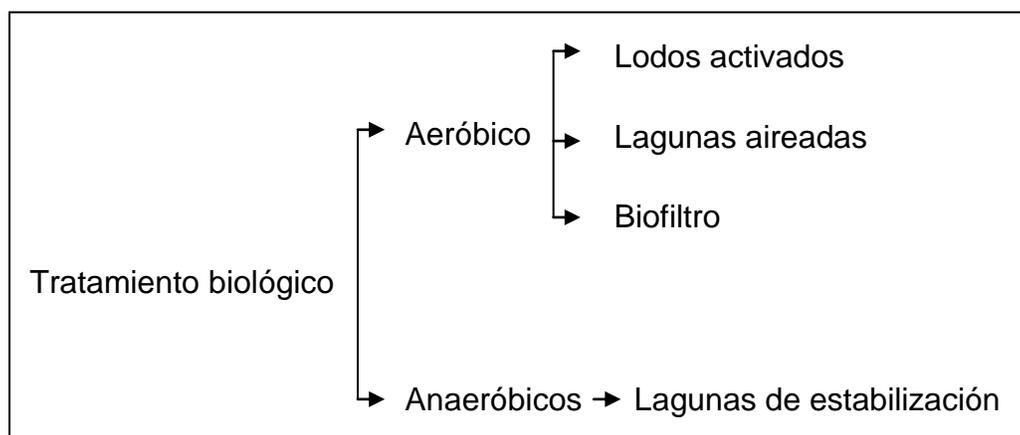


Figura 12. Tipos de tratamientos biológicos (Ecoamérica, 2007; Barañaño y Tapia, 2004).

El objetivo del tratamiento biológico consiste en la estabilización de la materia orgánica y en la coagulación y la eliminación de sólidos no sedimentables presente en las aguas. En muchos casos además, se produce la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. La estabilización de la materia orgánica, se consigue gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Estas bacterias tienen una serie de necesidades, dentro de ellas las nutritivas. Esta última corresponde a la necesidad de nitrógeno, azufre, potasio, calcio, magnesio, fierro, sodio y cloro, que condicionan y limitan la síntesis celular y el crecimiento bacteriano (Metcalf & Eddy, 1995).

Para el año 2010, en Chile se aprecia que la tendencia fue utilizar lodos activados como principal tratamiento de aguas, con un 59% de la capacidad total de tratamiento, seguido de las lagunas aireadas con un 20%, emisarios submarinos con un 12%, lagunas de estabilización con un 2,6%, lombrifiltros con un 0,6% y otras con un 5,8% (Barañaño y Tapia, 2004; SISS, 2010a). Esta tendencia se ve reflejada en la

Tabla 4, donde se puede observar el cambio a través de los años de las tecnologías utilizadas. Se refleja un aumento significativo en la cobertura del tratamiento mediante

lodos activados, lo que se explica tanto por un aumento en la cobertura como por cambios de tecnologías más modernas y prácticas.

Tabla 4. Evolución de los tipos de tecnologías en Chile

Tipo de tecnología	AÑO	
	1998	2010
Lodos activados	0	156
Lagunas de estabilización	61	7
Lagunas aireadas	9	53
Emisarios submarinos	11	32
Otros	2	16
Total	83	264

Fuente: SISS, 2010a

A continuación se describe la forma en la que operan cada uno de los tratamientos mencionados en la tabla anterior:

4.2.2.1 Lodos activados

Es un tratamiento biológico de cultivo suspendido y se trata de la tecnología más difundida a nivel mundial. En ella el lodo se estabiliza biológicamente en un reactor mediante una masa activada de bacterias, capaces de estabilizar el residuo bajo condiciones. Estas últimas pertenecientes principalmente a los géneros *Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Bdellovibrio*, *Mycobacter* y de dos bacterias nitrificantes, *Nitrosomas* y *Nitrobacter* (Metcalf & Eddy, 1995; Cortez, 2003). Durante el crecimiento y mezcla, los organismos flocculan formando una masa activa denominada lodos activados. El ambiente aeróbico se logra mediante el uso de aireación por medio de difusores o sistemas mecánicos, teniendo en constante recirculación una porción de lodo. La importancia del lodo recirculado radica en que

contiene bacterias, las cuales son necesarias para mantener el tratamiento en equilibrio. El lodo que no es recirculado al proceso, también contiene bacterias y recibe el nombre de lodo en exceso (Biosólido). Este último se produce en relación a la cantidad de agua tratada, siendo esta cantidad 83 kg de sólidos secos por un volumen 1000 m³ de agua, los que finalmente deben ser dispuesto (INIA, 2011a; Metcalf & Eddy, 1995).

4.2.2.2 Lagunas de estabilización

Este tipo de tratamiento se emplea extensamente en comunidades pequeñas o rurales por su flexibilidad, bajo costo de inversión, operación y mantenimiento. Se trata de una opción a los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales. La diferencia entre este tipo de tecnología y las descritas anteriormente, es que no se utiliza mecanismo de aireación. La clasificación de estas lagunas depende de factores tales como el tiempo de retención, carga orgánica por unidad de área, proceso de estabilización (aerobio, anaerobio o mixto), profundidad de la laguna, entre otras (Ramalho, 1995).

4.2.2.3 Lagunas aireadas

Es un proceso de tratamiento biológico simple que necesita oxigenación mecánica. Este tratamiento opera en flujo continuo sin recirculación de lodos, es por esto que se requiere un mayor tiempo de retención que los sistemas convencionales. El efluente generalmente se somete a clarificación en lagunas de sedimentación (INIA, 2011b).

4.2.2.4 Emisarios submarinos

Son sistemas de disposición final de las aguas residuales en el mar, facilitando el tratamiento natural del agua en el medio marino, aprovechando la capacidad de asimilar y transformar las sustancias contenidas en el efluente mediante dilución (DIRECTEMAR, 2007).

4.2.3 Producción de lodos

Durante el proceso de tratamiento de aguas, se generan distintos tipos de lodos dependiendo de la etapa de la cual se extraen, tal como se presenta en la **Tabla 5**. Cada uno de éstos tiene características, comportamiento y forma de manejo diferente. Así, los lodos pueden clasificarse en lodo primario, lodo activado o biosólidos, lodo digerido aeróbica y anaeróbicamente y lodos de fosas sépticas.

Tabla 5. Tipos de lodos generados durante el tratamiento de aguas servidas

Lodos	Descripción
Lodo primario	Corresponde a los lodos producidos en la decantación primaria, generalmente de colores grises y grasientos. Produciendo en la mayoría de los casos olores molestos.
Lodo activado	Tiene una apariencia floculenta de color marrón. Este lodo en buenas condiciones, tiene un olor característico a olor a tierra, no siendo molesto. Se digiere solo o con lodos primarios frescos.
Lodo digerido (aeróbico)	Este lodo, varía de color marrón a marrón oscuro y tiene apariencia floculenta, no genera olores molestos y se puede deshidratar fácilmente.
Lodo digerido	Su color marrón oscuro – negro y contiene una gran

(anaeróbico)	cantidad de gas.
Lodo de fosas sépticas	Su color es negro, contiene sulfuro de hidrógeno y otros gases.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

Dentro de las tecnologías de tratamiento secundario que producen lodos, se destacan las lagunas aireadas, lagunas de estabilización y lodos activados. Las tasas de producción y de disposición de ellos, varían al contar con una tecnología u otra. En los sistemas de lagunaje la extracción de ellos sucede en periodos de uno a dos años, mientras que en los lodos activados la extracción se produce diariamente, por lo cual se envían con mayor frecuencia a destinación final. La importancia de estos últimos y como se mencionó anteriormente, corresponde a que la tecnología de lodos activados es la más utilizada en el tratamiento de aguas generando por ende, una constante y mayor cantidad de biosólidos a disponer.

Estos últimos reciben un tratamiento posterior correspondiente al espesamiento, agregando coagulantes químicos como forma de acondicionar el biosólido para su posterior deshidratación, con la finalidad de reducir su volumen tal como se muestra en la

Figura 13. El agua resultante de aquel tratamiento, luego es devuelta al proceso en donde es tratada nuevamente (Cortez, 2003; Metcalf & Eddy, 1995; Méndez, 2006).

Los biosólidos son definidos por la EPA como “*residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias. Los biosólidos o también llamados lodos, incluyen las escorias o sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o avanzado del proceso de tratamiento de aguas servidas y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración*”. Estos biosólidos son un gran

problema en el tratamiento de este tipo de aguas por el gran volumen generado, situación que ha ido en aumento como consecuencia de la mayor cobertura existente para su tratamiento (Metcalf & Eddy, 1995).

Para el año 2006, en Chile se producían 384.957 m³/año de lodos, lo cual aumentó a través del tiempo, llegando a 509.928 m³/año durante el año 2010. Estos niveles de producción tienen su origen de 240 sistemas de tratamiento de los 265 sistemas existentes a la fecha. La tasa media de producción por persona corresponde a 24 g/Hab/d, expresado en materia seca, cantidad muy similar a la producida en Irlanda de 26 g/Hab/d y más de dos veces menor que los 78 g/hab/d producidos en Dinamarca (SISS, 2010a; Lepe y Coronado, 2003).

4.2.4 Estabilización de biosólidos

Los biosólidos generados contienen sustancias importantes desde el punto de vista ambiental, ya que en ellos persiste una importante carga patógena residual, metales pesados y un gran contenido de materia orgánica. Esta última se puede degradar y constituir una fuente de vectores y formación de olores. Todo lo anterior, les proporciona características que variarán en función de su origen, edad, tipo de proceso del cual provienen, calidad del agua tratada, tamaño de la población y la eficiencia de remoción de contaminantes (Méndez, 2006). Por lo tanto el tratamiento de aguas servidas, también debe preocuparse de qué hacer con estos biosólidos debiendo involucrar aspectos técnicos, económicos y ambientales al proceso (Tapia y González, 2005).

La estabilización de biosólidos tiene como función minimizar la generación de olores, destruir agentes patógenos y finalmente, reducir las probabilidades de atracción de vectores, debiendo imponer factores estresores para la destrucción o inactivación de ello, encontrándose la temperatura, pH, amoníaco y tiempo entre otros. Para lograr lo anterior, existen diversos métodos como lo son la digestión, compostaje, secado

térmico y ajuste de pH o estabilización alcalina (EPA, 2000a). La generación del biosólido durante el proceso ocurre como resultado de la separación de fases correspondientes al agua residual y al biosólido propiamente tal.

Para la posterior disposición, estos residuos muchas veces deben ser tratados ya que en ellos, aún persisten agentes patógenos. Estos últimos, pueden comportarse como vectores, fuentes de enfermedades y malos olores. Para su tratamiento, existen diversas formas que cumplen con el objetivo de reducción de los agentes recibiendo el nombre de estabilización. Como primera opción y para aquellas PTAS de gran tamaño, esta estabilización generalmente se realiza mediante el proceso biológico de digestión, tanto aeróbico como anaeróbico, con el fin de evitar la degradación natural de la materia orgánica, lo cual se lleva a cabo con la ayuda de bacterias para aquellos lodos biológicamente más activos. Como segunda opción, existen diversos métodos como por ejemplo, el secado térmico, estabilización alcalina y el compostaje, como ya se había mencionado.

4.2.5 Estabilización alcalina

Como se mencionó anteriormente, la estabilización alcalina es uno de los métodos utilizados para minimizar la generación de olores ofensivos, destruir agentes patógenos y finalmente, reducir las probabilidades de atracción de vectores (roedores, moscas y mosquitos) por el potencial de putrefacción mediante la adición de cal.

Este tipo de estabilización, estabiliza el lodo sin ningún riesgo de volver a ser contaminado por patógenos, tiene bajos costos de inversión y utiliza pequeñas superficies para su operación, aumenta la sequedad mejorando la estructura del lodo facilitando su manejo y finalmente mantiene la biodisponibilidad de los nutrientes (Torres *et al.*, 2005).

Puede ser aplicado tanto antes como después de la deshidratación, lo que se conoce como pretratamiento con cal y postratamiento con cal, respectivamente (Metcalf & Eddy, 2003). El postratamiento con cal, consta en agregar este producto hasta elevar el pH de los biosólidos a 12 o más, creando condiciones básicas que inhiben la actividad de microorganismos patógenos y la degradación biológica de la materia orgánica contenida en los ellos. Para un pH inferior a 11, la degradación biológica se reanudará produciendo los malos olores. Además, permite reducir la solubilidad y movilidad de metales pesados presentes. Cabe mencionar, que se ha establecido que en la estabilización previa con cal o sin la adición de ella, el pH deberá mantenerse en 12 o más por un periodo de tiempo de dos horas y posteriormente a 11,5 o más por 22 horas adicionales. El pH en este caso, es un importante estresor de los microorganismos presentes, al tener estos últimos rangos óptimos de crecimiento entre los pH 6,5 – 7,5 (MMA, 2009; Cortéz, 2003; Czechowski and Marcinkowski, 2006; Williford *et al.*, 2007; Torres *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2008; Metcalf & Eddy, 1995).

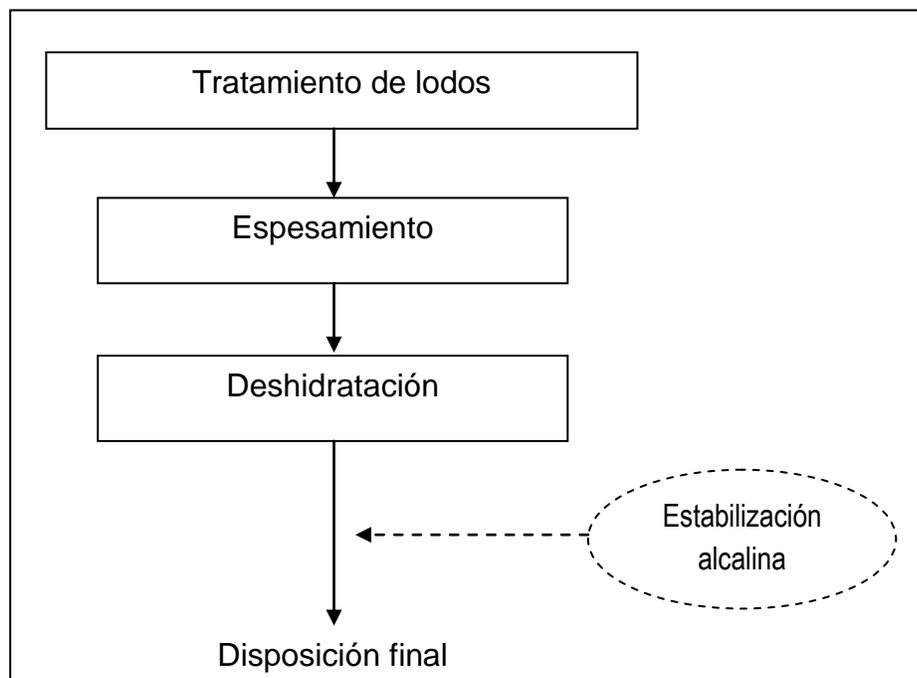
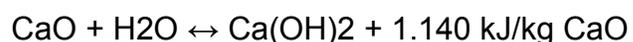


Figura 13. Tratamiento de lodos (Metcalf & Eddy, 1995).

Otro de los estresores presentes corresponde a la temperatura. Es por esto, que si bien se puede utilizar hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) en la estabilización, es recomendable utilizar óxido de calcio (CaO) ya que además de aumentar el pH tal como se requiere, produce una reacción exotérmica al reaccionar con 32% del agua presente en los biosólidos (European Lime Association, 2004). Como resultado de esta reacción, la temperatura es elevada por sobre los 50°C al momento de su aplicación. Esto último además, favorece a la estabilización ya que los microorganismos presentes en este tipo de sistemas, tanto los del lodo activado como aquellos provenientes de nuestro organismo, viven en condiciones no superiores a los 35°C , influyendo en las actividades metabólicas de la población microbiana (Metcalf & Eddy, 1995). Así, la combinación pH/ temperatura, reduce los microorganismos a niveles despreciables. Además se disminuye la cantidad de agua, aumentando por ende la biomasa de sólidos secos presente, facilitando su manejo. Es importante destacar que en esta situación, la descomposición de materia orgánica ocurre principalmente por la hidrólisis de grasas y proteínas produciendo amoníaco (Metcalf & Eddy, 2003; Hassubi, 1999; European lime Association, 2004).



Ecuación 1

La forma típica de realizar la mezcla de la cal con los biosólidos se muestra en la **Figura 14**, en donde los biosólidos son transportados mediante una cinta hacia un mezclador, al cual se le agrega cal mediante un dosificador. Posteriormente el producto estabilizado es dirigido a un contenedor de maduración. Es importante destacar que la calidad de la mezcla tiene gran relevancia, ya que un producto pobremente mezclado genera olores, los que a través del tiempo se vuelven cada vez más ofensivos (European Lime Association, 2004; Mangus *et al.*, 2008).

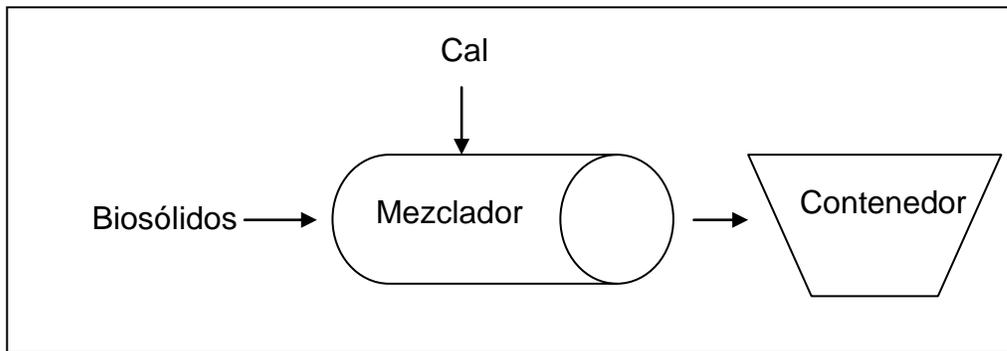


Figura 14. Tratamiento de lodos con cal.

Las dosis de cal a utilizar para la estabilización del lodo en un periodo de tiempo de 30 minutos, se muestra en la **Tabla 6** y varía dependiendo del tipo de biosólido a estabilizar, siendo los lodos biológicos los que mayor cantidad de cal demandan por ser biológicamente más activos, es decir, en los cuales se encuentra la mayor cantidad de patógenos (Lepe y Coronado, 2003; Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 6. Cantidad de cal utilizada en la estabilización.

Tipo de sólido	Dosis de cal	
	(g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / kg sólidos secos)	
	Rango	Promedio
Primarios	60 – 170	120
Lodos biológicos	210 – 430	300

Digeridos aeróbicamente	140 – 250	190
Sépticos	90 – 510	200

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

Sin embargo, para el año 2004 solo el 3% de las plantas de tratamiento en el país realizaba una estabilización adicional de lodo previamente estabilizado, mediante la adición de cal para su posterior disposición (SISS, 2010a).

4.2.6 Caracterización de biosólidos y sus alternativas de manejo

4.2.6.1 Caracterización

Las características fisicoquímicas de los lodos, varían dependiendo de factores tales como el tipo de tecnología utilizada en la purificación de las aguas, características del agua tratada y el tamaño de la población abastecida como se mencionó en la sección de producción de lodos. En cuanto a la generación de ellos, aquellos provenientes de la tecnología de lodos activados se producen en gran cantidad y con frecuencia, encontrándose caracterizados en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Caracterización de lodos activados

Parámetro	Unidades	Valor Promedio		Rango
		Lepe, 2002	Lepe y coronado, 2003	Metcalf and Eddy, 2003
As	mg/kg	2,2	6,4	1,1 - 230
Cd	mg/kg	1,2	2,8	1,0 - 3.410
Cr	mg/kg	37,6	42,7	10,0 - 99.000
Cu	mg/kg	222,0	277,0	87,0 - 17.000
Hg	mg/kg	0,3	0,8	0,6 - 56,0
Mo	mg/kg	4,9	< 0,2	0,1 – 214
Ni	mg/kg	14,6	9,5	2,0 - 5.300
Pb	mg/kg	16,0	36,3	-

Se	mg/kg	0,8	0,5	1,7 - 17,2
Z	mg/kg	633,0	829,0	101,0 - 49.000
Fe	mg/kg	-	8655,0	-
Na	mg/kg	0,1	3,1	-
S	mg/kg	-	0,6	-
Mg	mg/kg	-	4,3	-
Ca	mg/kg	-	4,7	-
B	mg/kg	-	71,8	-
C.O.T	mg/kg	34,6	23,1	-
Nt	%	6,5	4,7	*
Pt	%	0,6	1,2	*
K	%	0,6	0,4	*
Humedad		85,4	-	
S.V.	%	64,2	69,5	59 – 88
pH		6,3	7,0	6,5 - 8,0

Los biosólidos tienen un color marrón con olor a tierra que no resulta molesto. La caracterización anteriormente presentada se realizó por la misma empresa sanitaria, considerando diferentes cantidades de PTAS para el análisis y ubicaciones dentro del territorio nacional. Para el caso de los sólidos volátiles, no se observa una gran variación, la que corresponde de 64,2% a 69,5% usado comúnmente como indicador de la cantidad de materia orgánica contenida en el lodo (Mahamud *et al.*, 1996), encontrándose ambos valores dentro del rango presentado por Metcalf & Eddy, (2003). Para el caso del comportamiento de los metales en dicho estudio, se observa que los valores son similares en relación a la amplitud del rango típico presentado, el cual llega al orden de miles.

Este tipo de lodo se puede clasificar de acuerdo a sus características físicas, químicas y biológicas. Dentro de la composición física, se tiene alto contenido de humedad, que varía entre 80% y 90%. Con respecto a la caracterización química, se pueden

encontrar metales pesados y nutrientes, como el nitrógeno, fósforo y potasio, siendo éstos últimos parámetros de interés agrícolas (EPA, 2000). Los metales pesados son parámetros muy importantes para determinar su posterior valoración y su concentración varía de acuerdo a la tecnología utilizada, siendo mayor en los lodos activados que en otras tecnologías, debido a la utilización de coagulantes en la etapa de espesamiento (Lepe y Coronado, 2003). Además, estos metales aumentan levemente al ir aumentando el tamaño de la planta y de la presencia o ausencia de residuos líquidos industriales dentro de las aguas tratadas. Por último y como se había comentado anteriormente, cuentan con un gran contenido orgánico medido como sólidos volátiles, el cual es importante para la determinación de poder calorífico, potencial olor y su uso como mejorador de suelos.

Finalmente, la caracterización biológica de la biomasa residual corresponde a un parámetro de interés sanitario y está sujeta al tipo de influente tratado, encontrándose presentes en ellos patógenos como bacterias, protozoos y virus. Entre las bacterias presentes se encuentran la *Salmoellas Thypi*, *Eschericha coli*, *Shigellas*, *Vibrio Cholerae*, entre otras, provocando una serie de enfermedades, como la gastroenteritis y la diarrea. Dentro de los protozoos se encuentran los *Crytosporidium*, *Balantidium* y lombrices intestinales. Finalmente, entre los virus se encuentran los causantes de la hepatitis A y poliomeilitis (Cortez, 2003). Si bien los patógenos son difíciles de cuantificar, existen indicadores como los coliformes fecales, salmonella y sólidos volátiles. La cantidad de coliformes fecales y sólidos volátiles es mayor en la tecnología de lodos activados en comparación a los sistemas de lagunaje. Para el caso de la Salmonella, la cantidad resulta similar en todos los dos procesos estudiados (Lepe y Coronado, 2003).

En relación a la disposición final de éstos y tal como se puede apreciar en la **Figura 15**, la práctica mayoritariamente utilizada en Chile para el año 2010, correspondía a disposición en rellenos sanitarios en un 39% junto con residuos sólidos urbanos y asimilables, seguido de mono-rellenos en un 16%, los que han sido específicamente

diseñados para su disposición final, dentro de plantas un 18%, aplicación en el suelo un 9% y del 18% restante no se cuenta con información (MMA, 2009; SISS, 2010a).

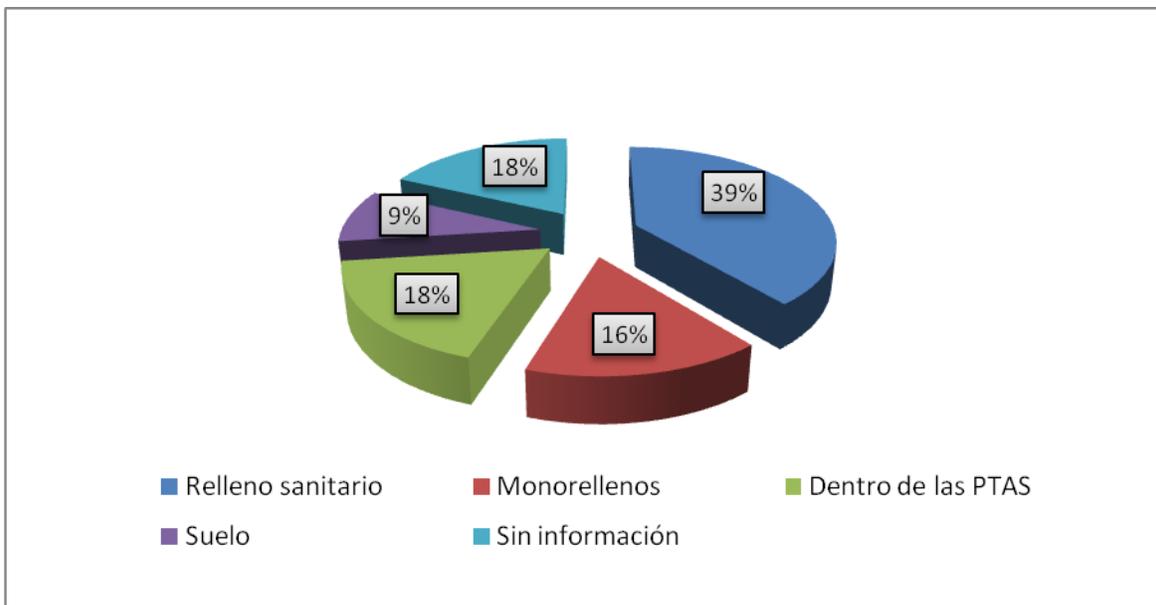


Figura 15. Disposición final de biosólidos (SISS, 2010a)

4.2.6.2 Alternativas de manejo

Los altos costos que involucra la disposición en vertederos de los biosólidos, tiene directa relación con la motivación que actualmente existe para buscar nuevas alternativas de manejo, lo que se conoce como valoración (Potisek *et al.*, 2010). Las valoraciones mas estudiadas corresponden a la aplicación en el suelo, utilización como sustituto en materiales de construcción y generación de energía.

- Aplicación en el suelo

El uso de los lodos como fertilizantes ha demostrado ser muy efectivo una vez que han sido procesados o estabilizados. Lo anterior, por su contenido de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, además de materia orgánica. Corresponden a un

sustrato orgánico de alta calidad para la recuperación de suelos, destacando que su aporte va aumentando a medida que aumenta su aplicación en él a través del tiempo. Sin embargo, su utilización debe ser muy cuidadosa, ya que si éstos no son debidamente tratados pueden transmitir enfermedades. Por ello, la eliminación de gérmenes patógenos y la concentración de metales pesados es indispensable para la utilización benéfica de los biosólidos los cuales podrían causar contaminación. Es por esto que la tasa de aplicación no puede exceder los requerimientos nutritivos de la vegetación existente y los requerimientos del tipo de suelo en el cual se adiciona. Las ventajas de este tipo de valoración, es que ocurre el reciclaje de los sólidos contenidos en las aguas residuales, siempre y cuando se controle la calidad y la cantidad del material tratado (Rámila y Rojas, 2008; Tapia y González, 2005; EPA 2011; Méndez, 2006).

Según un estudio realizado por Potisek *et al.* (2010), la aplicación de biosólidos aumenta la cantidad de materia orgánica en el estrato superficial del suelo, no así en el perfil de éste. Aumenta además, la cantidad de fósforo y nitratos disponibles, los que son necesarios para el desarrollo de las plantas, actuando de forma positiva tanto en el suelo como en las plantas que se desarrollan en él.

- Sustituto en materiales de construcción

La utilización de lodos en la producción de materiales de construcción como sustitutos de materias primas, ha sido estudiada y se ha llegado a la conclusión que éstos deben ser preferentemente secados antes de su utilización. El secado aumenta su facilidad de manejo y se reduce la cantidad de microorganismos, produciendo la eliminación de una fracción de ellos. Dentro de los productos a conseguir, se destacan los adoquines y los ladrillos. Para los primeros de ellos, la mezcla efectiva estudiada en Barcelona durante el año 2002, resultó de la aplicación de lodo en un 2% sobre el peso de cemento, lo que provocó un aumento en la resistencia mecánica

de éste (Yague *et al.*, 2002). En cuanto a la incidencia que tienen los metales pesados en este tipo de productos, se puede decir que son perfectamente manipulables dentro del proceso, ya que bajo ciertas condiciones como lo es la cocción, se puede asegurar que los metales serán retenidos en la matriz de los productos, formando parte de su estructura fisicoquímica.

- Generación de energía

Este tipo de valoración es un tema relativamente nuevo aún, pero que está siendo potenciado. La incineración es una alternativa que muchas empresas han encontrado para poder reducir la cantidad de lodos. Lo anterior, tiene como objetivo tanto la reducción de lodos, como la recuperación de la energía que se obtiene de ellos. Provocando además, la higienización completa con la aplicación de calor, todo esto a una temperatura de 980 y 1400°C (Rámila y Rojas, 2008; Méndez, 2006).

4.2.7 Realidad regional

El tratamiento de aguas servidas en la Región del Biobío se encuentra en manos de dos empresas, una de ellas es la Empresas de Servicios Sanitarios del Biobío S.A. (ESSBIO) y Aguas San Pedro S.A.

La población urbana estimada con tratamiento de aguas entregada por ESSBIO para los años 2009 y 2010, corresponde a 1.524.198 y 1.044.457 de personas respectivamente. Esta disminución en cuanto a la cantidad de población abastecida de servicio, se debe principalmente a la falta de infraestructura por los daños como consecuencia del terremoto ocurrido del año 2010, no pudiendo abastecer a las localidades de Chiguayante, Concepción, Talcahuano, Penco, Lirquén, y Lebu. Este servicio fue retomado solo en Marzo de 2011, con las operaciones normales de

tratamiento (SISS, 2010a; 2010b). Para el caso de Aguas San Pedro S.A., la población urbana estimada con tratamiento para los años 2009 y 2010 corresponde a 28.928 y 34.535 de personas respectivamente. Así, la población abastecida de servicio para el año 2010 en la región, correspondía a 1.078.992 habitantes de un total de 2.036.443, de acuerdo a proyecciones realizadas por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2011). Es decir, se contaba con una cobertura de 52,98% y se espera que para Diciembre de 2011, con la puesta en marcha de las plantas dañadas, la cobertura haya llegado hasta un 94,3% (INE, 2011; SISS, 2010a; SISS, 2010b).

En cuanto a la cantidad de PTAS en la región, actualmente existen 47 distribuidas en toda el territorio, perteneciendo 46 de ellas a ESBPIO (98%) y la restante a Aguas San Pedro (2%) (SISS, 2011).

De acuerdo al tipo de tratamiento, la región actualmente cuenta con 34 plantas de lodos activados, 8 emisarios submarinos, 4 lagunas aireadas y 1 laguna de estabilización, lo que corresponde a 72%, 17%, 9% y 2%, respectivamente. En cuanto a la generación de lodos por las PTAS anteriormente nombradas, fue 37.224,7 m³/año durante el año 2010, lo que correspondió al 7,3% del total nacional, siendo su principal valoración la disposición en vertederos.

Por ser la tecnología con mayor cobertura de tratamiento de aguas en la región, los lodos activados adquieren una gran importancia, indicándose su distribución geográfica en la **Figura 15**. Tal cobertura provoca una constante generación de biosólidos y por ende, la necesidad de más terrenos aptos para su disposición. Es por esto, que resulta de gran interés su estudio y la cuantificación de los residuos generados por ellas.

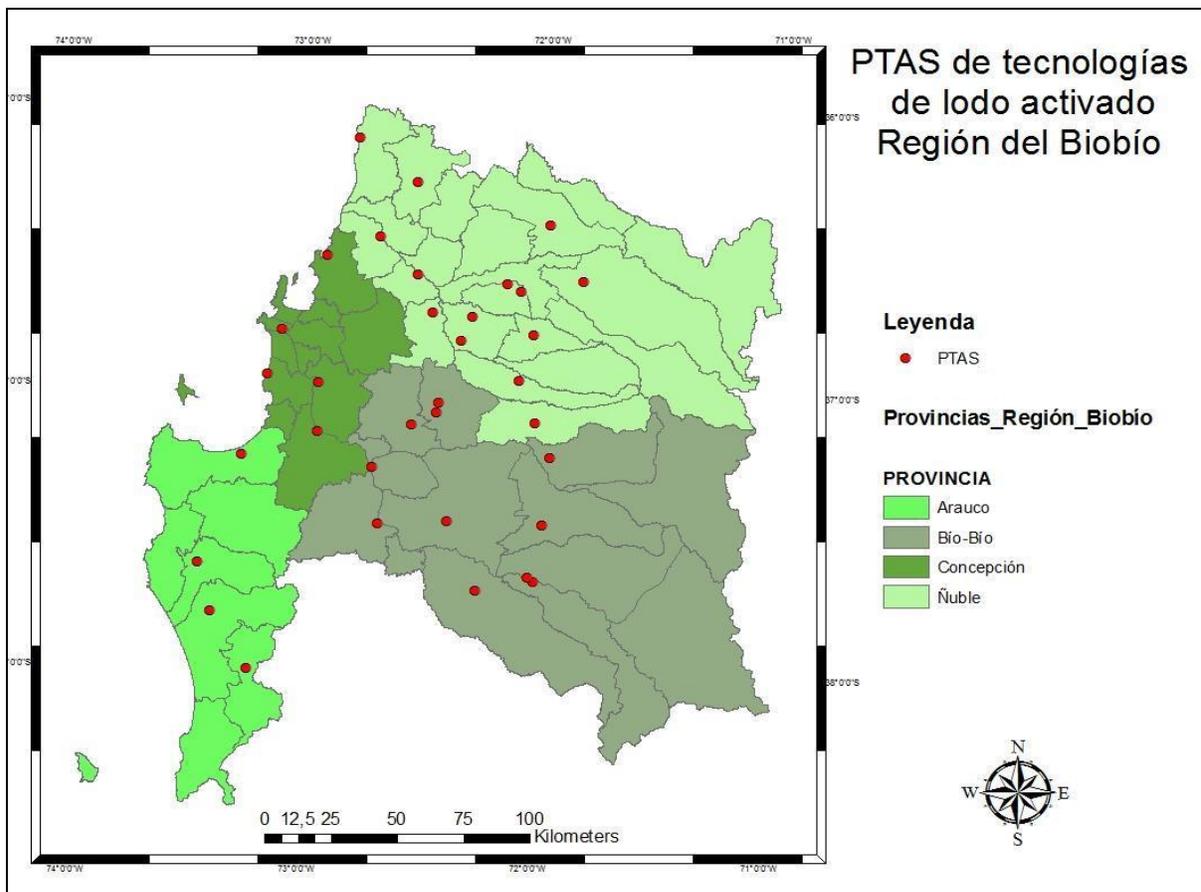


Figura 16. Distribución geográfica de plantas de tratamiento de lodos activados en la Región del Biobío.

En nuestra región, la valoración o destino final que reciben los biosólidos, corresponden preferentemente a vertederos. Sin embargo, existe la inquietud por darles una utilidad y un valor agregado. Es por esto que se han realizado diversos estudios por parte de las empresas productoras, siendo una de ellas la empresa ESSBIO, la cual se encuentra realizando pruebas en suelos forestales, midiendo el crecimiento de los árboles en cuanto a área basal, altura y volumen. De estas pruebas ha resultado que su aplicación forestal resulta favorable en cuanto al aumento de nutrientes, como el nitrógeno, fósforo y potasio y se considera un impacto positivo al mejorar la calidad de los suelos. Por otra parte, se pudieron detectar impactos

negativos, como la generación de olores (Badilla, 2011), lo que ocurre como consecuencia de la actividad biológica presente en dichos residuos. Por lo tanto, esta generación de olor, se debe al no manejo o control apropiado de los lodos dispuestos, en donde cuya emisión, puede ser percibido como no sanitario debido al origen de los sólidos. Haciéndose necesario estabilizar los lodos antes de su disposición (EPA, 2000b).

Como escenario futuro y para efectos de evitar la situación comentada anteriormente, la empresa sanitaria ESSBIO se encuentra evaluando un proyecto denominado “*Centro de tratamiento y disposición de biosólidos Pemuco*” con un periodo de vida útil de 10 años. Este proyecto contempla tratar todos los biosólidos generados por ésta empresa en nuestra región, considerando una cantidad anual a tratar de 25.000 toneladas. De acuerdo a lo anterior, se tratarían los biosólidos producidos en 33 PTAS de las 34 presentes, ya que la PTAS restante, no pertenece a dicha empresa. Además, no se considerarán aquellas PTAS de gran tamaño como lo son aquellas ubicadas en Concepción, Chillán y Los Ángeles, en donde los lodos generados son tratados mediante digestión. Los lodos generados en las PTAS ubicadas tanto en Chillán como en Los Ángeles, serán llevados al centro de tratamiento sólo si el sistema de digestión fallara.

4.3 Aspectos legales

La aplicación de los lodos en el suelo es una tendencia que está siendo cada vez más usada (EPA, 2000a). Sin embargo, se deben cumplir ciertos parámetros para lograr su disposición final de forma segura en este sitio.

Con respecto a las regulaciones aplicadas a los biosólidos generados durante el tratamiento de las aguas servidas y a su uso benéfico en el suelo, Chile ha seguido ejemplos internacionales, pudiendo encontrar a la Agencia de Protección Ambiental

(EPA), que en su Norma 503 recomienda estándares para la aplicación y disposición del biosólido en suelo. Es por lo anterior que a partir del año 2009, Chile comienza a regular el manejo adecuado de los biosólidos con la finalidad de prevenir eventuales impactos negativos para la salud humana y para el medio ambiente con la entrada en vigencia del D.S 4/2009 (MMA, 2009).

El D.S 4/2009 es un reglamento para el manejo sanitario de lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas. Contempla un conjunto de operaciones a las que se somete el lodo luego de su generación, en donde se incluye el almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final. Este decreto, clasifica los lodos a aplicar en el suelo por clases, en clase A y clase B, en donde la diferencia entre ellos radica en el contenido de microorganismos presentes.

- Lodo clase A: corresponde a un lodo de clase excepcional, sin restricciones sanitarias para la aplicación en el suelo ya que son tan seguros para su manejo como los productos agrícolas y de horticultura.
- Lodo clase B: corresponde a un lodo apto para la aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según el tipo y localización de suelos. Estas restricciones sanitarias corresponden a la limitación de consumo por el ganado y control en el periodo de cosechas.

Para la aplicación benéfica de los lodos al suelo, estos deben ser previamente estabilizados. Para ello se define una serie de cumplimientos de acuerdo al método utilizado, ya sea secado térmico, compostaje, tratamiento con calor, tratamiento alcalino, entre otros. Sin embargo, para efectos de este estudio solo se considerará la estabilización alcalina como se muestra en la **Tabla 8** con el fin de perseguir los objetivos planteados anteriormente.

Tabla 8. Estabilización alcalina de lodos de acuerdo a clasificación sanitaria.

Parámetro	Requisito	Verificación del cumplimiento
Estabilización del lodo	Reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios.	Lodos que se les ha reducido los sólidos volátiles en un 38% como mínimo
Estabilización alcalina de lodos	Lodos clase A	Acondicionamiento con cal. El pH del lodo es elevado a niveles por sobre 12, por un periodo no inferior a 72 horas. Durante dicho periodo la temperatura del lodo deberá ser superior a 52 °C por un periodo no inferior a 12 horas. Adicionalmente, después de transcurridas 72 horas el lodo deberá secarse al aire hasta obtener un contenido de sólidos totales de 50% o más.
	Lodos clase B	Procedimiento en el cual se agrega cal, viva o apagada, para elevar el pH de los lodos a 12 durante un periodo no inferior a dos horas.

Fuente: MMA, 2009

Como se mencionó anteriormente para ser aplicados en suelos, los lodos estabilizados deben cumplir ciertos parámetros relacionados con el riesgo de contaminación para proteger la salud pública y el medio ambiente. Los parámetros son medidos en cuanto a la cantidad de microorganismos presentes y metales pesados en base materia seca, siendo este último parámetro ambiental el considerado en este trabajo. De acuerdo a la información anterior, en la Tabla 9 se observan los valores establecidos en normativas de diferentes países, pudiendo encontrar a Chile con el D.S.4/2009, norma 503 de la EPA y el real decreto 1310/1990 de España.

Tabla 9. Concentraciones máximas de metales pesados en lodos.

Metal	Concentración máxima de sólidos totales (mg/kg) (base materia seca)			
	D.S. 4/2009	Norma 503	R.D. 1310/ 1990	
	pH > 5		pH<7	pH <7
Arsénico	20	75	-	-
Cadmio	8	85	20	40
Cobre	1000	4300	1000	1750
Mercurio	10	840	16	25
Níquel	80	57	300	400
Plomo	300	75	750	1200
Selenio	50	420	-	-
Zinc	2000	100	2500	4000

Es importante mencionar que la diferencia entre los valores presentados, se debe a las características de los suelos receptores. Una de las diferencias que se puede observar, corresponde al pH establecido en cada una de las normas, en donde cada valor estipula de forma específica las concentraciones máximas que debe tener el

lodo para ser aplicado a él. Es decir, el D.S 4/2009, establece los niveles máximos de metales pesados permitidos para poder ser dispuestos en suelo éstos deben tener como característica un pH sobre 5 (MMA, 2009). Sin embargo, también se debe tener presentes otros factores tales como su contenido de metales previa intervención.

4.4 Evaluación de proyectos

La preparación y evaluación de proyectos busca recopilar, crear y analizar un conjunto de antecedentes económicos, los cuales permiten juzgar cualitativamente y cuantitativamente las ventajas y desventajas de asignar recursos a un determinado proyecto (Sapag y Sapag, 1991). Así, un proyecto es una fuente de costos y beneficios que ocurren en distintos periodos de tiempo. Es el origen de un flujo de fondos provenientes de ingresos y egresos de caja, que ocurren a lo largo del tiempo como forma de solución inteligente al planteamiento de un problema (Sapag y Sapag, 2008).

Existen diversas formas de abordar el tema de proyectos, siendo la comparación de costos nuevos, suministros o financiación y la búsqueda de la alternativa de menor costo. Es por esto que la selección de proyectos es un proceso de decisión complicado que se ve afectado por variables críticas como las condiciones del mercado, materia prima, probabilidad de éxito y regulaciones, entre otros (Wang *et al.*, 2009).

Uno de los mayores problemas que se presenta al realizar el estudio y evaluación económica de proyectos radica en justificar económicamente la inversión de recursos en un proyecto que se enfrenta a condiciones incertidumbre. Al evaluar este tipo de proyectos se presentan dos visiones: la evaluación estratégica, que se enfoca en lo que el proyecto puede llegar a lograr cualitativamente y la teoría financiera, que se enfoca en lo que el proyecto puede llegar a lograr cuantitativamente (Garrido y Andalaf, 2003).

La viabilidad económica es el factor en el que normalmente se centra un estudio de inversión. Sin embargo, existen variables como la demanda, materia prima, insumos y accesibilidad, que pueden determinar que un proyecto se concrete o no. Estas variables pueden determinarse con un estudio técnico del proyecto, el cual busca analizar elementos que tienen relación con la ingeniería básica del producto y proceso, describiendo de forma detallada los requerimientos para su realización. En esta etapa se determinan los costos necesarios para la implementación del proceso, por lo que es base para el posterior estudio económico (Sapag y Sapag, 1991). Los métodos tradicionales de evaluación económica de proyectos basados en la teoría financiera, corresponden al Valor Actual Neto (VAN), Valor Actual de Costos (VAC), los Árboles de Decisión y la Simulación de Montecarlo (Garrido y Andalaf, 2003).

El VAN corresponde al criterio económico de evaluación más difundido y aceptado por los evaluadores de proyectos. Su resultado muestra cuánto gana el inversionista por sobre lo que quiere ganar, después de recuperada la inversión. La rentabilidad la muestra en valores monetarios equivalentes en el momento cero, es decir, en el momento donde se hace la inversión.

Aquella evaluación referida a los costos (VAC), corresponde a los Costos Actuales tal como lo dice su nombre, asociados a la puesta en marcha de un proyecto o escenario en particular, tomando en cuenta únicamente los costos o egresos para cada periodo de tiempo a diferencia del VAN que considera los costos y beneficios.

5 METODOLOGIA

5.1 Área de estudio

Como se muestra en la **Figura 17**, el área de estudio corresponde a la región del Biobío y cuenta con una población proyectada de 2.036.443 personas según el Instituto Nacional de Estadísticas para el año 2011 (INE, 2011).

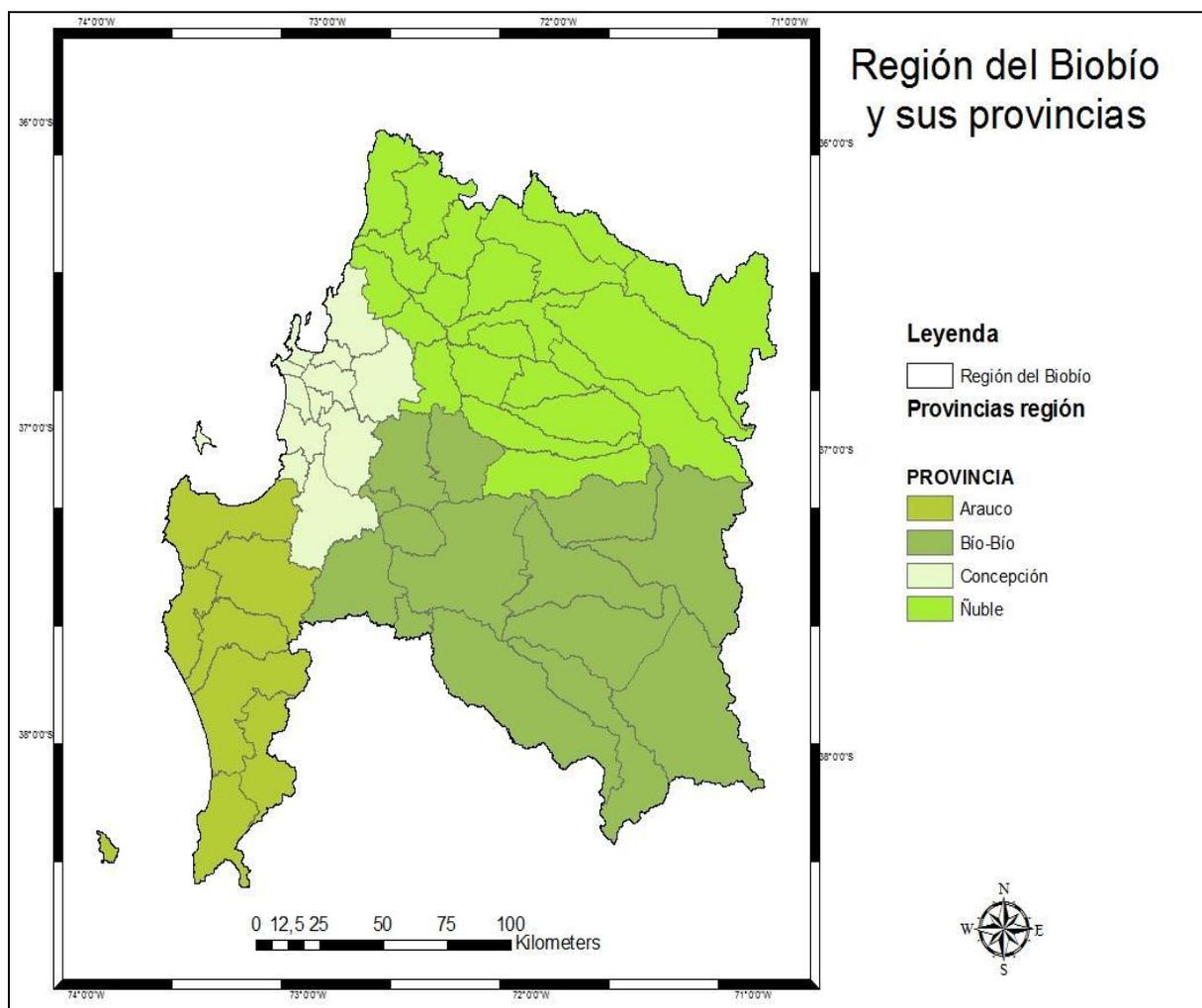


Figura 17. Región del Biobío y sus provincias

5.2 Caracterización y cuantificación de dregs y grits producidos por una planta de celulosa Kraft.

La cuantificación de los residuos producidos en las plantas de celulosa Kraft presentes en la región, se realizó mediante el diseño propuesto por Zambrano *et al.* (2003) para una planta de producción a base de *Pinus Radiata*. Para llevar a cabo lo anterior, se utilizó la producción actual de cada una de las plantas, la cual fue obtenida de los reportes de sustentabilidad del año 2009 para la empresa Arauco, tomando este año, como el último año de normal funcionamiento, antes del terremoto en 2010 y desde el sitio web de CMPC para las plantas pertenecientes a dicha empresa.

Si bien, todos los procesos de recuperación química funcionan de la misma forma, las diferencias radican en la especie de madera utilizada y las eficiencias de cada uno de los equipos dentro del proceso en las distintas empresas. Así, el primer paso para la utilización de este diseño, fue asumir que los equipos tienen la misma eficiencia y que la producción de celulosa es a base de Pino, como se menciona en dicho estudio. La forma de utilizar este esquema, consistió en realizar el cálculo de los porcentajes de cada una de las corrientes de la **Figura 18**. Este cálculo se realizó de acuerdo a la cantidad de celulosa producida durante el año de la publicación, la cual correspondía a 950 ton/día para esa planta en particular. La corriente C1 corresponde al licor negro concentrado y el valor de ella, es un porcentaje correspondiente a la cantidad de celulosa producida en el año 2003 por dicha planta.

Se debe mencionar que para efectos de este cálculo, hay corrientes especificadas por Zambrano *et al.* (2003), que no fueron consideradas, ya que no presentan importancia o efecto dentro del cálculo que se llevó a cabo.

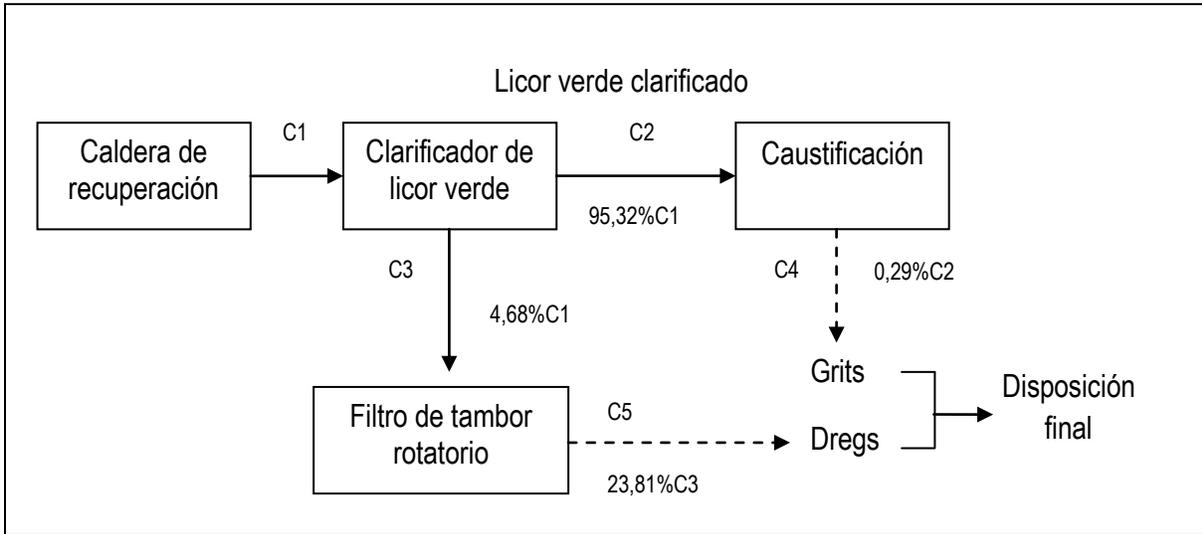


Figura 18. Funcionamiento y rendimiento de la recuperación de reactivos. Diseño propuesto por Zambrano *et al.* (2003), donde C: corriente.

5.3 Evaluación de las necesidades regionales de uso de un agente estabilizador para los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas.

Para la evaluación regional de la cantidad de agente estabilizador (Cal) a utilizar, primero se debió realizar el cálculo de los biosólidos generados en la región y así, posteriormente determinar la cantidad total de cal requerida para su neutralización mediante datos teóricos proporcionados por Metcalf & Eddy, (2003).

El cálculo de los biosólidos generados, se realizó mediante datos proporcionados por la industria sanitaria para un periodo de tiempo de tres años (2007 – 2009). Para dicho periodo se calculó la producción mensual de biosólidos para cada PTAS y a partir de esto, el total anual de cada una de ellas. Es importante mencionar que existen plantas de tratamiento de aguas servidas de las que no se cuenta con información de generación de biosólidos, como lo son Cobquecura, Contulmo, Ñipas, Pemuco, Quilaco, Quilleco, San Ignacio, Santa Clara, Yungay y Parque Industrial Coronel para los tres años estudiados. Para el año 2008 se debe agregar la planta ubicada en la localidad de Pinto y para el año 2007 además, Dichato y Santa Bárbara. En estos casos se estimó la cantidad de lodos producidos por cada una de las localidades que no contaban con esta información. Lo anterior de acuerdo a la modalidad de lodos activados utilizados, lo que se realizó mediante los siguientes puntos:

- Se agruparon las PTAS con información de producción de lodos de acuerdo a la modalidad de lodos activados con la cual cuentan (aireación extendida, convencional y SBR).
- Luego para cada una de las agrupaciones, se realizó la sumatoria de la producción de lodos (ton/año) y la sumatoria del total de la población (Hab) que es abastecida bajo cada modalidad. Para finalmente calcular una constante de generación por persona en cada una de las modalidades estudiadas. Tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_{(Modalidad)} = \sum B_{(Modalidad)} (\text{ton/año}) / \sum P_{(Modalidad)} (\text{Hab}) \quad \text{Ecuación (2)}$$

En donde C: Constante; B: Biosólidos; P: Personas.

- La constante calculada, fue utilizada en el cálculo del total de biosólidos producidos en cada modalidad. Lo anterior, ocurre mediante la multiplicación de ella por la cantidad de personas abastecidas de servicio en aquellas localidades sin información de producción de lodos, según la cifra presentada por ESSBIO (2010), como lo muestra la siguiente expresión:

$$TB (\text{ton})_{(Modalidad)} = C_{(Modalidad)} * PS (\text{Hab})_{(Modalidad)} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde TB: Total biosólidos; C: Constante; PS: Personas sin información

- Finalmente, se calculó la totalidad de biosólidos producidos en la región, realizando la sumatoria de los totales de biosólidos producidos en cada modalidad de acuerdo tal como se presenta a continuación:

$$TPB (\text{ton/año}) = \sum TB (\text{ton/año})_{(Modalidad)} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde TPB: total producción biosólidos; TB: Total biosólidos

Luego de haber calculado el total de biosólidos producidos en la región, se calculó la cantidad de él en base seca. Es decir, la cantidad de materia seca presente en ellos, sin considerar la humedad contenida. Esta humedad correspondió a 85,4% según Lepe (2002). Posteriormente, se realizó el cálculo de cal requerida para lograr su estabilización mediante la siguiente expresión:

$$\text{Cantidad de Ca(OH)}_2 (\text{ton}) = TPB (\text{ton/año}) * \text{kg de Ca(OH)}_2 (\text{promedio, máx,mín})$$

Cabe destacar que los kilogramos de Hidróxido de calcio utilizados, corresponden a aquellos presentados en la **Tabla 6**, utilizando un máximo, mínimo y promedio de 430 kg, 210 kg y 300 kg de cal para requeridos para estabilizar lodos biológicos.

5.4 Estudio del proceso de neutralización de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas servidas y propuesta de reemplazo del agente estabilizador (Cal) por dregs y grits.

5.5 Análisis de la viabilidad económica de la alternativa propuesta.

El análisis económico realizado, se encuentra centrado básicamente en el análisis de tres escenarios correspondientes a escenario actual y dos escenarios futuros. En el escenario actual se evaluó el costo de disposición y en los escenarios futuros, el transporte de los residuos para realizar su valoración como neutralizante hacia el centro de tratamiento de biosólidos de Pemuco. Dentro de los escenarios futuros, la diferencia radica en que uno de ellos solo contempla el transporte y el restante, transporte más un beneficio por venta. Para lo anterior se debe tener presente: la cantidad de combustible a utilizar, el valor de venta del producto propuesto y el precio asociado a la disposición en vertedero, lugar donde actualmente se disponen los residuos.

Para llevar a cabo el cálculo de las distancias, se procedió a recopilar las coordenadas geográficas (UTM huso 18) de cada una de las plantas de producción de celulosa y del centro de tratamiento de biosólidos Pemuco, obtenidas desde las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) y el Software Google Earth en ambas situaciones. Posteriormente, mediante ArcMap de esri, se procedió a generar un shape con todos los puntos ingresados al programa.

Para realizar el cálculo de la distancia propiamente tal, se usaron dos shapes uno relacionado con las coordenadas geográficas y otro de las rutas de la Región del Biobío. Ya obtenida la distancia, se calculó el combustible requerido tomando en consideración la cantidad máxima de carga legalmente permitida transportar en las carreteras de nuestro país, de 30 ton/camión.

Para este caso en especial, no se consideró la compra de camiones y mano de obra para realizar la alternativa propuesta, asumiendo que ambos sectores ya cuentan con dichos gastos, considerándose solo el combustible como costo de operación.

El precio unitario del combustible fue establecido por la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2008), el cual se estableció por el precio actual. Mientras que el precio unitario de disposición en vertedero, corresponde al informado por Castañeda (2011), tal como se muestra en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Costos de operación

Ítem	Unidad	Fecha	Precio unitario (\$)	Precio unitario actualizado (\$)
Combustible	Lt	12/2007	552	633
Disposición de residuos	m ³	07/2011	----	10.380

El cálculo del precio del combustible, se determinó utilizando la herramienta calculadora disponible en la sitio web del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la cual trabaja en relación a la variación de los precios al consumidor (Diocaretz y Vidal, 2010). Este precio fue actualizado a Febrero de 2012, dicha transformación se realizó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Variación porcentual} = \left[\left(\frac{\text{Índice de Febrero de 2012}}{\text{Índice de la fecha reportada}} \right) \times 100 \right] - 100$$

Con los valores obtenidos anteriormente, se calculó el Valor Actual Neto y Valor Actual de Costos (VAN y VAC respectivamente) del proceso de reemplazo del agente estabilizador por dregs y grits en los escenarios propuestos. Este indicador económico permite sumar costos y beneficios que se producen en distintos períodos de tiempo, los cuales no pueden ser sumados directamente debido a que el valor del dinero varía en el tiempo, es decir, no tiene el mismo valor dinero de hoy que dinero futuro. Para corregir esto, el VAN "actualiza" los flujos futuros de costos y beneficios mediante una

tasa de descuento, transformándolos en flujos expresados en dinero de hoy, para luego sumarlos sobre una base común. El objetivo, es obtener un VAN igual o superior a cero para que el proyecto resulte rentable y se calcula de la siguiente manera:

$$VAN = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i}$$

Luego, el VAC, al considerar solo costos y de acuerdo a la fórmula anterior, se grafica de forma negativa al no contemplar beneficios tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$VAC = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

En donde para ambos casos "r" es la tasa de descuento, "n" es el horizonte de evaluación del proyecto (número de períodos de tiempo a considerar en el análisis) y B_i y C_i son los beneficios y costos del período "i".

6 RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se presentan los resultados del estudio técnico, económico y ambiental de la alternativa propuesta, la que se refiere a la aplicación de dregs y grits, provenientes del proceso Kraft en la estabilización de biosólidos generados en PTAS de tecnología de lodo activado, como una nueva forma de disposición o valoración de los primeros. Resultados que incluyen la cuantificación regional de cada uno de ellos, cantidades necesarias para la neutralización, contenido de metales pesado en el producto y finalmente el análisis de beneficios y costos que significa la aplicación de la alternativa.

6.1 Caracterización de dregs y grits de la industria de celulosa Kraft

Los residuos generados en la recuperación química, cuentan con características que los hacen residuos no peligrosos de acuerdo a los parámetros máximos exigidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Generalmente son dispuestos en vertederos, siendo estos últimos depósitos con límites a su capacidad de absorción. Esta disposición causa problemas económicos y ambientales inciertos, obligando a las industrias a intervenir en su reducción y manejo, Debido a esto, la tendencia mundial para resolver el problema de generación de residuos en los diferentes procesos de producción, es buscar alternativas de manejo o bien, asignarles una valoración una vez que ya han sido generados. Estos residuos pueden ser utilizados en distintas áreas en función de sus características, lo que podría ser la solución a su disposición actual (Doldán y Chas, 2001; Gullichsen and Paulapuro, 1998; García and Sousa-Coutinho, 2009; EPA, 1991).

Según los análisis realizados por Zambrano *et al.* (2007), Machado *et al.* (2007), y Cabral *et al.* (2008), los *dregs* y *grits* se comportan de forma similar en cuanto a su composición, como se observa en la **Tabla 11 y 12**. De acuerdo a estos

antecedentes, se evidencia una alta alcalinidad teniendo un pH que varía entre 12 y 13 en ambos residuos. Se observa también, una alta cantidad de calcio, que varía entre 23% y 32% en los *dregs* y 30% y 35% en los *grits*, correspondiendo en ambos casos a porcentajes elevados en comparación con los componentes restantes. Cabe destacar que la materia orgánica presente en ellos, tiene un valor de 3,53% y 0,53% para los *dregs* y *grits* respectivamente, superando los *dregs* 6 veces la cantidad de materia orgánica presente en los *grits*, esto podría explicarse de acuerdo al origen de cada uno como se observó en la **Figura 9**. Los *dregs* provienen directamente de la caldera de recuperación, en donde la materia orgánica es quemada. Sin embargo, de acuerdo a estos datos se desprende que queda un residual que se deposita en dichos residuos.

Para el caso de los nutrientes, se observa que la cantidad de fósforo en *grits* varía de 1,7 g/kg a 3,0 g/kg de residuo encontrándose en mayor que en los *dregs*. En el caso del potasio, éste se encuentra en mayor cantidad en los *dregs* variando en 1,3 g/kg a 3,3 g/kg. El nitrógeno en cambio, se presenta en un bajo contenido en ambos residuos, correspondiente a 0,07 g/kg en los *dregs* y 0,05 g/kg de residuo en los *grits*, lo que corresponde al 0,007% y 0,005% de forma respectiva en la muestra, siendo en ocasiones indetectable en los análisis. Si bien los valores presentados tanto para la materia orgánica como para los nutrientes son relativamente bajos en comparación con los otros elementos, Zambrano *et al.* (2007), afirma que son suficientes para aportar a los suelos y a la vegetación presente, en caso de ser aplicados a él.

Con respecto a la concentración de metales pesados como el Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Hierro (Fe) en ambos residuos, se puede decir que los dos primeros se encuentran presentes en mayor cantidad en *dregs*, mientras que el Fe es mayor en los *grits*. De acuerdo a la evaluación de los metales realizada por Cabral *et al.* (2008), las concentraciones de éstos resultan ser menor al 0,02% en los *dregs* y menor al 0,035% en los *grits*, que al ser muy bajos le permite ser reconocidos como residuos no peligrosos y ser tratados como tal.

Los rangos de variación presentados anteriormente, pueden ser el resultado del tipo de madera utilizada en cada uno de los procesos, por la diferencia en composición y capacidad de captación de metales durante su crecimiento (Lugany *et al.*, 2007).

Tabla 11. Caracterización físico química de los dregs.

Parámetros	Unidades	Zambrano <i>et al.</i> , Cabral <i>et al.</i> , Machado <i>et al.</i> ,		
		2007	2008	2007
Humedad		50,79	-	-
Nitrógeno	g/kg	No detectado	0,07	-
Fósforo	g/kg	2,80	1,60	1,40
Potasio	g/kg	3,30	3,10	1,50
Calcio	g/kg	230,00	249,50	323,90
Magnesio	g/kg	29,50	35,40	14,10
Sodio	g/kg	35,50	70,80	11,60
Azufre	g/kg	24,00		9,80
Aluminio	g/kg	11,20	2,50	3,80
Zinc	g/kg	1,40	0,16	-
Cobre	g/kg	0,35	0,08	-
Hierro	g/kg	9,80	4,10	10,10
Manganeso	g/kg	8,20	4,72	8,60
Boro	g/kg	< 0,01	-	-
M. Orgánica	g/kg	35,30	-	-
Carbonato	g/kg	470,00	-	-
pH		12,78	12,00	-
Granulometría	%	30,00	-	-
Densidad aparente	kg/m ³	760,00	-	-
Níquel	g/kg	-	0,19	-
Plomo	g/kg	-	0,05	-
Cadmio	g/kg	-	0,005	-
Cromo	g/kg	-	0,06	-
Cobalto	g/kg	-	0,02	-

Tabla 12. Caracterización físico-química de los grits.

Parámetros	Unidades	Zambrano <i>et al.</i> , Cabral <i>et al.</i> , Machado <i>et al.</i> ,		
		2007	2008	2007
Humedad		23,39	-	-
Nitrógeno	g/kg	No detectado	0,05	-
Fósforo	g/kg	3,00	1,70	4,70
Potasio	g/kg	1,10	0,80	4,30
Calcio	g/kg	300,00	417,20	346,20
Magnesio	g/kg	3,30	3,60	9,20
Sodio	g/kg	9,20	10,40	64,40
Azufre	g/kg	4,10	-	16,20
Aluminio	g/kg	2,60	1,70	17,20
Zinc	g/kg	< 0,01	0,02	-
Cobre	g/kg	0,01	0,01	-
Hierro	g/kg	1,10	2,20	10,30
Manganeso	g/kg	0,15	0,15	3,60
Boro	g/kg	< 0,01	0,03	-
M. Orgánica	g/kg	5,30	-	-
Carbonato	g/kg	570,00	-	-
pH		12,73	12,60	-
Granulometría	%	57,00	-	-
Densidad aparente	kg/m ³	755,00	-	-
Níquel	g/kg	-	0,03	-
Plomo	g/kg	-	0,03	-
Cadmio	g/kg	-	0,01	-
Cromo	g/kg	-	0,01	-
Cobalto	g/kg	-	0,02	-

6.2 Producción regional de dregs y grits provenientes de la industria de celulosa Kraft

En la **Tabla 13**, se presenta la cantidad de dregs y grits en toneladas mensuales (base húmeda) producida en la Región del Biobío por las industrias de producción de celulosa Kraft presentes.

Tabla 13. Cuantificación de dregs y grits en la Región del Biobío

Plantas	Unidades	Grits	Dregs
Nueva aldea	ton/mes (b.h)	265,05	892,99
Arauco Horcones	ton/mes (b.h)	203,88	686,91
Santa Fé	ton/mes (b.h)	296,79	999,94
Laja	ton/mes (b.h)	92,91	313,03
Total regional	ton/mes (b.h)	858,64	2892,87

De los resultados obtenidos se desprende, que la producción de dregs es tres veces mayor que la producción de grits en el mismo periodo de tiempo, por lo tanto la razón de generación (RG) dregs/grits corresponde a 3,33 (Zambrano *et al.*, 2003). La cantidad total de residuos inorgánicos generados durante la recuperación química es 3.751 toneladas mensuales aproximadas de ambos residuos en mezcla, los que actualmente se depositan en vertedero. Con respecto a la cantidad de residuos generados por tonelada de celulosa producida, se obtuvo que corresponde a 10,43 kg y 3,09 kg de dregs y grits respectivamente. Lo anterior bajo los supuestos que se trata de madera de la misma especie y que la recuperación de reactivos tiene el mismo rendimiento del diseño propuesto.

Si bien actualmente estos tipos de residuos no tienen valor comercial, diversas investigaciones han demostrado que su utilización es posible en diversas áreas como son la minería, construcción y aplicación en el suelo, directa e indirectamente (Castillo, 2008; Zambrano *et al.*, 2010, 2007a, 2005; Cabral *et al.*, 2008). De acuerdo

a estos antecedentes, la generación y cantidad producida de ellos más que un problema, podría verse como un potencial de uso aprovechando sus marcadas características como lo son su alto pH, su alto porcentaje de calcio y baja cantidad de metales. Tema de gran importancia si se considera que la producción de celulosa va en aumento. Lo anterior permitiría aumentar la vida útil de los vertederos donde actualmente se disponen, ya que la cantidad dispuesta sería utilizada con un fin benéfico, otorgándoles un valor agregado a estos residuos, comenzando a llamarse productos. Todo esto, en residuos que actualmente solo significan un gasto para las empresas productoras.

La importancia en el cambio de concepto de residuo a producto o subproducto derivado del proceso, radica en que el sector celulósico continuará aumentando su producción y con ello la producción de residuos. Es por lo anterior que una acción rápida sobre estos últimos, hará la diferencia en la cantidad de superficie a utilizar en su disposición v/s su valoración.

6.3 Producción regional de biosólidos y necesidades de cal

Como se mencionó anteriormente, para el cumplimiento del presente objetivo se debió evaluar la producción de biosólidos en la región. En la **Figura 19** y de acuerdo a la información proporcionada por la industria sanitaria, se puede apreciar que el comportamiento en la producción de biosólidos, no presenta una gran variabilidad durante el periodo 2007 – 2009 para la mayoría de las PTAS presentes en la región. La explicación de lo anterior, puede deberse a que la cobertura del tratamiento de aguas servidas está llegando a su máximo y con ello la generación de residuos. Comenzando estos últimos a ser constantes en el tiempo o muy poco variables. Cabe destacar, que existen plantas de tratamiento de las cuales no se contó con información, tal como se mencionó en la metodología de este trabajo.

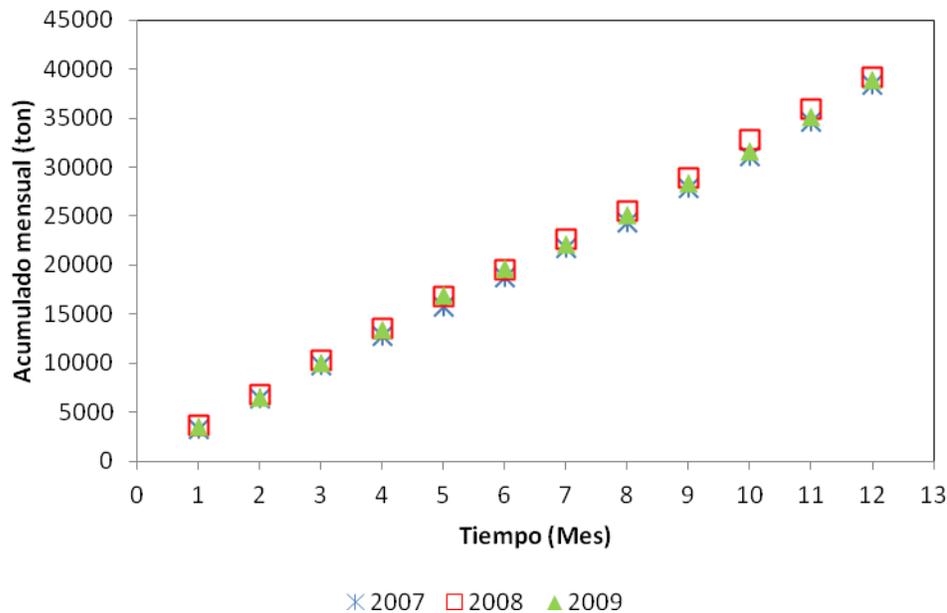


Figura 19. Acumulado mensual de biosólidos en la Región del Biobío para diferentes años.

De acuerdo a la literatura, estos biosólidos pueden ser valorados de diversas formas tales como residuos, siendo dispuesto en vertederos y como mejoradores de suelo entre otros. Es por lo anterior que se debe realizar un tratamiento posterior, con la finalidad de lograr su estabilización (SISS, 2010a; Tapia y González, 2005; EPA, 2000a; Potisek 2010).

Si bien la producción de biosólidos no presenta variabilidad en la acumulación de éstos en los distintos años, dentro del total anual sí la presentan. La explicación a lo anterior, puede deberse al cálculo aproximativo realizado para la obtención de la producción total de biosólidos a nivel regional. Cabe destacar que la acumulación presentada corresponde a datos reales aportados por la empresa sanitaria, los que se utilizaron para la cuantificación de biosólidos regionales mediante aproximaciones. Por lo anterior y como se muestra en **Tabla 14**, es que se observa un aumento a través del periodo evaluado. En ella se muestra la cantidad anual para cada uno de los años en estudio. Recordando que éstos provienen de 34 plantas de tratamiento de

aguas servidas (PTAS) con tecnología de lodos activados. Además, se muestra la cantidad de cal en toneladas, específicamente hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) requerido para elevar su pH a 12 durante 30 minutos de acuerdo a los valores proporcionados por Metcalf & Eddy, (2003). Los factores de cálculo para obtener la cantidad requerida de cal para lograr la estabilización, corresponden a la cantidad de hidróxido de calcio mínima, máxima y promedio correspondiente a 210, 430 y 300 g de cal por kg de lodo biológico respectivamente. En donde cada valor, fue multiplicado por la cantidad regional total al año de lodo generado, dando como resultado la **Tabla 14**.

Tabla 14. Producción de biosólidos y necesidad de cal para su neutralización.

Año	Total regional de biosólidos (ton)		Cantidad de cal (ton)		
	Base húmeda	Base seca	Máximo	Mínimo	Promedio
2007	39.850	5.818	2.502	1.222	1.745
2008	41.093	6.000	2.580	1.260	1.800
2009	41.147	6.008	2.583	1.262	1.802

Se puede apreciar que la producción de biosólidos ha aumentado a través de los años, produciendo 39.850 toneladas para el año 2007 hasta llegar a 41.147 toneladas al año 2009. Este aumento conlleva al aumento en la cantidad de agente estabilizador a utilizar, siendo este en promedio 1.745 toneladas y 1.802 toneladas de Ca(OH)_2 para los años 2007 y 2009 respectivamente aplicados en base seca, asumiendo una humedad de 85,4% (Lepe, 2002)

De forma gráfica, en la **Figura 20** se presentan las variaciones de producción de biosólidos en base húmeda. La variación presentada, expresada porcentualmente en relación de un año con respecto al anterior, corresponde a 3,03 % para los años 2007 – 2008 y de 0,13 % para los años 2008 – 2009. Esta disminución en la variación porcentual, reafirma lo planteado en el acumulado mensual obtenido anteriormente, al

considerar que el nivel de producción de lodos de acuerdo a la cobertura actual, está llegando a su máximo, teniendo como consecuencia una producción de lodos más estable (SISS, 2010a).

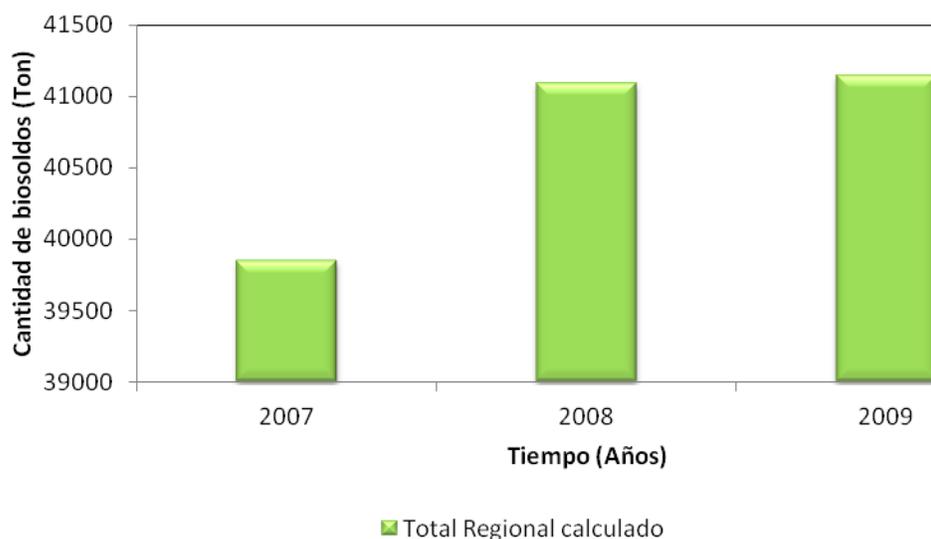


Figura 20. Biosólidos generados en la Región del Biobío.

Como se especificó en los antecedentes del presente estudio, actualmente existe un escenario futuro encontrándose en elaboración un proyecto para la creación de una planta de disposición y tratamiento de biosólidos en nuestra la región. Dicho proyecto contempla el tratamiento de los lodos provenientes todas las PTAS pertenecientes a ESSBIO S.A., excepto aquellos provenientes de la PTAS de Concepción. Para el caso de los lodos generados en las PTAS de Chillán y Los Ángeles, éstos serán enviados solo si se presenta algún daño en el sistema de estabilización, que para las tres plantas mencionadas anteriormente corresponde a digestión. Recordando además, que la PTAS de Parque Industrial Coronel no se considera por no pertenecer a la empresa anteriormente mencionada.

Así, cuantificando nuevamente la cantidad de lodos que realmente serán estabilizados en la región en un futuro escenario y tal como se muestra en la **Figura 21**, corresponden a 8.187 toneladas, 10.960 toneladas y 13.133 toneladas para los años

2007, 2008 y 2009 respectivamente. Siendo para el año 2009 aproximadamente un 32% del total producido.

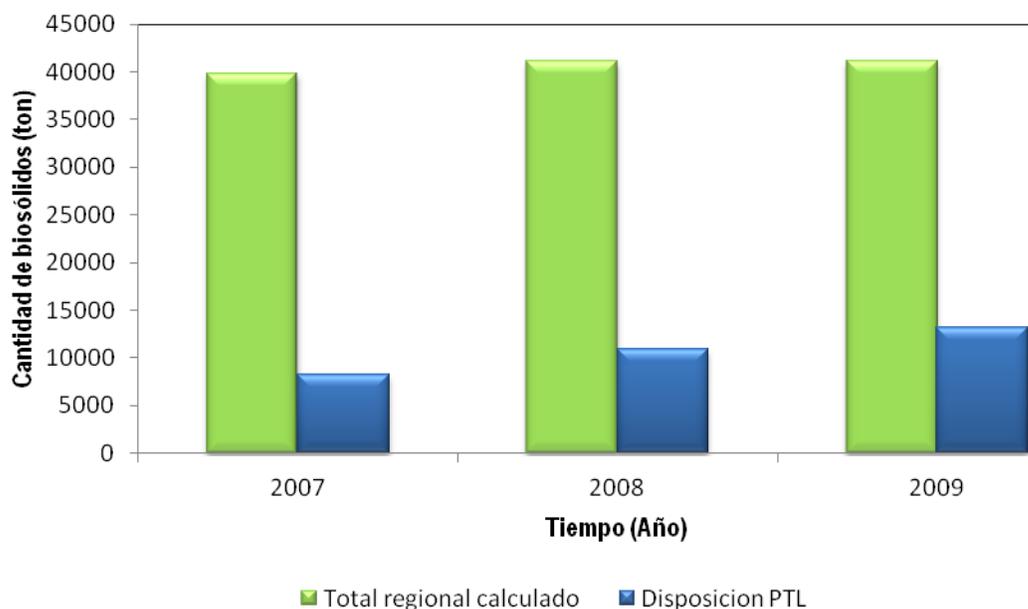


Figura 21. Cantidad de Biosólidos estabilizados en escenario futuro

Bajo el supuesto que la estabilización y/o tratamiento de todos los lodos en dicha planta se llevará a cabo solo mediante la adición de cal y durante todo el año, se obtiene como resultado que para la estabilización de lodos en forma constante, no considerando las PTAS de Chillán, Los Ángeles, Concepción y Parque Industrial Coronel, la cantidad de cal promedio necesaria corresponde a 359 toneladas, 480 toneladas y 575 toneladas de forma respectiva para los años 2007, 2008 y 2009 tal como se presenta en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Cantidad de biosólidos a estabilizar en escenario futuro y requerimiento de cal.

Año	Disposición en PTL (ton)		Cantidad de cal (ton)		
	Base húmeda	Base seca	Máximo	Mínimo	Promedio
2007	8187	1195	514	251	359
2008	10960	1600	688	336	480
2009	13133	1917	825	403	575

Cabe destacar que este rango de aplicación de cal referido al máximo, mínimo y promedio, se refiere a la variación en las características de los biosólidos. Variación que se debe al tamaño de las PTAS, que en nuestra región tiene gran variabilidad. Siendo la razón de lo anterior, la cantidad de agua tratada mensualmente, origen y características del agua, tipo de tratamiento de lodos activados y la operación de la planta de tratamiento (Metcalf & Eddy, 1995). Siendo este último ítem, de gran importancia en la cantidad y calidad del residuo generado.

Es importante señalar además, que existen diferentes formas en la que el calcio se puede utilizar como neutralizante, siendo aquel más efectivo el óxido de calcio, al generar una reacción exotérmica llegando a los 50°C y producir un rápido aumento de pH (Hassibi, 1999).

6.4 Proceso de neutralización de biosólidos mediante la aplicación de dregs y grits.

Para el proceso de neutralización se deben considerar la mezcla de dregs y grits lo más seca posible.

Los resultados de esta investigación, arrojan.....

Este trabajo es el pionero en este ámbito a nivel nacional, ya que todos los otros estudios se relacionan a la aplicación de estos residuos al suelo....bla bla bla.....

Sin embargo al no contar con información exacta de su composición, se debió realizar una serie de supuestos como.....que llevan a un margen de error. Lo anterior corresponde a una primera aproximación

Ver cuanto residuos requiero a nivel regional para estabilizar todos los biosólidos de la planta.....me alcanza??????

6.5 Análisis económico

Como se ha mencionado anteriormente, los dregs y grits son considerados actualmente como un gasto para las empresas productoras de celulosa Kraft. Lo anterior, por el desembolso en dinero y utilización de terreno que significa hacerse cargo de ellos al disponerlos en vertedero. Por el motivo anteriormente presentado, se evaluaron económicamente tres escenarios, no contemplando en ninguno de ellos costos de inversión. Esto último debido a que no se requieren procesos de transformación para llevar a cabo cada uno de ellos.

Cabe destacar que para la evaluación de dichos escenarios, no se contempló mano de obra, maquinaria y desgaste, al asumir que todos estos costos ya se encuentran considerados en las actividades realizadas actualmente por las empresas productoras de celulosa y también en el proyecto futuro centro de tratamiento de biosólidos presentados por ESSBIO a las autoridades pertinentes. Así, se consideró solo el combustible como costo de operación.

6.5.1 Análisis situación actual

En la **Tabla 16** se muestran los costos de operación para el escenario actual, correspondiente a la disposición en vertedero, con un valor por metro cúbico dispuesto de \$ 10.380. Suponiendo este último dato, constante en todas las plantas de producción de celulosa.

Tabla 16. Costos de operación mensual asociados a escenario actual

Plantas	Total (m3/mes)		Costo de disposición (\$/m ³)		
	Dregs	Grits	Dregs	Grits	Total mensual
Nueva aldea	1.175,0	353,4	12.196.363	3.668.292	15.864.655
Arauco Horcones	903,8	271,8	9.381.744	2.821.699	12.203.444
Santa Fé	1.315,7	395,7	13.657.075	4.107.574	17.764.649
Laja	411,9	123,9	4.275.331	1.285.874	5.561.205
Total regional	3.806,4	1.144,8	39.510.514	11.883.439	51.393.953

Para el escenario actual, aquel residuo que conlleva el mayor gasto de disposición, es el dregs para todas las plantas de producción de celulosa Kraft. Esto último de acuerdo a los resultados de cuantificación obtenidos en el presente estudio. A nivel regional, este gasto en dinero se traduce a espacio utilizado por los residuos dispuestos, correspondiendo a un total de 4.951 m³ a nivel regional, volumen que disminuye la vida útil de dichos vertederos. Generando además, una presión sobre el recurso suelo.

De acuerdo a lo anterior, en la **Tabla 17** se muestran los costos anuales y el VAC asociado a cada una de las plantas de producción para un período de 10 años y una tasa de descuento de 10%.

Tabla 17. Costos anuales y VAC para cada una de las productoras de celulosa

Plantas	Costo anual (\$/m ³)	VAC (\$)
Nueva aldea	190.375.865	1.169.777.247
Arauco Horcones	146.441.324	899.818.543
Santa Fé	213.175.786	1.309.872.925
Laja	66.734.462	410.054.382

Se desprende de la tabla presentada, que la industria productora de celulosa que mayor costo de disposición tiene, corresponde a la planta Santa Fé. Considerando dos líneas de producción, las que corresponden a Santa Fé I y II. Para el total regional, esta práctica aparte de producir gastos y utilización de terreno, si se proyecta al final de la vida útil de dicho vertedero, se deberá construir otro sitio de acopio generando gastos de construcción en un futuro.

6.5.2 Análisis escenario 1

De acuerdo a lo especificado en la introducción al análisis económico, para este escenario solo se consideró el combustible como costo de operación

6.5.3 Análisis escenario 2

Al igual que el escenario anterior, se consideró solo el combustible como costo de operación + un valor de venta al residuo....lo que se calculo en base al valor maximo del producto utilizado actualmente para dicho fin, la cal comercial.

7 CONCLUSIONES

De acuerdo al aporte regional de producción de celulosa en el contexto nacional, la cantidad de residuos inorgánicos generados provenientes de la recuperación de reactivos resulta ser elevada, lo que conlleva a gastos en dinero y espacio para las empresas que lo producen. Es por lo anterior que el escenario actual de depósito en vertedero, resulta ser económicamente desfavorable. Sin embargo estos residuos presentan características que les proporcionan atributos para ser valorados en otros sectores. Sus características alcalinas y gran porcentaje de calcio presente en ellos, sugirió la posibilidad del reemplazo de la cal comercial en la estabilización de biosólidos por este tipo de residuos, que desde el momento de darles un valor agregado, podrían llamarse producto o subproducto derivado del proceso Kraft de producción de celulosa.

Por otro lado, la cantidad de biosólidos generados en la región con la necesidad latente de estabilización también es elevada, contando entonces con un sector que podría recibir y dar un uso a los dregs y grits producidos, generando un posible mercado de negociación para la neutralización propuesta. Químicamente esta neutralización resulta factible de forma teórica, considerando todos los supuestos establecidos para dicho cálculo, cumpliendo además con el parámetro ambiental establecido.

Así, la utilización de los dregs y grits resulta técnica, económica y ambientalmente factibles en relación a su disposición en vertedero, aceptando la hipótesis propuesta. Sin embargo, es recomendable la experimentación en laboratorio para corroborar los resultados presentados.

8 BIBLIOGRAFIA

Arauco. 2009. Reporte de sustentabilidad. 145 pp.

Arauco. 2010. *Manual de Operaciones Vigentes*.

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

Badilla, C. 2011. Beneficios Ambientales y Productivos de la Aplicación de Lodos en un Terreno Forestal de la VIII Región del BIOBIO, CHILE. XIX congreso de ingeniería sanitaria y ambiental AIDIS, Chile.

Baraño, P., Tapia, L. 2004. Tratamiento de las Aguas Servidas: Situación en Chile. *Ciencia & Trabajo* 6(13): 111 - 117.

Bird, M., and Talbert, J. 2008. Waste Stream Reduction and Reuse in the Pulp and Paper Sector, *Center for Sustainable Economy*. 45 pp.

BRACELPA. 2011. Publicación mensual de la asociación Brasileña de celulosa y papel. Adquirido desde: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/188>.

Cabral, F., Ribeiro, H., Hilário, L., Machado, L., and Vasconcelos, E. 2008. Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials, *Bioresource Technology*, 99: 8294 – 8298.

Castañeda, J. 2011. Estudio técnico y económico de un proceso de compostaje de los residuos sólidos frente a la generación de energía y disposición actual en la industria de celulosa. Habilitación presentada para optar al título de Ingeniero Industrial. Universidad de Concepcion, Chile. 93 pp.

Celis, P., Henriquez, P., Lopez, C., Poblete, L., y Cameron M, 2010. Informe de avance, estudio de diagnóstico energético y de prospección de oportunidades de

eficiencia energética en el sector de celulosa y papel. Extraído desde:
http://www.acee.cl/576/articles-61099_doc_pdf.pdf.

CEPAL, 2005. La inversión extranjera en América latina y el Caribe, extraído desde:
http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/43289/2011-322-LIE-2010-WEB_ULTIMO.pdf. 189 pp.

CNE, 2008. Evolución precio a público petróleo diesel. En:
http://anuario.cne.cl/anuario/hidrocar/php_hidrocar-5.3.php

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.

Cortez, E. 2003. Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la región Metropolitana, memoria para optar al título de ingeniero civil químico, Dpto. de ingeniería civil química, facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile.

CMPC, 2011. Proceso productivo de celulosa Kraft. En:
http://www.papelnet.cl/celulosa/01_fases%20de%20produccion.html.

CMPC, 2012. Plantas, en
<http://www.cmpccelulosa.cl/espanol/mills/carga2.asp?pagina=laja.htm&ancla=>

Czechowski, F., Marcinkowski, T. 2006. Sewage sludge stabilisation with calcium hydroxide: Effect on physicochemical properties and molecular composition. *Water Research* 40: 1895-1905.

Davis, W. T. 2000. *Air Pollution Engineering Manual, Second Edition*. Canadá: John Wiley & Sons. 856 pp.

Diocaretz, M., y Vidal, G. 2010. Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas. Tesis para

optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 119 pp.

DIRECTEMAR, 2007. Emisarios sub-marinos en Chile, extraído desde: http://www.directemar.cl/images/stories/Descargas_SPMAA/Destacados/informe_emisarios_submarinos.pdf, 39 pp.

Doldán, x., y Chas, M. 2001. La contaminación de la industria de pasta-papel en Galicia: un análisis de flujos de materiales y energía, *Estudios de economía aplicada*, 18: 143 – 158.

Ecoamerica. 2007. Tratamiento biológico de aguas residuales, 66: 18 – 22.

EPA. 2000a. Folleto informativo de tecnología de biosólidos: aplicación de biosólidos al terreno, extraído desde: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1008DQ3.txt>. 13 pp.

EPA, 2000b. Folleto informativo del manejo de biosólidos y residuos: Control de olores en el manejo de biosólidos, extraído desde: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1009H5R.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX+DATA%5C00T HRU05%5CTXT%5C00000026%5CP1009H5R.TXT&User=anonymous&Password=anonymous&ImageQuality=r85g16%2Fr85g16%2Ffx150y150g16%2Fi500&Display=hpfrw&Back=ZyActionS&MaximumPages=5&Query=fname%3D%22P1009H5R.TXT%22#>. 21 pp.

European Lime Association. 2004. Encalado: Un tratamiento avanzado que permite el reciclaje de lodos de depuradoras EDAR en la agricultura. Brussels, Belgium. 4 pp.

Fuentes, D., y Silva, J. 2007. Determinación de los criterios técnicos para el adecuado establecimiento de los niveles máximos permisibles de cobre en suelos agrícolas de Chile, “Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de ingeniero ambiental, universidad de Santiago de Chile. 231 pp.

Freeman, H. M. 1998. *Manual de la prevención de la contaminación ambiental*. México: McGraw-Hill. 943 pp.

Garcia, M., and Sousa – Coutinho, J. 2009. Grits and dregs for cement replacement – Preliminary studies. Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), extraído desde: <http://opus.bath.ac.uk/16170/1/papers/Paper%20122.pdf>. 8pp.

Garrido, I., y Andalaf, A. 2003 Evaluación económica de proyectos de inversión basada en la teoría de opciones reales, revista ingeniería industrial, 1: 8pp.

Gullichsen, J., and Paulapuro, H. 1998. *Environmental Control*. Finlandia: Fapet Oy. 234 pp.

Hassubi, M. 1999. Una perspectiva general del apagado de cal y los factores que afectan al proceso, 3° Symposium internacional Sorbalit. New Orleans – USA.

Henry, J., and Heinke, G. 1999. Ingeniería ambiental, Pearson educación. México. 800 pp.

INE. 2011. Chile: Estimaciones y Proyecciones de Población por Sexo y Edad. Regiones 1990-2020, extraído desde: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/demografia_y_vitales/demografia/demografi_a.php 89 pp.

INFOR. 2011. Producción de celulosa 1979-2009. Adquirido desde: http://www.infor.cl/archivos/series_estadisticas/Produccion_y_Consumo/produccion4.pdf

INIA. 2011a. tecnología de lodos activados, extraído desde: www.sinia.cl/1292/articles-49990_30.pdf, 4 pp.

INIA. 2011b. Tecnología de lagunas aireadas, extraído desde: www.sinia.cl/1292/articles-49990_29.pdf, 5 pp.

Katz, J., Stumpo, G., y Varela, F. 1999. CEPAL. El Complejo Forestal Chileno, Adquirido desde: <http://www.eclac.org/cgi-bin/getprod.asp?xml=/ddpe/noticias/paginas/7/15077/P15077.xml&xsl=/ddpe/tpl/p18f.xsl&base=/ddpe/tpl/top-bottomudit.xsl>. 102 pp.

Lazcano, I. 2000. IPNI. Cal agrícola: Conceptos básicos para la producción de cultivos, informaciones agronómicas, extraído desde: [http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/\\$webindex/536AE3880B2192DC06256AD1005C3356/\\$file/IA+COM+4-4.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/$webindex/536AE3880B2192DC06256AD1005C3356/$file/IA+COM+4-4.pdf). 4 (4): 4 - 6.

Lepe, A. 2002. Lodos provenientes de plantas de aguas servidas: potencialidades y restricciones; temores y realidades. *XXVIII Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental*, México.

Lepe, A y Coronado, J. 2003. Caracterización y tipología de lodos, *XV congreso de ingeniería Sanitaria y ambiental*, ADIS, Chile.

Llugany, M., Tolrà, R., Poschnrieder, C., y Barceló, J. 2007. Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre?, *Ecosistemas* 16 (2): 4-9.

Luraschi, M. 2007. CEPAL. Análisis de la cadena productivo de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: estudio del caso de Chile, adquirido desde: <http://www.uneca.org/fssdd/events/WorkshopTradeJan2011/Documents/Latin/documents/Marco%20Luraschi-Papel%20y%20Celulosa-Chile.pdf>. 96 pp.

Machado, F., Munhoz, J., Ferracin, L., and da Cunha, C. 2007. Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a Kraft pulp and paper mill, *Journal of Hazardous Materials*, 147: 610–617.

McGhee, T. 1999. Abastecimiento de agua y alcantarillado. Sexta edición, Editorial McGraw-Hill. 602 pp.

Mahamud, M., Gutierrez, A., y Sastre, H. 1996. Biosólidos generados en la depuración de aguas: (II) Métodos de tratamiento. *Ingeniería del agua*. 3(3): 45 – 54.

Mahmood, T and Elliott, A. 2006. A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry, *Water Research*. 40: 2093– 2112.

Mangus, J., Li, B., Burns, B., Butler, H., and Cole, C. 2006. Impact of lime dose and mixing quality on odor generation by lime – stabilized biosolids, *Water Environment Foundation*. 6848 – 6857.

Manskinen, K., Nurmesniemi, H., and Pöykiö, P. 2011. Total and extractable non-process elements in green liquor dregs from the chemical recovery circuit of a semi-chemical pulp mill, *Chemical Engineering Journal*, 166: 954 – 951.

Méndez, A. 2006. Tratamiento de lodos mediante energía solar pasiva, Informe de memoria de título para optar al título de: Ingeniero civil, facultad de ingeniería, Dpto. de ingeniería civil, Universidad de Concepción, Chile. 147 pp.

Metcalf & Eddy. 1995. *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera edición. Editorial Mc Graw Hill. 1485 pp.

Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Fourth Edition. Editorial Mc. Graw Hill. 1819 pp.

Magrama, 2006. Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC), documento de referencia de mejores técnicas disponibles en la industria de la pasta y papel, documento BREF, extraído desde: [http://www.prtr-es.es/data/images/BREF%20Pasta%20y%20Papel%20\(versi%C3%B3n%20en%20castellano\)-7C4A350C484D6A0E.pdf](http://www.prtr-es.es/data/images/BREF%20Pasta%20y%20Papel%20(versi%C3%B3n%20en%20castellano)-7C4A350C484D6A0E.pdf). 544 pp.

MMA, 2009. DS N°4: Reglamento para el manejo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. Ministerio Secretaría General de la presidencia. 18 pp.

MMA. 2000. Norma de emisión de descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, manual de aplicación. 49 pp.

Modolo, R., Benta, A., Ferreira, V., and Machado, L. 2010. Pulp and paper plant wastes valorisation in bituminous mixes, *Waste Management*, 30: 685–696.

Navarro, S., y Navarro, G. 2003. Química agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Madrid: ediciones Mundi-Prensa. 438 pp.

Orrego, R., Moraga, G, Gonzales, M., Gavilán J., Valenzuela, A., Burgos, A. and Barra, R. 2005. Reproductive, physiological and biochemical response in juvenile female rainbow trout exposed to sediment from pulp and paper mill industrial discharge areas. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24, 1935-1943.

Orrego, R., Burgos, A., Moraga, G., Inzunza, B., Gonzales, M., Valenzuela, A., Barra, R. and Gavilán J. 2006. Effects of pulp and paper mill discharges on caged rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): biomarker responses along a pollution gradient in the Biobío river, Chile. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(9), 2280-2287.

Orrego, R., Guchardi, J., Krause, R. and Holdway, D. 2010. Estrogenic and anti-estrogenic effects of wood extractives present in pulp and paper mill effluents on rainbow trout. *Aquatic Toxicology*, 99, 160–167.

Potisek, M., Figueroa, U., González, G., Jasso, R., y Orona, I. 2010. Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrientes, *Terra Latinoamericana*, (28): 4, 327-333 pp.

Poykio, R., Nurmesniemi, H., Kuokkanen, T., and Peramaki, P. 2006. Green liquor dregs as an alternative neutralizing agent at a pulp mill, *Environmental Chemistry Letters*, 4: 37 – 40.

Ramalho, R. 1996. Tratamiento de aguas residuales, editorial Reverté, Barcelona 707 pp.

Rámila, J., y Rójas, S. 2008. Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas del agua, Seminario para optar al Título Ingeniero Comercial, Mención administración, Escuela de Economía y Administración, Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile.

Sapag, N., & Sapag, R., 1991. Preparación y evaluación de proyectos. México. McGraw-Hill Interamericana de México S.A. 385 pp.

Sapag, N., & Sapag, R., 2008. Preparación y evaluación de proyectos. México. McGraw-Hill Interamericana de México S.A. 445 pp.

SINIA, 2011a. Tecnología de lodos activados, extraído desde: http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_30.pdf. 4 pp.

SINIA, 2011b. Tecnología de lagunas aireadas. Extraída desde: http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_29.pdf. 5 pp.

SISS, 2010a. Informe de Gestión del Sector Sanitario, extraído desde; <http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-8333.html>, 166 pp.

SISS, 2010b. Informe anual de coberturas urbanas de servicios sanitarios, extraído desde: http://www.siss.gob.cl/577/articles-8705_recurso_1.pdf, 18 pp.

SISS. 2011. Sistemas de tratamiento de aguas servidas autorizadas en la región del Biobío, desde: <http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-3806.html>.

Smith, J., Surampalli, R., Reimers, R., Tyagi, R., Lohani, B. 2008. Disinfection processes and stability refinements to biosolids treatment technologies. *Pract. Period. Hazard. Toxicol. Radioact. Waste Manage.*, 12(1): 10-17.

Tapia, F., y González, S. 2005. Lodos de plantas depuradoras de aguas servidas : Su valor como fertilizante, revista tierra adentro. 60: 10 – 13.

Torres, P., Marmolejo, L., y Botina, A. 2005. Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaerobicamente con el uso de cal, *Agronomía Colombiana* 23(2): 310-316.

Tran, H., and Vakkilainen, E. (2010). The Kraft Chemical Recovery Process. International Colloquium on Eucalyptus Pulp. Finlandia.

Tran, H. 2008. The Kraft Recovery Process. Tappi Kraft Recovery Short Course, St Petersburg, Florida.

Venegas, V. 2003. Estudio sobre mecanismos de financiamiento para un manejo forestal sostenible en América del Sur, Fase I – Cono sur, adquirido desde: <http://www.fao.org/forestry/12004-0b3496daa1af45a847ec59cc3ea4f415c.pdf>. 42 pp.

Wang, J., Xu, Y., & Li, Z., 2009. Research on Project selection of pre-evaluation of zengineering design Project bidding. *International Journal of Project Management*. (6) 27: 584-599.

Williford, C., Chen, W., Shammas, N., Wang, L. 2007. Lime Stabilization in Handbook of Environmental Engineering, Volume 6: Bsolids Treatment Processes. The Human Press Inc. 207B241.

Yague, A., Valls, S., Vazquez, E., y Kuchinow, V. utilización de lodo seco de depuradora de aguas residuales como adición en adoquines de hormigón prefabricado, *Materiales de construcción*, (52): 267, 30 – 41.

Zambrano, M., Arias, M., Gallardo, F., y Vidal, G. 2005. Utilización de Dregs y Grits provenientes del proceso de fabricación de celulosa Kraft en la productividad vegetal. *Afinidad*, 62(517):225-232.

Zambrano, M., Parodi, V., Baeza, J., and Vidal, G. 2007a. Acid Soils' pH and Nutrient Improvement when Amended with Inorganic Solid Wastes from Kraft Mill. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 52(2): 1088–1091.

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

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

