

**JORGE PATRICIO MESA MANSILLA**

**ADAPTACION DE UN PROCESO DE LODOS ACTIVADOS EN UNA  
PLANTA DE CELULOSA UTILIZANDO ELEMENTOS DE CRECIMIENTO  
ADHERIDO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M578a  
2011

Mesa Mansilla, Jorge Patrício, 1968-

Adaptacion de un proceso de lodos activados en una planta de celulosa utilizando elementos de crecimiento adherido / Jorge Patrício Mesa Mansilla. – Viçosa, MG, 2011.

vi, 40f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Cláudio Mudado Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 37-38

1. Papel - Indústria. 2. Águas residuais - Purificação - Processo de lodo ativado. 3. Lodo residual. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.986119

**JORGE PATRICIO MESA MANSILLA**

**ADAPTACION DE UN PROCESO DE LODOS ACTIVADOS EN UNA  
PLANTA DE CELULOSA UTILIZANDO ELEMENTOS DE CRECIMIENTO  
ADHERIDO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada: 23 de julho de 2011

---

Adair José Regazzi

---

Teresa Cristina Fonseca da Silva

---

Cláudio Mudado Silva  
(Orientador)

## **BIOGRAFIA**

Jorge Patricio Mesa Mansilla, hijo de Myriam Mansilla M. y Jorge Mesa S., nació el 11 de Mayo de 1968 en la Ciudad de Santiago de Chile.

En Diciembre de 1985, concluye sus estudios secundarios en Instituto Miguel León Prado, Santiago.

En Marzo de 1986, ingresa a Ingeniería Civil Química, en Universidad de Santiago de Chile, concluyendo el mismo en 1992.

En Marzo de 1996, ingresa a Diplomado de Administración de Empresas, en Universidad de Talca, concluyendo el mismo año.

En Abril de 2005, ingresa a Magister en Medio Ambiente, mención Ingeniería Tratamiento de Residuos, en Universidad de Santiago de Chile, concluyendo el mismo el año 2007.

En Abril de 2008, ingresa a Curso de post-graduación Lato Sensu de Especialista en Tecnología de Celulosa y Papel, en Universidad Federal de Viçosa, siendo concluido en Septiembre 2010.

En Marzo de 2010, ingresa a Curso de post-graduación nivel Maestría Profesional en Tecnología de Celulosa y Papel, en Universidad Federal de Viçosa, siendo concluido en Junio 2011.

## CONTENIDO

RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
RESUMEN .....	vi
1. INTRODUCCION .....	1
2. REVISION BIBLIOGRAFICA .....	3
2.1 Sistemas de Tratamiento de Efluentes .....	3
2.2 Proceso de lodo activado .....	3
2.3 Sistemas de crecimiento adherido .....	5
2.4 Tratamiento de Efluentes con crecimiento adherido en Plantas de Celulosa .....	8
3. MATERIALES Y METODOS .....	12
3.1 Diagnóstico de la planta de tratamiento de efluentes industrial post-terremoto/tsunami .....	12
3.2 Experimental: diseño, construcción y puesta en marcha de la planta piloto .....	12
3.3 Ensayos con carriers .....	13
3.3.1 Fases de Investigación .....	14
3.3.2 Caracterización de los carriers .....	15
3.3.3 Dosificaciones Químicos .....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSION .....	19
4.1 Diagnóstico de la Planta de Tratamiento de Efluentes de Constitución .....	26
4.2 Validación Estadística .....	27
4.2.1 Pruebas con distintas concentraciones de carriers .....	27
4.2.2 Pruebas con alta carga .....	31
5. CONCLUSIONES .....	35
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	37

## RESUMO

MESA MANSILLA, Jorge Patricio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Adaptação de um proceso de lodos ativados em uma fábrica de celulose utilizando elementos de crescimento aderido.** Orientador: Cláudio Mudado Silva. Coorientadores: Ann honor Mounteer e Helio Garcia Leite.

Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Constitución, possui, desde 2001 de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de lodos ativados cujo decantador secundário foi inabilitado devido ao terremoto de grau 8,8 na escala Richter no ano de 2010. Enquanto está sendo construído um novo sistema de decantação secundária, o sistema tem sido operado abertamente sem esta unidade de separação e recirculação de lodo o que reduz a sua eficiência de tratamento. A queda de eficiência se traduz em uma menor remoção de DQO e fenóis ficando a ETE vulnerável a aumentos de carga orgânica que limita a produção de celulose. Uma alternativa para buscar manter a biomassa retida no reator seria a adoção de um sistema de crescimento aderido denominado MBBR (Moving Bed Bioreactor), ou seja, transformar o reator convencional de lodos ativados em um reator com crescimento aderido, permitindo um aumento de eficiência e estabilidade do processo. O presente trabalho estudou em uma planta piloto, especialmente, projetado para este fim, que simula a ETE industrial. Verificou-se que com a aplicação de elementos de suporte de 10 e 20% (v/v) foi suficiente para aumentar em 6 e 12 pontos percentuais, respectivamente, a remoção de DQO solúvel para condições normais de carga, valores estatisticamente significativos. A remoção de fenóis também se demonstrou efetiva com uso de suporte aderido.

## ABSTRACT

MESA MANSILLA, Jorge Patricio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Adaptation of a pulp mill activated sludge process using biocarriers.** Adviser: Cláudio Mudado Silva. Co-Advisers: Ann honor Munteer and Helio Garcia Leite.

Celulosa Arauco y Constitución S.A., Mill Constitución, from the year 2007 has a wastewater treatment of activate sludge whose secondary settler was unable for an earthquake of 8.8 Richter grade the 2010; meanwhile the settler is rebuilt, the system operate open, with a small quantify of biomass in the reactor and with smaller efficiency in the treatment; this is watched in the COD and phenol; the mill is susceptible to values higher of organic charge, that generate a limiting factor in the pulp production. One alternative evaluated for this period is the introducing of MBBR technology, support in suspension in whose surface grows a biofilm; this increase the concentration of biomass in the system and add resistance to variations in the medium. The study in a pilot mill to scale, designed specially for that, permit to corroborate that with a 10% and 20% of support is possible increase around 6 and 12 percentage point respectively of efficiency of removal measured as soluble COD for normal conditions of charge, values statistically significant. The reduction of the phenols proved to be very effective and statistically significant with a biofilm system.

## RESUMEN

MESA MANSILLA, Jorge Patricio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julio, 2011. **Adaptación de un proceso de lodos activados en una planta de celulosa utilizando elementos de crecimiento adherido.** Orientador: Cláudio Mudado Silva. Consejeros: Ann honor Mounteer y Helio Garcia Leite.

Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Constitución, dispone desde el año 2007 de una Planta de Tratamiento de Efluentes de lodo activado, cuyo clarificador secundario quedó inhabilitado por un terremoto grado 8.8 en escala Richter el año 2010; mientras se reconstruye, el sistema opera abierto, con una reducida cantidad de biomasa en el biorreactor y por tanto con menores eficiencias de tratamiento, fundamentalmente reflejado en la demanda química de oxígeno y el índice de fenol, siendo una planta vulnerable a incrementos de carga orgánica, lo cual ha generado una limitante en la producción de celulosa. Una alternativa evaluada para soportar este período es la incorporación de tecnología MBBR, es decir soporte en suspensión en cuya superficie crece una biopelícula, lo cual incrementa la concentración de biomasa en el sistema y cuyas características entregan mayor resistencia a variaciones en el medio. El estudio en una planta piloto a escala, especialmente diseñada para este objeto, permite corroborar que con un 10% y 20% de soporte se obtiene un incremento en torno al 6 y 12 puntos porcentuales respectivamente de eficiencia de remoción medida como demanda química de oxígeno soluble para condiciones normales de carga, valores estadísticamente significativos. El abatimiento de fenol demostró ser muy efectivo y estadísticamente significativo con un sistema de biopelícula.



## 1. INTRODUCCION

Celulosa Arauco y Constitución S.A., Planta Constitución, tiene una capacidad de producción de 1000 toneladas secas al aire por día de celulosa kraft cruda de pino radiata. La Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE) es del tipo lodo activado, compuesta por un bioreactor y un clarificador secundario.

El terremoto y posterior tsunami del 27 de Febrero del 2010 en la zona centro-sur de Chile, causó daños irreparables en el clarificador secundario, dejando a la PTE operando en condiciones límites en algunos parámetros, como por ejemplo el índice de fenol, y haciéndola más vulnerable considerando la carga orgánica de entrada, representada por la demanda química de oxígeno (DQO). En la ausencia del clarificador secundario, no se tiene recirculación de lodo, por lo que la concentración de biomasa en el bioreactor es muy baja. En la búsqueda de soluciones de emergencia, se habilitaron las lagunas de agua lluvia, para sedimentar los sólidos del efluente, previa descarga al mar.

La planta de celulosa partió, luego de la catástrofe, el 23.05.10 en forma gradual. El monitoreo de la PTE se fue realizando en forma más rigurosa considerando todos los parámetros legales que se tenía dentro de la rutina y otras que aun cuando nunca fueron parámetros críticos, pasaron a tener gran importancia, como el análisis de índice de fenoles en la salida aireación.

La construcción de un nuevo clarificador podría llevar más de dos años y por lo tanto nuevas alternativas de optimización de la PTE fueron consideradas para atender a la legislación sin reducir la producción.

Dentro de las opciones consideradas, se vislumbró el uso de carriers a similitud de un sistema con crecimiento adherido para adaptar el reactor de lodos activados en un reactor MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor). Sin embargo, una modificación de esa naturaleza necesitaba de mejor conocimiento para determinar la cantidad de carriers y el grado de eficiencia que podría proporcionar.

El objetivo principal de esta tesis fue estudiar a través de una planta piloto, el uso de tecnología que considere biomasa adherida en carriers, de forma que aumente la concentración de microorganismos en el bioreactor y por tanto la capacidad de abatimiento de carga orgánica.

Los objetivos específicos fueron:

- i) hacer un diagnóstico de la PTE después del terremoto/tsunami;
- ii) construir y poner en marcha una planta piloto a escala del bioreactor industrial, alcanzar similares niveles de abatimiento para una misma condición operacional;
- iii) testar la concentración de carriers entre 10% y 30% (base volumen), comparando fundamentalmente la eficiencia de remoción de DQO.
- iv) Verificar efecto de carga orgánica de alimentación y carriers en eficiencia y robustez en el abatimiento de índice de fenol.

## **2. REVISION BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 Sistemas de Tratamiento de Efluentes**

En las últimas décadas, muchas industrias de pulpa y papel han mejorado sus plantas para incluir tecnologías de tratamiento de aguas residuales avanzadas y así cumplir con los límites de descarga exigidos. Los métodos de tratamiento biológicos convencionales en plantas de celulosa incluyen lagunas aireadas y lodos activados; las primeras necesitan mucho espacio y un tiempo de retención hidráulica largo para poder degradar el agua residual; los lodos activados aun cuando en ambos parámetros son sustancialmente menores, son superiores a nuevas tecnologías (JOHNSON et al., 1997).

Las tecnologías implementadas en la industria de celulosa para el tratamiento de efluentes son de tipo biológico aeróbico, las que pueden dividirse según el tipo de operación, en sistemas de biomasa libre o adherida, o en sistemas resultantes de la combinación de ambos (METCALF et al., 1995). Dentro de los sistemas libres se encuentran las lagunas aireadas y lodos activados, los que han presentado problemas en la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes cuando se producen desestabilizaciones, por ingreso de tóxicos, desbalance de nutrientes y/o alzas en cargas orgánicas en el sistema, produciendo un aumento en el crecimiento de bacterias filamentosas, generando un lodo voluminoso y pérdida de la biomasa en suspensión. Por este motivo, actualmente se está implementando sistemas de biomasa adherida a soportes móviles, para poder generar una mayor estabilidad y diversificación de la biomasa bacteriana. Además se produce una alta concentración de biomasa en el soporte, lo que conduce a tratamiento de elevadas cargas orgánicas, con mejor manejo de nutrientes (POZO, 2009).

### **2.2 Proceso de lodo activado**

Este proceso netamente aeróbico es el proceso más utilizado en el mundo para tratamiento de efluentes líquidos, tanto domésticos como industriales. Las principales aplicaciones son reducción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. No

obstante, sus debilidades son su alta mecanización, requerimiento de energía y alta sofisticación en la operación.

El concepto básico es que los microorganismos, heterogéneos en variedad, se alimentan (oxidación biológica) de las sustancias o substrato que lleva el agua residual, todo esto para formar nuevos microorganismos, con lo cual éstos se mantienen en contacto con el agua residual a tratar. Principalmente participan bacterias y en segundo lugar los protozoos; también participan hongos, rotíferos y en algunos casos algas (METCALF y EDDY, 1995; BITTON, 2005; CHEREMISINOFF, 1996).

En el proceso se forman unas partículas conocidas como flóculos, las cuales son fácilmente decantables, y en su conjunto constituyen los denominados lodos activos.

Generalmente el lodo es de color marrón; si es muy oscuro puede estar cerca de ser séptico (produce putrefacción o es causado por ella); si es más claro puede haber tenido aireación insuficiente y tiene baja velocidad de sedimentación; el lodo bien acondicionado tiene un olor característico de la tierra. Tiende a convertirse en séptico con bastante rapidez y luego adquiere un olor bastante desagradable de putrefacción (SHUN, 2007).

El proceso considera dos etapas. Los microorganismos son los encargados de transformar la materia orgánica mediante la reacción de oxidación, para realizar dos funciones (CHEREMISINOFF, 1996):

- Crecer (producir más microorganismos)
- Respirar (se produce mayormente dióxido de carbono y agua)

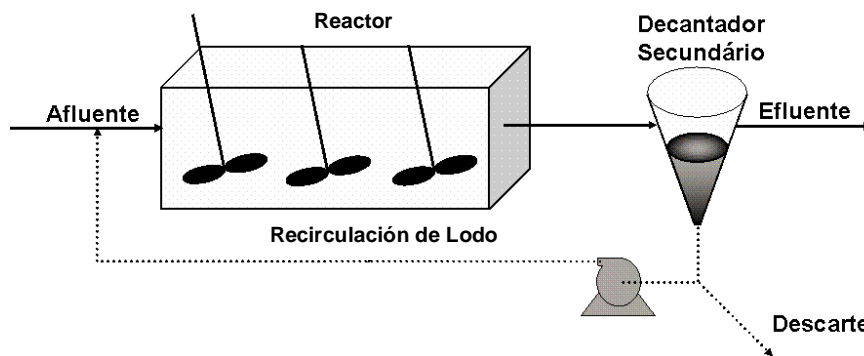
El proceso debe llegar a un equilibrio entre la carga orgánica que trae el agua a tratar y la cantidad de microorganismos necesarios para lograrlo, por lo tanto, la población de microorganismos se mantiene al nivel necesario para la operación.

El contacto entre los microorganismos y el agua residual, como también la posterior oxidación, ocurren en el tanque de aireación, donde es necesario un sistema de aireación y agitación, el cual mantenga el oxígeno necesario para el proceso de depuración que accionan las bacterias, y además produzca una mezcla completa, que permita que el alimento llegue de forma semejante a todos los microorganismos.

Luego de que la materia orgánica ha sido oxidada, procede la segunda etapa; la floculación que permite la separación de la biomasa nueva del efluente tratado. Todo esto sucede en un decantador o clarificador, donde el agua con lodo se deja reposar y los lodos floculados tienden a sedimentarse, consiguiéndose la separación.

En resumen, un sistema de lodos activados está compuesto de los elementos que muestra la figura 1:

- a) tanque de aireación (reactor)
- b) tanque de decantación (decantador o clarificador secundario)
- c) línea de recirculación de lodo



**FIGURA 1 Esquema Básico de Proceso de Lodo Activado**

### **2.3 Sistemas de crecimiento adherido**

Los procesos de biopelícula son conocidos por tener una serie de ventajas sobre los sistemas de crecimiento suspendido, tales como: baja sensibilidad a las variaciones y disturbios en el proceso y condiciones ambientales como influentes tóxicos, operación simple (en comparación a los procesos de lodo activado) y a menudo tienen requerimientos pequeños de volumen. Además es ideal para mejorar la sobrecarga de plantas de lodos activados o para convertir los tanques en desuso en reactores de biopelícula (JOHNSON et al., 1997).

Por otro lado, muchos procesos de biopelículas fijos han evidenciado problemas con la obstrucción del soporte, sobretodo en industrias de pulpa y papel cuando los efluentes contienen cantidades significativas de fibra u otras partículas (WELANDER, et al., 1998; WANG et al., 2005). Sin embargo, esta área ha ganado interés y se han instalado plantas piloto de prueba para efluentes de pulpa y papel

(DALENTOFT Y THULIN, 1997; BROCH-DUE et al., 1997; BROCH-DUE et al., 1994; RUSTEN et al., 1994; HEM et al., 1994; STREHLER Y WELANDER, 1994).

El sistema Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), desarrollado en Noruega a fines de los años 80 y comienzo de los 90 (ØDEGAARD et al., 1994), es un reactor de biopelícula de lecho móvil que se caracteriza por utilizar todo el volumen del reactor para el crecimiento de la biomasa bacteriana, en el cual, la biopelícula se encuentra protegida al interior de un soporte plástico, diseñados con una elevada superficie interna. Estos soportes se encuentran suspendidos, moviéndose por todo el volumen del reactor, sin necesidad de recirculación de lodo. Esto se logra porque hay biomasa creciendo en los soportes que se mueven libremente y se mantienen al interior del reactor gracias a mallas contenedoras puestas en la salida (RUSTEN et al., 2006; JOHNSON et al., 1997).

El diseño del biosoporte es importante debido a los requerimientos de transferencia del sustrato y de oxígeno a los microorganismos (PLATTES et al., 2007). Como en todo proceso de biopelícula, la difusión de los compuestos dentro y fuera de ella juega un rol importante; el espesor de la película biológica efectiva (profundidad de la biopelícula en la que han penetrado sustratos) es fundamental. Esta profundidad es normalmente inferior a 100  $\mu\text{m}$  y uniformemente distribuida sobre la superficie del soporte. Además, son necesarios unos 3  $\text{mg l}^{-1}$  de oxígeno para operar con altas cargas orgánicas, debido a que el oxígeno disuelto necesita difundir por la biopelícula, por lo tanto es un factor limitante en la eficiencia de operación. La turbulencia causada por el alto flujo para lograr este requerimiento de oxígeno disuelto en el reactor aeróbico es más que suficiente para mantener una capa bastante delgada y evitar la obstrucción de la biopelícula en el carrier (RUSTEN et al., 2006).

Con el fin de poder mantener el carrier en suspensión, se recomienda que la fracción de llenado esté por debajo del 70% (RUSTEN et al., 2006; JOHNSON et al., 1997). Cuando la concentración de carrier es muy alta, su fluidización podría dificultarse y se necesitaría aumentar el flujo de aireación para suspender los soportes, con lo cual aumentarían los costos operacionales (WANG et al., 2005).

El proceso MBBR se ha visto como una alternativa para tratamiento de diferentes tipos de efluentes de industrias de pulpa y papel; puede usarse como un paso biológico sólo o también puede combinarse con otros tipos de procesos de

tratamiento. Numerosas pruebas en laboratorio y a escala piloto han demostrado que es posible estimar los resultados a escala real a partir de estos ensayos (MALMQVIST, et al., 1998).

Pozo (2009) implementó un sistema de biopelícula continuo (6 meses), con presencia de soportes, a los cuales se adhirieron altas concentraciones de biomasa ( $74 \text{ gl}^{-1}$ ), lo que permitió operar tasas de carga orgánica de 2,5 a  $3 \text{ Kg DQOm}^{-3}\text{d}^{-1}$ . Su biorreactor fue construido en un tanque acrílico con volumen 1 l y unos 200 soportes tipo AMD de polietileno (7 mm x 10 mm) con densidad y superficie de  $0,95 \text{ gml}^{-1}$  y  $850 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ . La alimentación del efluente se realizó a través de una bomba peristáltica. La temperatura del proceso fue ambiente y se usó una concentración de oxígeno entre  $6\text{-}8 \text{ mg l}^{-1}$ . El pH se ajustó en 7,5 con NaOH o HCl.

Malmqvist et al. (2003) estudiaron la remoción de toxicidad crónica y materia orgánica desde un efluente de una fábrica de papel en un proceso MBBR, a escala piloto. Se evaluó ambos procesos: lodos activados y carrier con biopelícula suspendidos. Se encontró que un MBBR reduce o elimina la toxicidad crónica, con un tiempo de residencia hidráulico (TRH) de 3 horas y un grado de llenado de 50% de carriers. El tratamiento también muestra ser eficiente en la remoción de materia orgánica, con una eficiencia de tratamiento promedio de 90% para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y 70% para DQO soluble sobre el proceso. El crecimiento de la biomasa en los carriers fue rápido, dos semanas después de la puesta en marcha se observó la mitad de la cubierta con biopelícula. La microflora se encontró que consistía en una gran variedad de bacterias y la biopelícula contenía excesiva cantidad de rotíferos. El rotífero consume gran cantidad de bacterias libres y el alto número de ellos probablemente juega un rol significativo en mantener el efluente final libre de sólidos suspendidos finos como las bacterias libres.

La formación de biomasa en un MBBR es un proceso dinámico. En todo momento, alguna bacteria en la fase suspendida se adhiere a una superficie, mientras que otra bacteria adherida se desprende de ésta. Tanto las bacterias adheridas como las suspendidas se multiplican. Una biopelícula estacionaria se desarrolla cuando los procesos de separación y desintegración llegan a un equilibrio con los procesos de fijación y crecimiento (TRINET et al., 1991).

Wang et al. (2005) realizaron una investigación acerca de la influencia de la concentración de carriers sobre el rendimiento y las características microbianas de un reactor de biopelícula con soportes suspendidos (SCBR, suspended carrier biofilm reactor), con la meta de acumular datos para diseñar el proceso a mayor escala. Utilizaron aguas residuales sintéticas durante su experimento, con una temperatura entre 18-23 °C, una concentración de oxígeno disuelto en un rango de 3,0-5,6 mg $l^{-1}$  (controlado por el flujo de aireación), un DQO de 200 mg $l^{-1}$  (variando entre 80-420) y nitrógeno amoniacal (NH $_4^+$ ) de 20 mg $l^{-1}$  (variando entre 9-38).

La remoción de DQO en todos los casos se mantuvo estable y alta, aproximadamente entre 60-80%; la remoción del NH $_4^+$  se situó en 25% para concentraciones de carriers de hasta 20%, sin embargo cuando la concentración de carriers aumenta, se produce mayor remoción de NH $_4^+$ , lo que indicaría la nitrificación del biofilm. Considerando ambos parámetros, se aprecia un óptimo de respuesta cuando los carriers están cercanos a 50%. Cuando la concentración de carriers aumenta, el promedio de la concentración de lodo suspendido tendió a disminuir. La biomasa adherida tuvo un peak alrededor de 1500 mg $l^{-1}$  - volumen reactor, con un 50% de concentración de carriers.

## **2.4 Tratamiento de Efluentes con crecimiento adherido en Plantas de Celulosa**

Welander et al. (1998) estudiaron la remoción de DQO de efluentes de industrias de pulpa y papel que usaban la tecnología MBBR. Presentaron dos casos para analizar: The Bäckhammar Mill y The Metsä Tissue Nyboholm Mill, ambas fábricas ubicadas en Suecia:

The Bäckhammar Mill: La Planta Bäckhammar es una industria integrada que consiste en la fabricación de pulpa al sulfato y papel no blanqueado, con una capacidad de producción de 150.000 y 95.000 toneladas respectivamente. La producción está basada únicamente en fibras vírgenes. Esta planta generaba un efluente total de alrededor de 25.000 m $^3d^{-1}$ , conteniendo entre 8 y 15 toneladas de DQO por día de las cuales 4-6 toneladas eran solubles.



Antes de contar con tratamiento biológico, el efluente total era tratado en un clarificador primario circular (43 m de diámetro, 4 m de profundidad) con una carga superficial o hidráulica alrededor de  $0,7 \text{ mh}^{-1}$ . El clarificador era operado con precipitación química con una mezcla de sulfato de aluminio y hierro, para mejorar la remoción de los sólidos suspendidos totales (SST) y para remover fósforo desde el efluente.

Fue entonces cuando se restringieron aún más los límites de descarga para la DBO y DQO;  $900 \text{ kgd}^{-1}$  en lugar de  $2.200 \text{ Kgd}^{-1}$  para la DBO y  $3.500 \text{ Kgd}^{-1}$  para la DQO. Se decidió instalar una planta de tratamiento biológico. La elección de un proceso de soporte suspendido con biopelícula adherida, el que podía introducirse antes de la etapa de clarificación existente, ahorró una unidad de separación comparado con otras alternativas investigadas.

El sistema actualizado de tratamiento que opera ahora en la planta consta de la eliminación de partículas gruesas de 1 mm, ajuste de pH con NaOH y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , adición de nutrientes (sulfato de amonio y ácido fosfórico), tratamiento en dos reactores de biopelícula en serie, cada uno con un volumen de  $750 \text{ m}^3$  (profundidad del agua de 7 m) estando lleno con 50% de carriers, y finalmente la clarificación en el clarificador primario original. Los carriers usados son del tipo Natrix, con una forma cilíndrica (longitud y diámetro igual a 32 mm) con una laminilla interna con un área para el crecimiento de biopelícula de  $200 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ . La malla usada para retener los carriers a la salida del reactor tiene ancho de ranura de 20 mm. Los reactores de biopelícula operan con un TRH de aproximadamente 45 min cada uno y una carga orgánica de 3–4 Kg DQO soluble  $\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$ . El pH en el reactor varía entre 5 y 9, siendo en promedio alrededor de 6. El efluente no se enfría antes del tratamiento biológico, pero la temperatura generalmente es cercana a  $35^\circ\text{C}$  en el proceso. Durante el periodo de verano, la temperatura puede aumentar a alrededor de  $45^\circ\text{C}$ . Cada reactor de biopelícula se encuentra aireado con un flujo cercano a  $2.000 \text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$ , manteniendo un nivel de oxígeno disuelto sobre  $3 \text{ mg l}^{-1}$ .

El crecimiento de la biopelícula sobre los carriers se estabilizó durante la primera semana y la remoción de DQO soluble en el reactor aumentó rápidamente hasta alrededor de un 50% manteniéndose así durante el primer año. Ya en el primer mes de operación, las descargas de DBO y DQO estuvieron bajo los nuevos

límites de descarga. Luego de la optimización de la planta, la remoción aumentó a cerca del 70%.

Los niveles de SST en el influente al MBBR estaban generalmente en un rango de 150 – 300 mg $l^{-1}$ . En algunas ocasiones, derrames de fibras de la industria dan como resultado elevadas cargas de SST, con concentraciones tan altas como 30.000 mg $l^{-1}$  en el proceso biológico. Sin embargo, esto mostró pocos efectos en el rendimiento del proceso, y una vez que el derrame ha cesado, las fibras son removidas rápidamente del proceso. El nivel en el efluente generalmente tiene un valor cercano a 10 mg $l^{-1}$ .

El proceso también se vio afectado como consecuencia de fuertes perturbaciones por derrames de licor negro, aumentando el pH a 12 en el proceso. Esto llevó a una inhibición en el proceso biológico, pero se recuperó rápidamente. Un día después de la perturbación, la remoción de DQO alcanzó un 50-60% del nivel antes de que sucediera y luego de 3-4 días el proceso se recuperó completamente.

The Metsä Tissue Nyboholm Mill: Esta planta produce 20.000 toneladas al año de papel a partir de papel 100% reciclado. El flujo total de efluente proveniente de la industria es cercano a 4.000 m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>, conteniendo aproximadamente 1,3 td<sup>-1</sup> de DQO soluble y 20 td<sup>-1</sup> de SST. La fábrica toma agua desde el río Emån, de gran importancia ecológica, donde alberga a especies protegidas de peces. Antes de instalar el tratamiento biológico, el efluente era tratado en un clarificador primario rectangular (50x14 m, 4 m de profundidad), operado con precipitación química. La planta decidió introducir un tratamiento biológico con el fin de disminuir las descargas de DQO. Como el clarificador existente tenía una gran sobrecapacidad debido al descenso del consumo de agua de la planta, fue evaluada la posibilidad de usar parte del volumen del clarificador en el tratamiento biológico. El clarificador existente fue reconstruido mediante la instalación de paredes verticales dando lugar a un clarificador primario (superficie de carga de 1 mh<sup>-1</sup>), un MBBR de 500 m<sup>3</sup> llenado con 50% de carriers (Natrix) y un clarificador secundario (superficie de carga 0,5 mh<sup>-1</sup>).

El efluente entrante es modificado con nutrientes (amonio y ácido fosfórico). Ni la temperatura ni el pH son controlados. El pH es generalmente 7,5 en el proceso, mientras que la temperatura varía mucho durante el año, el valor más bajo en operación continua es de 16°C en el invierno, y el mayor de 38°C en el verano. El

reactor de biopelícula opera con un TRH de 3 horas y una carga orgánica de aproximadamente 2,6 Kg DQO soluble  $\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$ . Ambos clarificadores, el primario y el secundario, se operan con adición de químicos para aumentar la separación de los SST. El flujo de aire a través del MBBR es alrededor de  $3.000 \text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$ , resultando una concentración de oxígeno disuelto de  $3 \text{ mg l}^{-1}$ . La planta de tratamiento se opera con límites de descarga para DQO ( $700 \text{ Kg d}^{-1} \sim 175 \text{ mg l}^{-1}$ ), SST ( $120 \text{ Kg d}^{-1} \sim 30 \text{ mg l}^{-1}$ ), nitrógeno ( $20 \text{ Kg d}^{-1} \sim 5 \text{ mg l}^{-1}$ ) y fósforo ( $1 \text{ Kg d}^{-1} \sim 0,25 \text{ mg l}^{-1}$ ).

Durante el primer mes, el proceso operó con limitación de nutrientes. Después la dosificación se aumentó, la DQO soluble removida en el proceso biológico también aumentó entre un 70 – 80% en pocos días.

### 3 MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Diagnóstico de la planta de tratamiento de efluentes industrial post-terremoto/tsunami

Para conocer las condiciones de operación y eficiencia de la planta de tratamiento de efluentes antes y después del terremoto, donde el clarificador secundario quedó inutilizable, se utilizaron los datos medidos del monitoreo de la planta. De esta manera se pudo abordar el primer objetivo del estudio.

La tabla 1 muestra los ensayos realizados para monitorear tanto la Planta Piloto (PP) como la Planta de Tratamiento de Efluente (PTE) y que se utilizaron en el trabajo. Sin embargo la comparación antes y después del siniestro se realizó con todos los parámetros disponibles y monitoreados normalmente en la PTE.

**TABLA 1 Procedimientos Analíticos**

Analito	Método	Frecuencia Análisis
Conductividad	SM2510	Por muestra
pH	NCh 2313/1 of.95 – SM4500-H <sup>+</sup>	Por muestra
COD	NCh 2313/24 of.97 – SM5220	Diario
Índice de Fenol	NCh 2313/19 of.01 – SM5530	Diario
Sólidos Suspendidos Totales	NCh 2313/3 of.95 – SM2540-D	Diario
Nitrógeno Amoniacal	NCh 2313/16 of.97 – SM4500-NH <sub>3</sub> -D	Diario
Fósforo Soluble	SM4500-P-C	Diario

Muestreo: PP=puntual cada 4 horas; PTE= continuo 24 horas

SM : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th Edition, 2005

NCh 2313 : Normas Chilenas de métodos de análisis de aguas residuales

#### 3.2 Experimental: diseño, construcción y puesta en marcha de la planta piloto

El diseño de la planta piloto se basó en las dimensiones de la planta de tratamiento de efluentes, buscando mantener los tiempos de residencia hidráulico y las mismas relaciones (largo x ancho) de forma de mantener aproximadamente el mismo régimen de flujo y velocidad de escurrimiento.

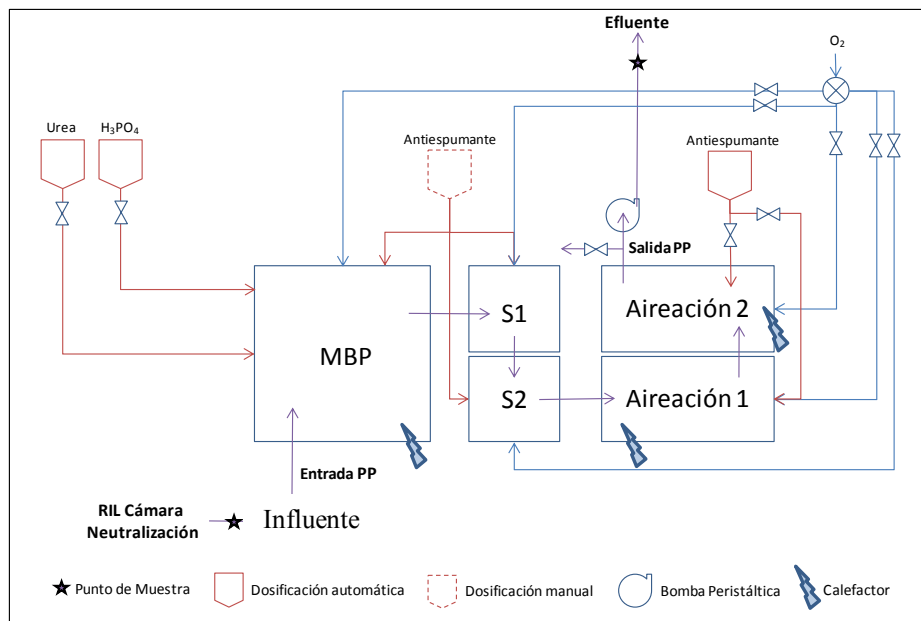
La tabla 2 muestra las dimensiones principales de las PTE y PP.

**TABLA 2 Resumen de los diseños de la PTE y PP**

	PTE	PP
Tamaño (m <sup>3</sup> )	20700 <sup>1</sup>	0.060
Flujo (ls <sup>-1</sup> )	680 (diseño) 540 – 580 (operación)	0.00167
TRH aprox. (h)	10	10
Escala	1	1:300000

<sup>1</sup>El volumen por cámara en el bioreactor es de 4300 m<sup>3</sup> en la MBP (Minimum Biosludge Production), 600 m<sup>3</sup> en cada selector y 15200 m<sup>3</sup> en la cámara de aireación.

La Planta piloto fue construida en vidrio, con aireación utilizando difusores, y calefactores para mantener temperatura. La Figura 2 muestra un diagrama de flujo de la PP, con sus principales elementos.



**FIGURA 2 Diagrama de flujo de la planta piloto (PP)**

### 3.3 Ensayos con carriers

Este estudio se dividió en varias fases. Previo a éstas, hubo una marcha blanca, sin carriers, que duró 16 días y que aparte de algunos datos operativos sólo se determinó DQO soluble. En la Planta Piloto (PP) y Planta de Tratamiento de Efluentes (PTE) se alcanzó una reducción de DQO de 51,3%; lo relevante de esta marcha blanca fue la posibilidad de replicar el comportamiento de la PTE en la PP, a la escala elegida. En dicho período se ajustó metodología de dosificación de nutrientes, antiespumante, se incorporó gradualmente algunos parámetros para

monitorear la planta y se trabajó en asegurar continuidad en la alimentación de efluente (RIL), el cual proviene de la cámara de neutralización, posterior a ajuste de pH, del mismo punto que se alimenta efluente al bioreactor industrial. También se diseñó el seguimiento y control de la planta que se mantendría en las futuras fases, de manera de asegurar estabilidad y comparación entre ellas. Las fases, excepto la primera, consistieron básicamente en variar la concentración de carrier en la PP.

### **3.3.1 Fases de Investigación**

La fase 1, sin carriers, se trató de la puesta en marcha de la PP, en donde ésta se estabilizó, y el objetivo principal fue que tuviera un comportamiento lo más parecido a la real (PTE), esto es, realizando una serie de análisis en paralelo que dieron cuenta de una misma tendencia y que además tuvieron valores de los parámetros operacionales medidos parecidos (línea base); se pudo consolidar lo que se había logrado en la marcha blanca. La carga orgánica en esa fase en la PP fue de  $1,47 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  ( $614 \text{ mg l}^{-1}$ ).

En fase 2 se ingresó un 10% carriers (respecto al volumen disponible) en las cámaras de aireación, equivalentes a un número de 82 carriers (41 por cámara) y se dejó actuar por un periodo determinado, monitoreando y midiendo la DQO soluble, entre otros parámetros. La carga orgánica en esa fase en la PP fue la misma que en Fase 1.

En fase 3 se aumentó a 20% carriers en las cámaras de aireación, equivalentes a un número de 164 carriers (83 por cámara) y se repite el monitoreo; la carga orgánica es comparable a las fases 1 y 2, pero algo menor por ajustes propios de la puesta en servicio después de una parada de planta de la planta industrial; desde este punto de vista no se consideró una situación normal. La carga orgánica en esa fase fue de  $1,37 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  en la planta piloto ( $570 \text{ mg l}^{-1}$ ).

La cuarta etapa de prueba fue con 30% de carriers y carga orgánica de  $652 \text{ mg l}^{-1}$  ó  $1.56 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  en la planta piloto.

Las fases 2 a 4 buscaron fundamentalmente modelar el efecto del porcentaje de carriers en la eficiencia de remoción de DQO y en el índice de fenol.

Finalmente hubo una fase 5, la cual fue similar a la fase 2, es decir mantiene el mismo porcentaje de carriers, pero se agregó como variable a analizar un aumento de carga orgánica en la alimentación, alcanzando un valor de  $1,78 \text{ kg DQO}$

$m^{-3} d^{-1}$  en la planta piloto ( $742 \text{ mg l}^{-1}$ ); con este cambio se deseaba evaluar el efecto de la carga en la eficiencia del sistema.

En resumen, hubo una etapa de línea base, tres etapas cuya finalidad es comparar el porcentaje de carriers y una etapa cuyo objetivo es evaluar el efecto de carga orgánica en la eficiencia de tratamiento.

La tabla 3 muestra las condiciones de los períodos de prueba de la PP, las fechas involucradas, los días de cada uno de ellos y las cargas orgánicas alimentadas, tanto a la PTE como a la PP. La planta industrial se mantuvo operando normalmente. Las fases de prueba permitieron cumplir los objetivos específicos de este trabajo.

La experimentación se vio interrumpida por 2 eventos: terremoto de Japón el 11.03.11 y posterior alarma de tsunami en la costa chilena, que generó una evacuación y detención total de planta por 2 días. El segundo evento fue una detención programada de planta de 6 días (Abril); los períodos involucrados no coinciden con ninguna de las fases de prueba.

**TABLA 3 Períodos de Prueba Planta Piloto**

FASE	PERIODO	FECHAS	DIAS	CARGA ENTRADA [DQO]			
				PP		PTE	
				$\text{mg l}^{-1}$	$\text{Kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$	$\text{mg l}^{-1}$	$\text{Kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$
1	LINEA BASE (0% CARRIERS)	14.01.11-25.01.11 21.03.11 - 10.04.11	33	614	1,47	577	1,41
2	CARRIERS 10% VOLUMEN	28.01.11 - 14.02.11	18	613	1,47	554	1,36
3	CARRIERS 20% VOLUMEN	21.04.11 - 18.05.11	28	570	1,37	528	1,35
4	CARRIERS 30% VOLUMEN	23.05.11 - 27.06.11	36	654	1,57	593	1,43
5	CARRIERS 10% VOLUMEN, ALTA CARGA	15.02.11 - 10.03.11	24	742	1,78	704	1,80

### 3.3.2 Caracterización de los carriers

Los carriers son soportes con características específicas que permiten aumentar la formación de lodo, formándose biopelículas adheridas a su estructura. La estructura porosa de los carriers permite tener una gran superficie de contacto para la formación de lodo. La tabla 4 presenta las características del carrier, modelo Biomarble (proveedor Siquiver).

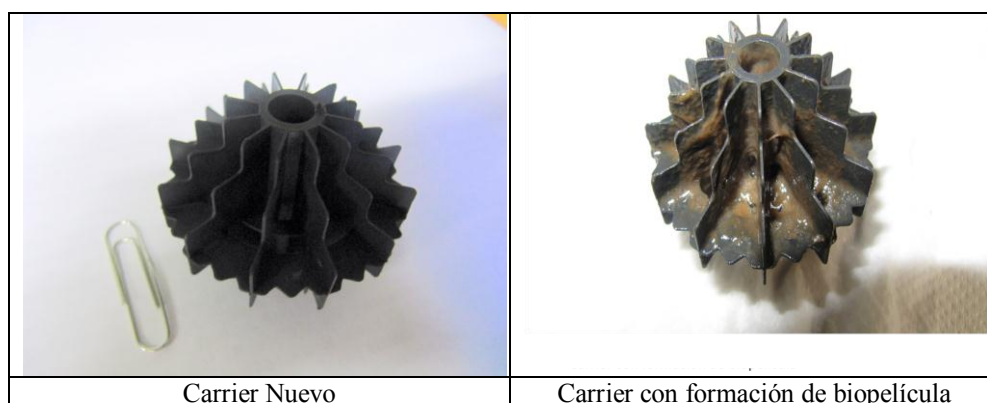
**TABLA 4: Especificación de Carrier Utilizado**

Material	Polipropileno
Peso específico	0.97
Dimensiones	46 x 36 mm
Superficie/Volumen Aparente	300 m <sup>2</sup> m <sup>-3</sup>
Porosidad	90%
Peso (seco)	76 kg m <sup>-3</sup>
Peso (operacional)	hasta 583 kg m <sup>-3</sup>
Consolidación	5 – 10 %
Dirección de flujo	No especificado

Se realizaron otras mediciones para caracterizar físicamente los carriers: cada uno tiene una superficie de contacto para el crecimiento de biomasa (superficie efectiva) de 123.3 cm<sup>2</sup>; sólo cuenta el área en la cual la biomasa es capaz de crecer, sin contar la superficie lisa del interior y los bordes. El volumen real (medido a través del desplazamiento de agua) fue de 10.3 ± 0.1 cm<sup>3</sup>. Los carriers tendrían una razón de superficie efectiva a volumen real de 1197 m<sup>2</sup>m<sup>-3</sup> aproximadamente, siendo la razón de superficie a volumen real estimada 1465 m<sup>2</sup>m<sup>-3</sup>. Los valores anteriores son un promedio de 5 mediciones y representan la caracterización de un carrier.

Los carriers se prepararon con anticipación en un reactor batch debido al tiempo que toma formar la biopelícula. Se sumergen en RIL, el cual es renovado dos veces al día, con la reposición de nutrientes necesaria y con oxigenación constante. Es un proceso que funciona en paralelo con la planta piloto.

La figura 3 muestra un carrier nuevo y un carrier con crecimiento de biomasa.



**FIGURA 3 Carrier Nuevo y con Biomasa, usados en Pilotaje**



### **3.3.3 Dosificaciones Químicos**

Los nutrientes que se incorporaron a la planta piloto son urea, como fuente de nitrógeno, y ácido fosfórico, como fuente de fósforo. Estos se ingresaron en la MBP en forma diluida y continua, con un caudal que se regulaba constantemente de manera manual. Se tomó como base la cantidad de nutrientes consumidos el día anterior en la PTE para ajustarlos en la PP. El antiespumante se dosificó de forma manual cada vez que la espuma presente lo requirió.

Actualmente, producto de la condición sin retorno de lodo desde un sistema de sedimentación, en la PTE no se cumple una relación estable de DQO:N:P, sino que se rige por los residuales de nitrógeno amoniacal y fósforo soluble, los cuales deben estar entre 2-3 mg<sup>l</sup><sup>-1</sup> para el nitrógeno y no debe ser superior a 0.3 mg<sup>l</sup><sup>-1</sup> para el fósforo.

En cuanto a los niveles de Oxígeno Disuelto (OD), estos deben ser alrededor de 0.2 mg<sup>l</sup><sup>-1</sup> en la MPB y superiores a 3 mg<sup>l</sup><sup>-1</sup> en los selectores y aireación.

### **3.4 Validación estadística**

Para poder trabajar con los datos obtenidos luego del periodo de experimentación, es necesario someterlos a algún tipo de prueba estadística para poder analizar su distribución y comportamiento y así validarlos estadísticamente.

Una de las formas de hacerlo es construyendo un Gráfico de Probabilidad Normal (GPN), donde la idea básica consiste en representar, en un mismo gráfico, los datos observados frente a los datos que se obtendrían en una distribución normal teórica. Si la distribución de la variable es normal, los puntos quedarán cerca de una línea recta, donde es frecuente observar una mayor variabilidad o separación en los extremos de dicha línea.

Otros valores estadísticos, como lo son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, que cuando se encuentran fuera del rango -2 a 2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar.

La curtosis es una medida de la forma o apuntamiento de las distribuciones. Así sus medidas (también llamadas de apuntamiento o de concentración central) tratan de estudiar la mayor o menor concentración de frecuencias alrededor de la media y en la zona central de la distribución. Por otro lado, lo deseable en un conjunto de datos es que no presente sesgo, es decir, que el valor esperado para el parámetro y su valor verdadero sean lo más cercanos posible.

La prueba de Levene's indica si las desviaciones estándar tienen diferencias estadísticamente significativas. Se evalúa a través del valor-P.

Una vez analizados los conjuntos de datos, pudieron someterse a distintas pruebas estadísticas, en este caso, experimentos con un solo factor (análisis de una variable).

El test-F (Fischer), es uno de los más usados para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de las muestras. Para poder aceptar o rechazar la hipótesis del test, se utilizó el valor-P para un 95% de confianza.

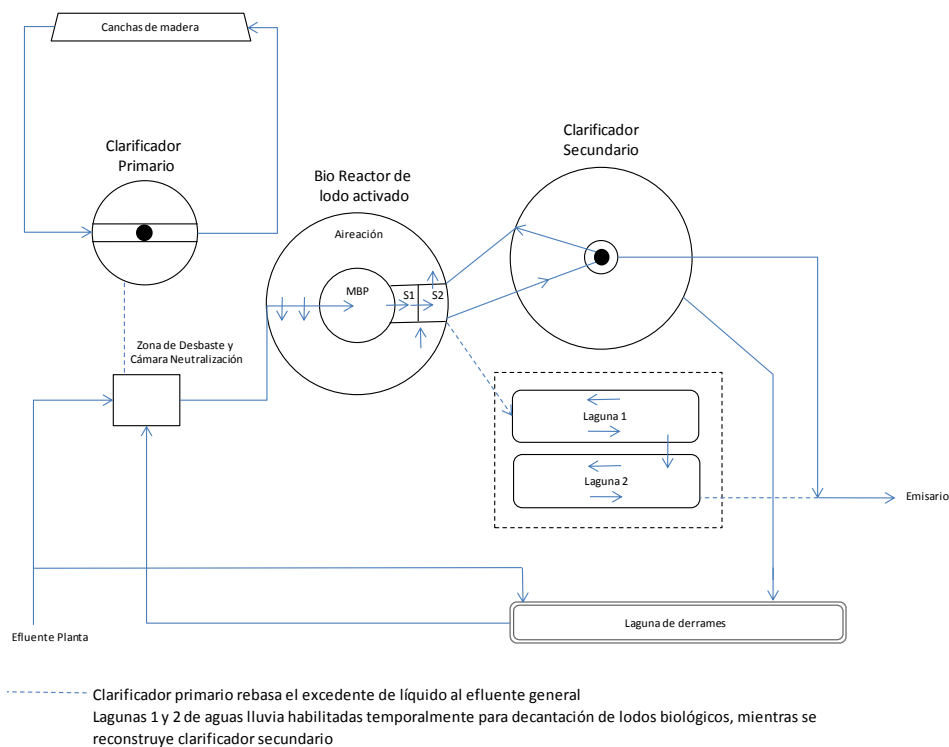
En la prueba de rango múltiple se puede determinar qué medias son significativamente diferentes de otras. Está basado en el procedimiento de diferencia mínima significativa de Fischer (LSD, sigla en inglés). Usando este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Todas las pruebas estadísticas se realizaron utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XV, versión 15.2.05.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 Diagnóstico de la Planta de Tratamiento de Efluentes de Constitución

La figura 4 muestra la configuración de la planta de tratamiento de efluentes de Planta Constitución.



**FIGURA 4 Sistema Lodos Activados Planta Constitución**

El sistema está formado por un bioreactor, previo al cual se remueven sólidos gruesos (desbaste grueso y fino) y se ajusta pH; posterior a éste hay un clarificador secundario. El reactor biológico consta de tres etapas: MBP, 2 selectores y la aireación.

Las aguas lluvia están segregadas en la planta industrial; estas se dirigen a dos lagunas de acumulación, desde son bombeadas, a una cámara, en donde se mezcla con el efluente proveniente del clarificador secundario; posteriormente se envía al mar, a través de un emisario marino.

Luego del terremoto y tsunami, con la consecuencia de pérdida total del clarificador secundario, la planta de tratamiento de efluentes perdió un equipo

fundamental en su configuración, con lo cual se pierde la necesidad de separar la biomasa, su recirculación al bioreactor y por tanto la concentración de biomasa bajó significativamente, haciendo menos eficiente el abatimiento biológico y poniendo en riesgo el cumplimiento normativo.

Como medida temporal de operación, mientras se construye el nuevo clarificador secundario, se habilitó las lagunas de aguas lluvia como lagunas de sedimentación. Adicionalmente se colocaron aireadores y oxígeno con el objeto de asegurar reducción del índice de fenol, que resultó ser la variable crítica en este sistema abierto de tratamiento biológico.

La tabla 5 muestra una comparación en la caracterización del RIL antes y después del terremoto.

**TABLA 5 Caracterización del Efluente tratado en la PTE en los periodos antes (01/01/2009 – 25/02/2010) y después del terremoto (01/07/2010 – 31/12/2010)**

Lugar	C. Neutralización		Salida Aireación		Salida al Mar	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes*	Después**
pH	8,5	8,6	7,0	7,1	7,5	7,3
Conductividad ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ )	960	1122	973	1139	982	1188
DQO total ( $\text{mg l}^{-1}$ )	714	659	---	447	194	335
DQO decantado ( $\text{mg l}^{-1}$ )	629	576	---	---	---	---
DQO soluble ( $\text{mg l}^{-1}$ )	565	517	177	236	171	282
DBO <sub>5</sub> ( $\text{mg l}^{-1}$ )	242	230	---	---	5,3	51
NTK ( $\text{mg l}^{-1}$ )	3,1	2,9	---	---	2,0	10
N amoniacal ( $\text{mg l}^{-1}$ )	1,4	1,6	0,6	1,3	0,7	3,4
Nitrato ( $\text{mg l}^{-1}$ )	1,4	1,5	0,7	0,6	0,9	0,7
Fenol ( $\text{mg l}^{-1}$ ) <sup>1</sup>	2,3	2,6	---	0,2	0,02	0,08
Fosforo total ( $\text{mg l}^{-1}$ )	0,4	0,3	16,3	0,6	0,3	0,2
Fosforo sol ( $\text{mg l}^{-1}$ )	0,3	0,3	---	0,2	0,2	0,1
SST ( $\text{mg l}^{-1}$ ) <sup>2</sup>	70	71	3982	156	14	60
S. Sed ( $\text{mg l}^{-1}$ )	4,0	4,5	363	10	0,3	0,1
AyG ( $\text{mg l}^{-1}$ )	16	14	---	---	1,6	3,2
Color verdadero ( $U_{\text{Pt-Co}}$ )	575	477	---	---	479	439
Turbidez (NTU)	81	87	---	---	9,5	65
Caudal ( $\text{m}^3\text{d}^{-1}$ )	50.850	49.756	50.850	49.756	50.850	49.756

--- no hay datos disponibles; sin monitoreo

\* Salida Clarificador Secundario

\*\* Laguna

<sup>1</sup> : límite máximo para índice de fenol es  $1 \text{ mg l}^{-1}$

<sup>2</sup> : límite máximo para sólidos suspendidos totales es  $700 \text{ mg l}^{-1}$

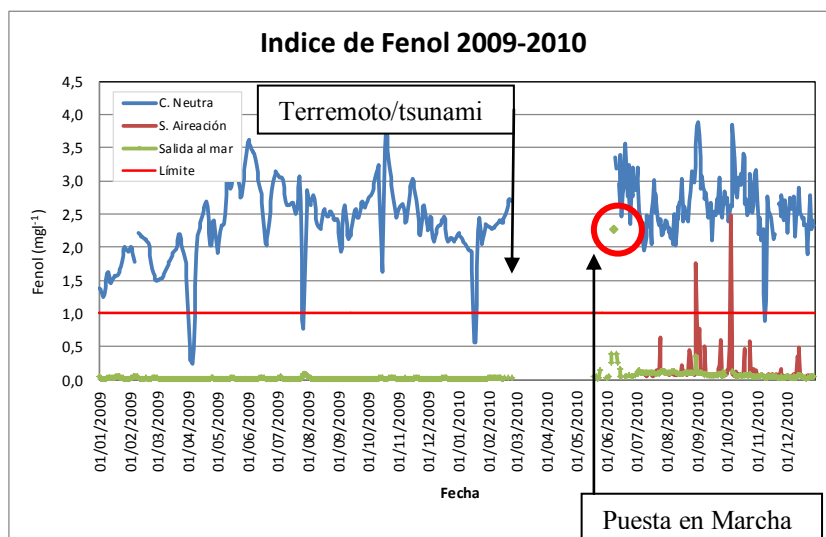
Fuente Límites: DGTM y MM Ord. N°12600/98 VRS (parámetros más importantes y afectados por condición de PTE)

El efluente industrial es alcalino, y en general ha mantenido su caracterización antes y después del terremoto del 27.02.10, aun cuando algunos parámetros han reducido su valor en torno al 10% (carga orgánica, color, aceites y grasas, y fósforo)

y otros han aumentado en torno al mismo porcentaje (conductividad, nitrógeno, índice de fenol, sólidos sedimentables y turbidez). La falta de clarificador secundario ha llevado a incrementar la carga orgánica de la salida (60% DQO soluble y 70% el DQO total y 860% la DBO<sub>5</sub>); debido a la escasa población de microorganismos se mantuvo una sobredosificación de nutrientes, aumentando el residual de nitrógeno en torno 400% y de fósforo en 30%; los sólidos suspendidos también aumentaron mucho y el índice de fenol, aun cuando en promedio mantiene valores bajos, aumentó un 300%.

### i. Índice de Fenol

La figura 5 presenta la evolución del índice de fenol en el efluente descargado al mar. No es tan evidente el impacto de este parámetro (ya que se mantuvo bajo control), sin embargo se debió incorporar una medición adicional en la salida aireación, debido a los eventuales aumentos exponenciales que se deben a condiciones de aumento de carga orgánica en la entrada, asociados a aumentos de producción de la planta.



**FIGURA 5** Índice de fenol en el periodo antes y después del terremoto medido en la Cámara de Neutralización, Salida Aireación y Salida al mar.

Se puede ver a primera vista que la norma (1 mg/l) se cumple ampliamente. Sin embargo en la partida de la planta, particularmente el 07.06.10 se encuentran valores de fenol altos, que obligan a entrar en contingencia y detener la planta industrial (se puede apreciar los aumentos de índice de fenol en figura 5). En ese

momento se tuvo real conciencia de lo vulnerable que se había quedado sin clarificador secundario; posteriormente se tuvo un buen sistema de diagnóstico para pesquisar aumentos de fenol, asociados siempre a aumentos de ritmo de producción, lo que llevó a restringirla. A su vez esta situación llevó a estudiar alternativas de abatimiento adicionales, a la espera de la construcción del clarificador secundario; entre ellas está la construcción de la planta piloto y el desarrollo de esta tesis.

Se puede indicar que se cumplió el primer objetivo del trabajo. Se caracterizó y determinó cual era la situación real de la planta de tratamiento de efluentes.

## b. Ensayos con Carriers

El haber realizado estos ensayos en la planta piloto, construida para el efecto, permite dar por cumplido el segundo objetivo de este trabajo. El poder pesquisar condiciones en las cuales la PTE opere con holgura y no se corra riesgo de reducir producción o incumplir los requisitos legales es de gran ayuda y justifica plenamente el uso de carriers.

La tabla 6 muestra los resultados de DQO de toda la experimentación realizada. En Apéndice A se adjunta mayor cantidad de datos.

**TABLA 6 Resultados Planta Piloto**

FASE	Carga DQOs ( $\text{Kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$ )		DQOs salida ( $\text{mgL}^{-1}$ )		Eficiencias DQOs (%)	
	PTE	PP	PTE	PP	PTE	PP
1	1,4 ± 0,1	1,5 ± 0,3	295 ± 44	320 ± 59	49 ± 4	48 ± 8
2	1,4 ± 0,2	1,5 ± 0,2	262 ± 44	249 ± 46	53 ± 5	59 ± 7
3	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,2	291 ± 66	242 ± 37	45 ± 9	57 ± 5
4	1,4 ± 0,2	1,6 ± 0,3	336 ± 70	288 ± 58	43 ± 8	56 ± 9
5	1,8 ± 0,3	1,8 ± 0,3	403 ± 71	394 ± 75	43 ± 8	47 ± 8

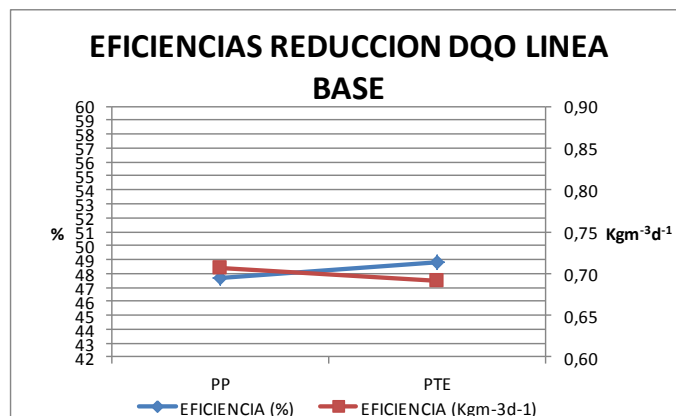
En general los parámetros que se afectaron más entre las distintas etapas fueron la demanda química de oxígeno e índice de fenol, que eran los parámetros en estudio. El resto de los parámetros en la entrada se mantuvieron dentro de un rango normal de variación.

### i. Línea Base (Fase 1)

La línea base se dividió en 2 etapas, antes y después de realizar la experimentación con 10% carriers; se hizo así para poder dar mayor representatividad a los datos. Además prácticamente la primera etapa de la línea

base se realizó con un perfil de oxígeno distinto a los demás (con una mayor dosificación en el reactor MBP del bioreactor y por tanto sin igualar a la Planta industrial); sin embargo al restringir oxígeno e igualar el déficit industrial, no cambió la performance de la PP en ninguno de los parámetros controlados.

El objetivo de la línea base era potenciar la representatividad de los resultados de las pruebas que venían posteriormente; sería posible de proyectar o escalar comportamientos, en la medida, que operando una planta piloto a escala, con el mismo ril, nutrientes, tiempo de residencia y control de perfil de oxígeno, los resultados en los parámetros estudiados fueran equivalentes. La figura 6 muestra que esto se cumplió y por tanto las discusiones en base al resto de las pruebas, al comparar PP con PTE son válidas.



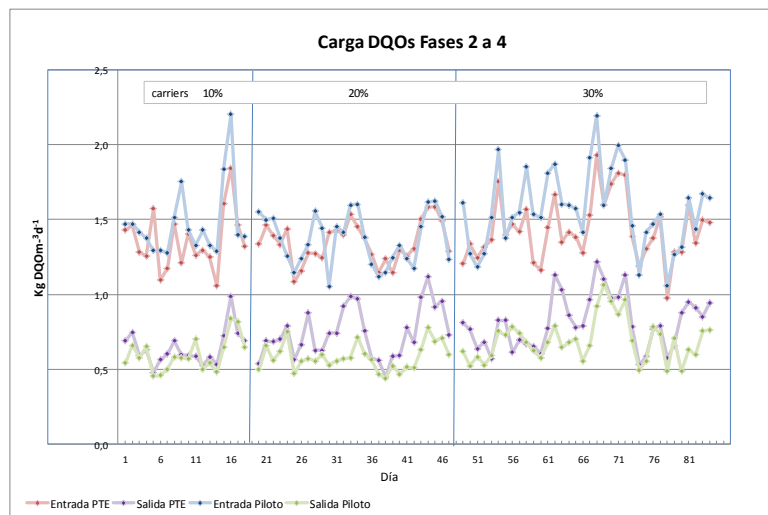
**FIGURA 6 Eficiencias Línea base**

## ii. Pruebas con concentración carriers variable

Las fases 2, 3 y 4 fueron pensadas para comparar básicamente el efecto del porcentaje de carriers y por tanto de la biomasa adherida. Básicamente lo que se desprende de los datos es que la carga orgánica en la PTE (medida como Kg d<sup>-1</sup> DQO) de las fases 2 y 3 se mantienen prácticamente constantes (la fase 4 sube 6%). A su vez la carga orgánica en la PP en las fases 3 y 4 es un 7% menor y 7% mayor respectivamente, respecto a la fase 2.

El índice de fenol en la entrada no tuvo un comportamiento lineal con el DQO en todas las etapas; esta condición debe obedecer a variaciones del proceso industrial y proporción de los distintos efluentes de áreas. El índice de fenol en las etapas 3 y 4 respecto a la fase 2 se redujo en torno al 18% en la PTE y 32% y 7% en la PP en las fases 3 y 4 respectivamente.

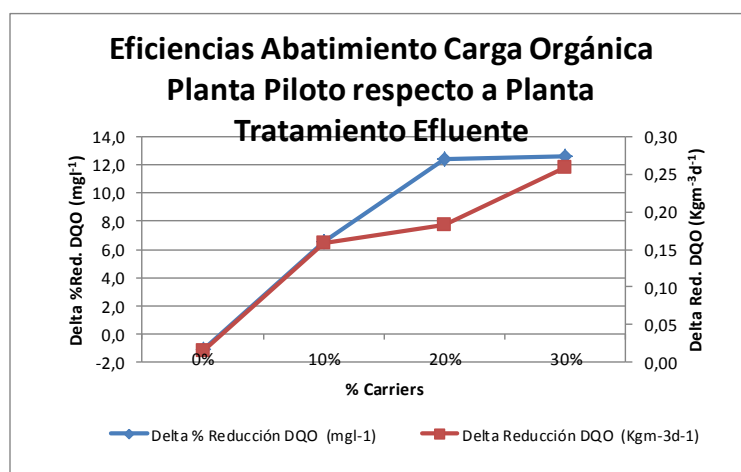
La figura 7 muestra el comportamiento del DQO soluble durante las fases 2, 3 y 4.



**FIGURA 7 DQO soluble en Pruebas con carriers**

La eficiencia de los procesos de tratamiento de efluentes tiene una diferencia clara, en cuanto a remoción de materia orgánica, expresados ya sea en porcentaje de reducción de DQO en concentración o en masa por unidad de tiempo y volumen. Si se toma el primer índice se tiene que mientras que en la línea base (0% carriers) la PTE estuvo levemente mejor, en las fases 2 a 4 la Planta Piloto estuvo claramente mejor que la Planta de Tratamiento de Efluentes (6,6%; 12,4%; 12,6 respectivamente).

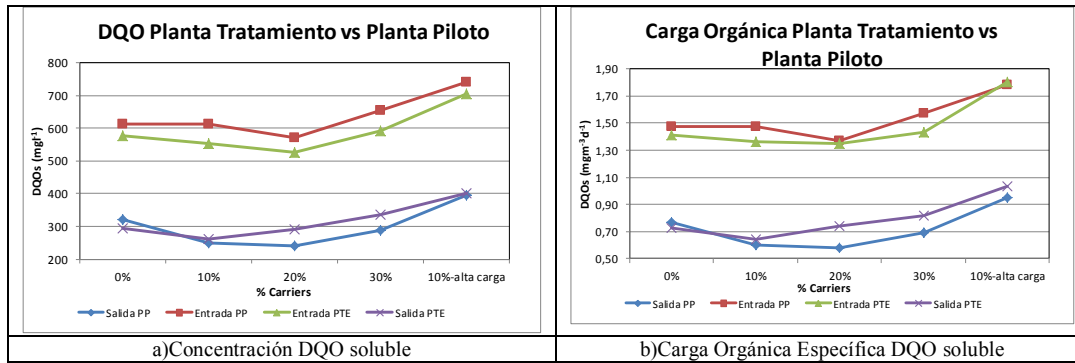
Si se desea evaluar sólo el efecto de carriers, esto se puede ver en figura 8.



**FIGURA 8 Efecto Concentración carriers en Abatimiento Carga Orgánica**



La figura 9 muestra las concentraciones de DQO y cargas orgánicas de cada fase de prueba.

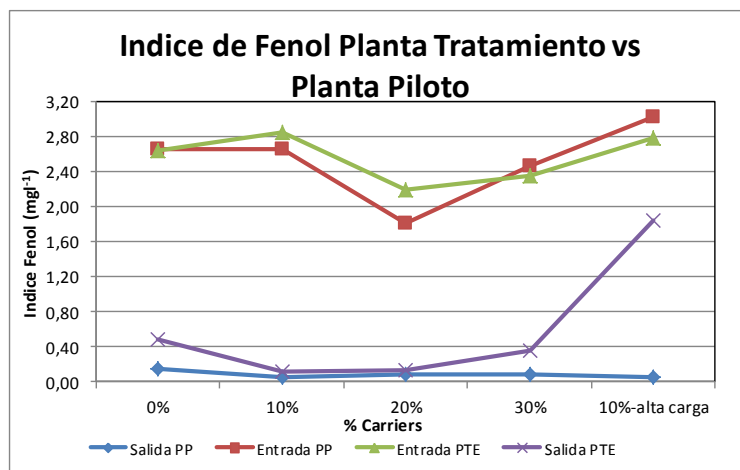


**FIGURA 9 Carga Orgánica en las pruebas con carriers**

### iii. Pruebas con aumento de carga orgánica

La fase 5 de prueba se origina para evaluar la respuesta de un aumento de carga: fue incrementada en alrededor de 21% en la PP (33% en la PTE como carga total y 27% como concentración), considerando que esa podría ser una condición normal de trabajo si la PTE estuviera más robusta, es decir con su clarificador secundario reconstruido; otras alternativas de mitigación implementadas permiten realizar esta prueba. Respecto al índice de fenol, subió un 14% en la PP (subió un 3% como carga total y bajó un 2% en la PTE como concentración).

El gran hallazgo fue que el índice de fenol en la fase 5, cuando se aumentó carga manteniendo un 10% de carriers, el índice de fenol en la PP no se alteró; sin embargo en la PTE fue 15 veces el valor de la fase 2 que hace de referencia. La figura 10 muestra claramente lo anterior.



**FIGURA 10 Índice de fenol en las pruebas con carriers**

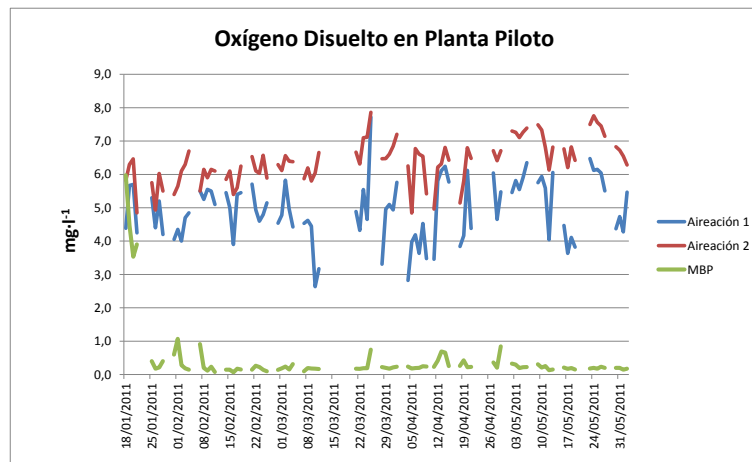
El poder mitigar el índice de fenol es muy importante considerando que es el parámetro más afectado producto de la ausencia de clarificador secundario. La tabla 5 muestra que la descarga al mar promedio está absolutamente dentro de norma; por otro lado la Figura 5 muestra que ha habido alzas puntuales de fenol en la salida aireación, cuyo control ha estado asociado a reducciones de la carga de entrada, limitándose para este efecto la producción de celulosa de la planta.

#### **iv. Otros Parámetros**

En la salida se ve, en las fases 1, 2 y 4, que la concentración de nitrógeno amoniacal en la PP fue mayor que en la PTE, el pH fue mayor en la PP en todas las fases. La conductividad en la salida es comparable en todas las fases entre PP y PTE; lo propio ocurre con la concentración de fósforo soluble en las fases 1,2 y 5 (en las otras fases es mayor en PP que en PTE).

Los sólidos suspendidos totales fueron sustancialmente menores en todas las fases, excepto en la 3; esto último pudiera deberse a una retención de sólidos en la biopelícula; sin embargo no se tuvo eventos de desprendimiento de biomasa, pudiendo deberse al ciclo de rotación, lo cual no se puede evaluar en este trabajo. Este eventual desprendimiento se ha descrito como usual o probable en sistemas MBBR, sin embargo lo usual es que estos trabajen en concentraciones de carriers entre 40-60%. El trabajar con porcentajes menores como los testeados en este trabajo, de 10 a 30%, pueden favorecer el sistema de manera que no se produzcan estos eventos.

Para que este bajo nivel de porcentaje de carriers fuera efectivo, lo mínimo que se tuvo que cumplir fueron las pautas que la bibliografía señala, como la concentración de oxígeno disuelto en la aireación (cuya referencia mínima son 3  $\text{mg l}^{-1}$  y se utilizaron hasta 8  $\text{mg l}^{-1}$  por algunos autores), para que permita una mejor difusión en la biopelícula. La figura 11 muestra la evolución de este parámetro en la aireación y en la MBP, que es bastante bajo debido a que se igualó la capacidad limitada de la Planta Industrial para subirlo.



**FIGURA 11 Oxígeno Disuelto en la Planta Piloto**

El tiempo de residencia hidráulico se mantuvo prácticamente igual durante las distintas fases en la planta piloto (control de flujo con bomba dedicada) y equivalente a la planta industrial en al menos 4 fases; sólo en la fase 5 fue superior en casi 1 hora en la planta piloto.

## 4.1 Validación Estadística

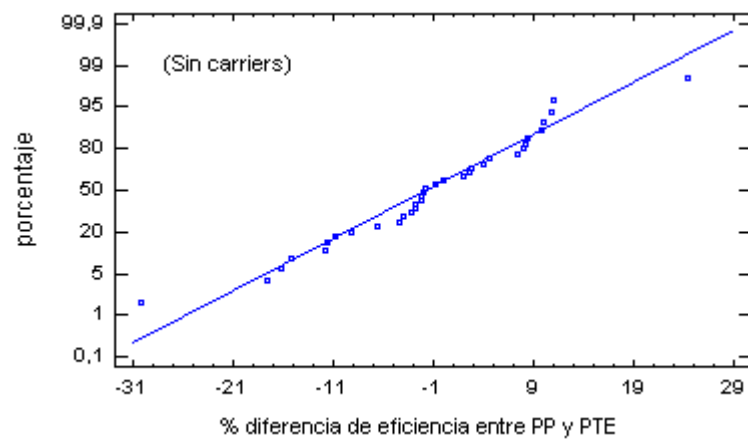
### 4.1.1 Pruebas con distintas concentraciones de carriers

Para las pruebas con porcentajes de carriers, las figuras 12 a 15 muestran los Gráficos de Probabilidad Normal (GPN) de cada ensayo: sin carriers, 10, 20 y 30%, respectivamente. En dichas figuras se puede apreciar la linealidad de los datos, dando cuenta que forman parte de una distribución normal. La variable estudiada es la diferencia de eficiencia entre la planta piloto y la planta de tratamiento de efluentes. Además la Tabla 7 muestra un resumen estadístico para los 4 niveles.

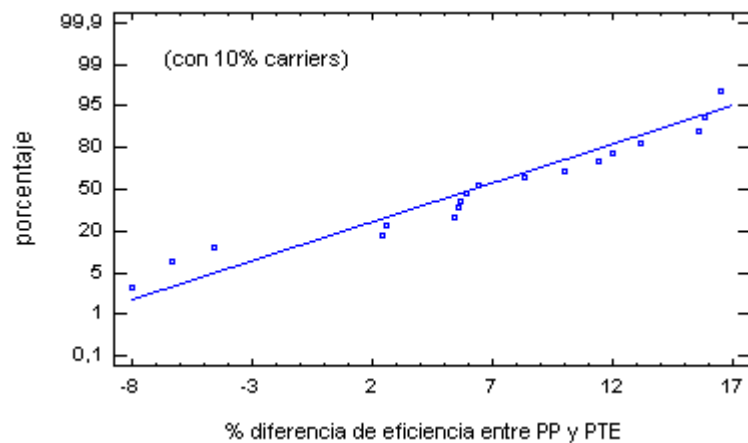
Como los valores de sesgo y curtosis se encuentran dentro del rango esperado (de -2 a +2), puede asegurarse que los datos provienen de una distribución normal.

**TABLA 7 Resumen estadístico para los experimentos con carriers**

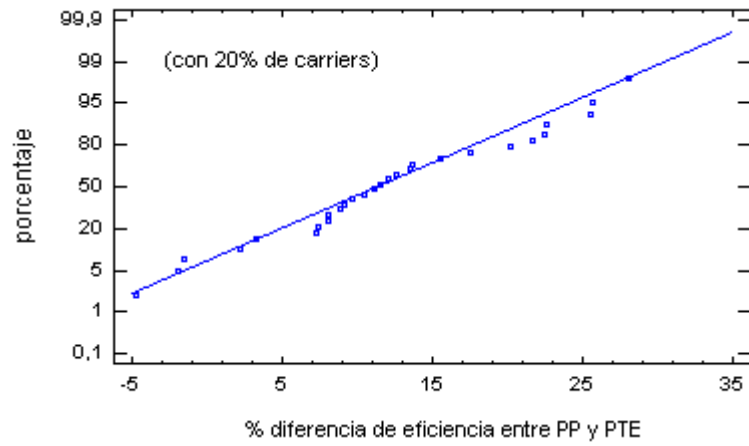
	Sin carriers	10% carriers	20% carriers	30% carriers
Promedio (%)	-1,3	6,6	12,1	12,5
Desviación Estándar (%)	10,5	7,34	8,59	10,55
Mínimo (%)	-30,2	-8,0	-4,8	-9,9
Máximo (%)	24,3	16,5	28,1	36,1
Sesgo Estandarizado	-0,80	-1,04	0,06	0,72
Curtosis Estandarizada	1,27	-0,24	-0,49	-0,34



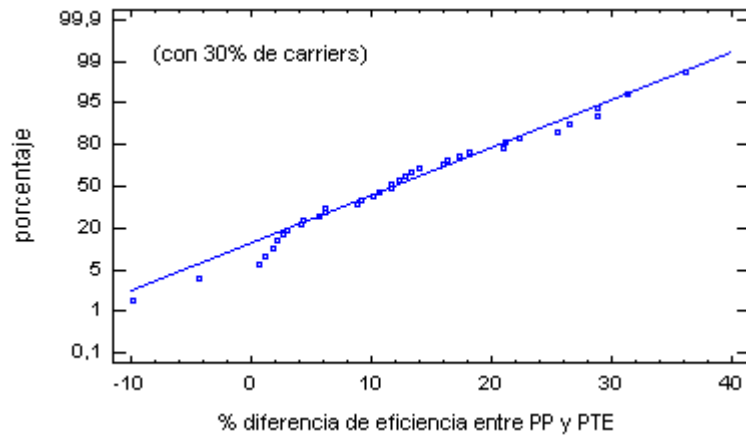
**FIGURA 12 Gráfico de Probabilidad Normal (sin carriers)**



**FIGURA 13 Gráfico de Probabilidad Normal (10% carriers)**

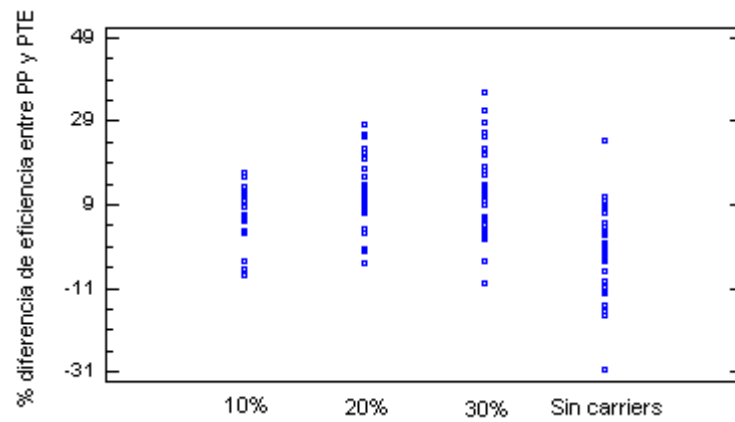


**FIGURA 14 Gráfico de Probabilidad Normal (20% carriers)**



**FIGURA 15 Gráfico de Probabilidad Normal (30% carriers)**

La Figura 16 ayuda a visualizar la dispersión de los datos según la muestra.



**FIGURA 16 Dispersión de los datos según la muestra.**

La prueba de Levene's se evaluó a través del valor-P. Como resultado se obtuvo un valor-P de 0,3956, lo que indica (debido a que su valor es mayor de 0,05) que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de los conjuntos, para un nivel de confianza de 95,0%.

El test-F (Fischer) fue realizado para este conjunto de muestras. El **valor-P** obtenido para esta prueba fue de **0,0000**. Debido a que el resultado es menor que 0,05, se infiere que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

La prueba de rango múltiple se muestra en la Tabla 8, donde se ha colocado un asterisco junto a un par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza. La última columna de la tabla muestra los límites con que se evalúa la diferencia calculada.

**TABLA 8 Prueba de múltiple rango.**

Contraste	Sig.	Diferencia (%)	+/- Límites (%)
10% - 20%		-5,575	5,77184
10% - 30%	*	-5,9	5,51518
10% - 0%	*	7,80882	5,56899
20% - 30%		-0,325	4,81405
20% - 0%	*	13,3838	4,8756
30% - 0%	*	13,7088	4,56887

Como el test-F arrojó diferencias significativas entre las medias, se llevó a cabo la prueba de los rangos múltiples, resultando 4 pares con una diferencia significativa. De estos resultados destaca la comparación de la planta piloto sin carriers con todo el resto de los porcentajes de carriers, lo que es muy razonable, puesto que es lo que se quería demostrar: que la eficiencia en la remoción de DQO soluble aumentaría al utilizar los carriers, que es lo que indica la teoría.

Es importante comentar, que las diferencias entre las pruebas con 10 y 20% de carriers también pudo resultar significativa, puesto que se encuentra justo en el límite del rango de decisión; a su vez la que claramente no es estadísticamente significativa son las medias entre los niveles 20 y 30%, lo que era lógico puesto que los valores de las medias para el 20 y 30% de carriers era muy similares (véase Tabla 7).

Por otro lado la igualdad de eficiencias entre 20 y 30% se puede explicar considerando las cargas utilizadas en ambas fases de prueba; mientras en la

primera la carga fue 7% menor que la línea base y fase 2, en la segunda la carga fue 7% mayor; es decir con un 30% de carriers, la carga alimentada fue 14% mayor que con 20% y aun así la eficiencia de remoción de DQO soluble se mantuvo.

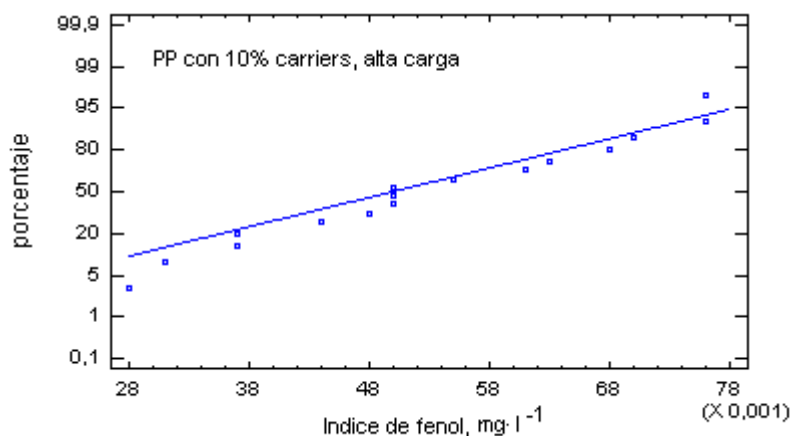
#### 4.1.2 Pruebas con alta carga

Por el contrario a lo que fueron las pruebas con distintos porcentajes de carriers, se realizó la prueba con alta carga. Las muestras que se compararon fueron: (1) Planta piloto con 10% carriers alta carga, (2) Planta piloto con 10% carriers condiciones normales, (3) PTE con alta carga y (4) PTE en condiciones normales de operación. Como respuesta a cada uno de estos escenarios, se analizó el valor del índice de fenol.

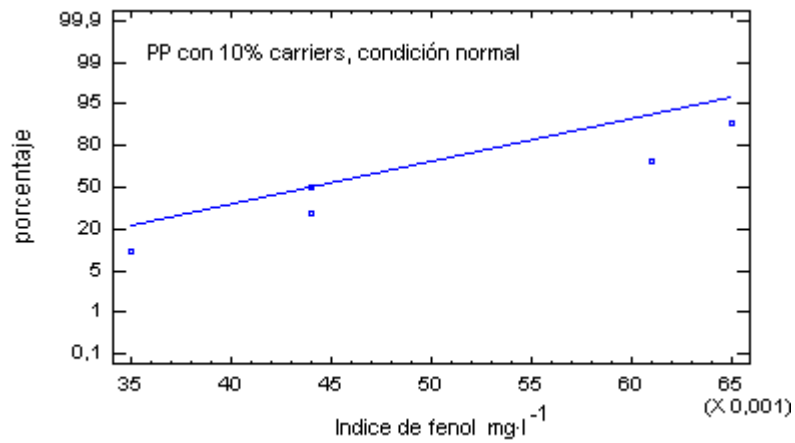
Las Figuras 17 a la 20, muestran los GPN para los datos de cada una de las situaciones antes nombradas. De éstas se infiera que todas las muestras siguen una distribución normal, puesto que tienen un comportamiento lineal. Además la Tabla 9 muestra los valores del sesgo y curtosis estandarizados, indicando que también se encuentran dentro del rango esperado para distribuciones normales.

**TABLA 9 Resumen estadístico para las muestras evaluadas**

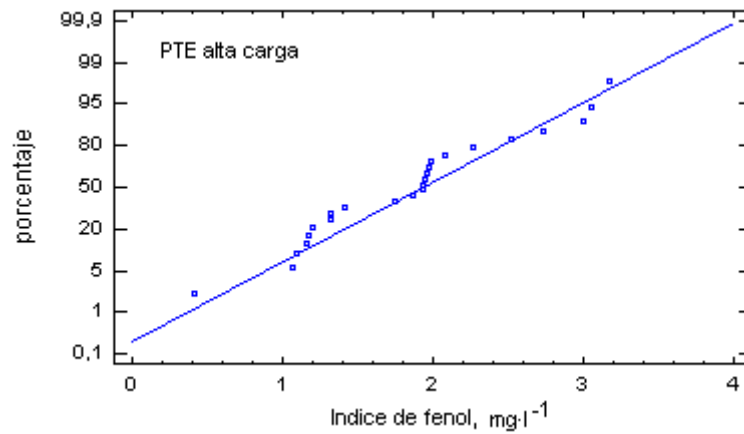
N <sup>o</sup>	Promedio (%)	Desviación Estándar (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
1	0,0528	0,0153	0,028	0,076	0,0477	-0,8209
2	0,0498	0,0127	0,035	0,065	0,2399	-1,0145
3	1,8471	0,7048	0,407	3,173	0,4170	-0,3226
4	0,0612	0,0066	0,053	0,074	0,9634	-0,5944



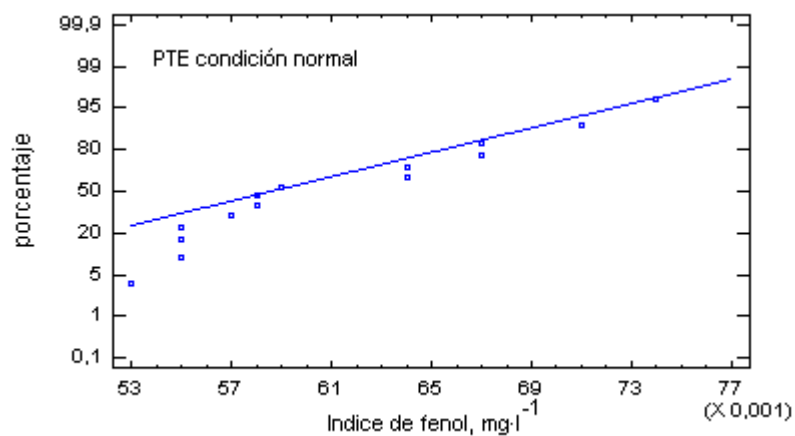
**FIGURA 17 Gráfico de probabilidad normal para PP con 10% carriers, alta carga.**



**FIGURA 18** Gráfico de probabilidad normal para PP con 10% carriers, condición normal.



**FIGURA 19** Gráfico de probabilidad normal para PTE alta carga.

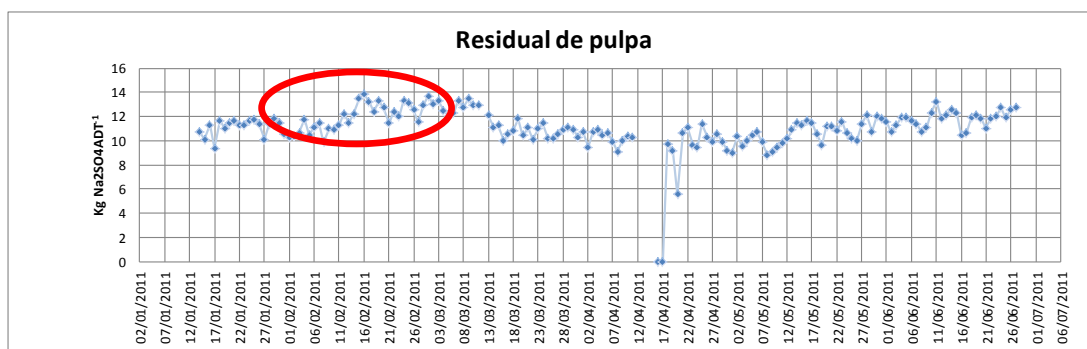


**FIGURA 20** Gráfico de probabilidad normal para PTE en condición normal.

En cuanto a la prueba de Levene's, ésta arrojó un valor-P de 1,707E-07. Como el valor es menor que 0,05 existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las muestras, con un nivel de 95,0% de



confianza. Por lo tanto, esto viola uno de los supuestos más importantes subyacentes en el análisis de varianza invalidando la mayoría de las pruebas estadísticamente comunes. Este resultado se puede explicar por la mayor variabilidad que se tuvo durante la prueba de alta carga, en donde no hubo una carga estable. Esto se muestra en figura 21 (se destaca período prueba alta carga), donde esta variable residual de pulpa muestra la variable manejada para variar la carga orgánica a la entrada de la planta de tratamiento de efluentes. En el período de prueba de alta carga se ve una variabilidad cíclica, es decir se trabajó con valores altos y “muy altos” respecto a la condición normal.



**FIGURA 21 Evolución del residual de pulpa durante pruebas de planta piloto**

El test-F (Fischer) fue realizado de todas maneras para este conjunto de muestras, aun cuando no es requisito para la prueba de múltiple rango y que el test de Levene's indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar de las muestras. El **valor-P** obtenido para esta prueba fue de **0,0000**. Debido a que el resultado es menor que 0,05, se infiere que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

Así, la prueba de múltiple rango puede realizarse habiendo hecho o no el test-F. La Tabla 10 muestra los resultados para esta prueba.

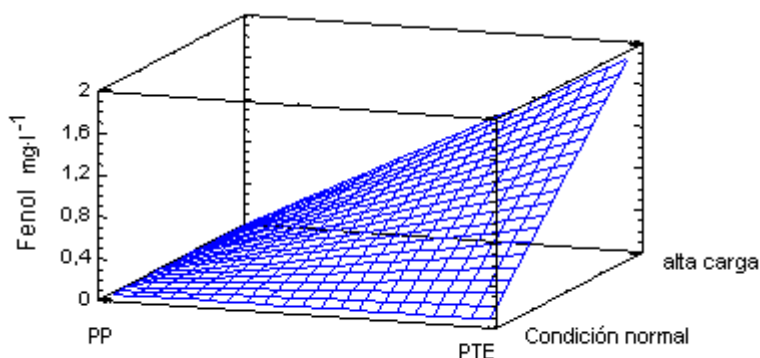
**TABLA 10 Prueba de Múltiple Rango.**

Contraste	Sig.	Diferencia (%)	+/- Límites (%)
1 - 2		0,0029	0,4681
1 - 3	*	-1,7944	0,2949
1 - 4		-0,0085	0,3343
2 - 3	*	-1,7973	0,4491
2 - 4		-0,0114	0,4759
3 - 4	*	1,7859	0,3072

Las diferencias entre las medias que resultaron estadísticamente significativas fueron entre los escenarios 1-3 (Planta piloto con 10% carriers alta carga y PTE con alta carga), entre 2-3 (Planta piloto con 10% carriers condiciones normales y PTE con alta carga) y finalmente entre 3-4 (PTE con alta carga y PTE en condiciones normales de operación).

De esto se deduce que la PTE con alta carga, fue el escenario crítico, donde el fenol aumentó a niveles considerables y por eso se diferencia del resto de los casos estudiados.

La Figura 22 muestra una superficie de respuesta estimada del índice de fenol para todos los escenarios, de modo que el efecto se vea con mayor claridad.

**FIGURA 22 Superficie de Respuesta Estimada para el fenol en todos los escenarios estudiados.**

Con apoyo de la Figura 21 queda en evidencia que la planta piloto no se vio afectada por el aumento de carga provocado, es decir, el sistema con carriers puede manejar y controlar eventuales contingencias de este tipo, debido a que los carriers hacen que el sistema sea más robusto, tal como lo indica la teoría.

## 5. CONCLUSIONES

Respecto al objetivo de hacer un diagnóstico de la planta de tratamiento de fluentes después del terremoto/tsunami, se determinó que la carga orgánica alimentada antes del terremoto del 27 de Febrero del año 2010 era de  $32 \text{ td}^{-1}$  de demanda química de oxígeno decantado, para un diseño de  $25,4 \text{ td}^{-1}$ . Posterior al evento sísmico esta carga se ha reducido a  $28,6 \text{ td}^{-1}$ , es decir prácticamente un 10%, lo cual es a costo de producción de celulosa. A su vez la descarga al mar se incrementó en 60%, desde  $8,7 \text{ td}^{-1}$  de demanda química de oxígeno soluble a  $14,0 \text{ td}^{-1}$ , aumentando por consecuencia el impacto ambiental. La planta quedó muy sensible a las variaciones de carga, incrementando los valores de fenol ante un aumento de esta.

El uso de carriers para proporcionar una superficie de crecimiento de biomasa en la aireación de una planta de tratamiento biológico y así suplir en parte la menor concentración de biomasa en el bioreactor al no contar con recirculación de lodo desde un clarificador, resulta una alternativa validada en planta piloto, que puede ser utilizada en esta emergencia. De esta forma se pudo cumplir el segundo objetivo planteado.

La Planta Piloto proporciona una buena herramienta de investigación. Futuras indagaciones podrán utilizarse para optimizar el bioreactor, al cambiar de ubicación los carriers desde la aireación propuesta actualmente, a la sección MBP, toda vez que se disponga de la concentración de oxígeno necesaria para una adecuada operación de la biopelícula, o estudiar otras variables o modificaciones de proceso.

Respecto al objetivo de estudiar el efecto de la concentración de carriers en la eficiencia de remoción de DQO soluble, se logró concluir que existe una diferencia estadística al usar carriers en la etapa de aireación, entre 10 y 30%, respecto al no usarlo; esta diferencia también se logra si se usa 20 ó 30%, respecto al uso de 10%. A su vez no hay diferencia estadísticamente significativa entre usar 20 y 30% de carriers.

Se puede alcanzar una eficiencia de reducción de DQO soluble en torno al 12% superior al usar una concentración de 20% en volumen de carriers en la etapa de aireación, respecto al no usar carriers.

Un aumento a 30% de carriers no tuvo efecto adicional en el porcentaje de abatimiento de DQO en planta piloto respecto a planta industrial. No obstante si se aprecia un aumento a nivel de reducción por unidad de tiempo y volumen.

Con los datos disponibles se puede afirmar que una implementación industrial podrá especificarse con una concentración de carriers entre 20 y 30%.

Se pudo cumplir el objetivo de verificar el efecto de la carga orgánica y carriers en la reducción del fenol. Al respecto resultó estadísticamente significativo el disponer de un sistema de biopelícula, el cual permite que no haya efecto en el índice de fenol, al aumentar la carga orgánica de alimentación.

La implementación a nivel industrial de carriers se recomienda y su implementación está supeditada principalmente a encontrar la forma de confinar los carriers en el bioreactor.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Metcalf and Eddy (1995). Ingeniería de aguas residuales. Editorial Mc Graw Hill.
- Bitton, G. (2005). Wastewater microbiology. Editorial Wiley-Liss.
- Broch-Due, A., Andersen, R., Kristoffersen, O. (1994). Pilot plant experience with an aerobic moving bed biofilm reactor for treatment of NSSC wastewater. ***Water Science and Technology***, **29 (5-6)**: 283 – 294.
- Broch-Due, A., Andersen, R., Opheim, B. (1997). Treatment of integrated newsprint mill wastewater in moving bed biofilm reactors. ***Water Science and Technology***, **35(2-3)**: 173–180.
- Cheremisinoff, N. (1996). Biotechnology for waste and wastewater treatment. Noyes Publications.
- Dalientoft, E., Thulin, P. (1997). The use the Kaldnes suspended carrier process in treatment of wastewater from forest industry. ***Water Science and Technology***, **35(2-3)**: 123 – 130.
- Hem, L.J., Rusten, B., Broch-Due, A., Mattson, E., Westrum, T. (1994). Treatment of forest industry wastewaters in moving bed biofilm reactors. Proc. 49<sup>th</sup> Industrial Waste Conference, Purdue University, Indiana, USA, p509.
- Johnson, C., Schlegel, M., Vandenberg, C. (1997). Treatment of recycle paper mill wastewater in moving bed biofilm reactors. In Environmental Conference & Exhibit: 999 – 1002.
- Malmqvist, A., Welander, T., Berggren, B., Asselin, C., Marquis, J. (2003). Removal of chronic toxicity and organic matter from a paper mill effluent in an MBBR process. TAPPI International Environmental Conference.
- Malmqvist, A., Gunnarsson, L., Torstenson, C. (1998). Lab and pilot scale test as tools for upgrading – Comparison with full scale results. ***Water Science and Technology***, **37(9)**: 25 – 31.
- Metcalf and Eddy (1995). Ingeniería de aguas residuales. Editorial Mc Graw Hill.
- Montgomery D. (2005). Diseño y análisis de experimentos. Editorial Limusa Wiley.
- Ødegaard, H., Rusten, B., Westrum, T. (1994). A new moving bed biofilm reactor – applications and results. ***Water Science and Technology***, **29 (10-11)**: 157 – 165.
- Plattes, M., Fiorelli, D., Gillé, S., Girard, C., Henry, E., Minette, F., O’Nagy, O., Schosseler, P.M. (2007). Modelling and dynamic simulation of a moving bed biorreactor using respirometry for the estimation of kinetic parameters. ***Biochemical Engineering Journal***, **33**: 253 – 259.

- Pozo, G. (2009). Optimización de la operación de un reactor aeróbico de biopelícula bacteriana inmovilizada: incidencia de los nutrientes en la biosíntesis de polihidroxialcanoato (PHA) como producto del tratamiento de efluentes de celulosa kraft. Universidad de Concepción.
- Rusten, B., Broch-Due, A., Westrum, T. (1994). Treatment of pulp and paper industry wastewaters in novel moving bed biofilm reactors. *Water Science Technology*, **30(3)**: 161–171.
- Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., Lygren, E. (2006). Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*, **34**: 322 – 331.
- Shun Dar Lin., (2007). Water and Wastewater Calculations Manual. Editorial Mc Graw Hill.
- Strehler, A., Welander, T. (1994). A novel process for biological treatment of bleached kraft mill wastewater. *Water Science and Technology*, **29(5-6)**: 295 – 301.
- Trinet F, Heim R, Amar D, et al. (1991). Study of biofilm and fluidization of bioparticles in a three-phase liquid-fluidized-bed reactor. *Water Science and Technology*, **23(7-9)**: 1347–54.
- Wang R., Wen X., et al. (2005), Influence of carrier concentration on the performance and microbial characteristics of a suspended carrier biofilm reactor. *Process Biochemistry* 40: 2992-3001.
- Welander, T., Malmqvist, A., Svensson, A., Torstenson, C. (1998). Removal of COD from pulp and paper industry effluents using suspended carrier biofilm technology. In International Environmental Conference & Exhibit: 303 – 310.

---

# APENDICES

---

# APENDICE A

## RESULTADOS

### A.0 Resultados Pilotaje

PARAMETRO/ FASE	Planta Piloto					Planta de Tratamiento de Efluente					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
ENTRADA	DQO Soluble (mg O2/l)	614	613	570	652	742	577	554	528	587	704
	Fenol (mg/l)	2,7	2,7	1,8	2,4	3,0	2,6	2,8	2,2	2,3	2,8
	SST (mg/l)	71	61	49	50	54	79	68	70	66	77
	DQOs (Kg/m3/d)	1,47	1,47	1,37	1,56	1,78	1,41	1,36	1,35	1,40	1,80
	pH	8,5	8,6	8,2	8,4	7,9	8,3	9,2	8,2	8,2	8,2
	Conductividad (µs/cm)	1297	1271	1304	1390	1348	1256	1153	1317	1329	1277
SALIDA	DQO Soluble (mg O2/l)	320	249	242	274	394	295	262	291	319	403
	Fenol (mg/l)	0,14	0,06	0,08	0,12	0,06	0,48	0,12	0,13	0,30	1,85
	SST (mg/l)	133	111	134	167	110	164	155	138	156	181
	DQOs (Kg/m3/d)	0,77	0,60	0,58	0,66	0,95	0,72	0,64	0,74	0,76	1,03
	pH	7,8	7,7	7,9	8,1	7,9	7,0	7,3	6,8	7,0	7,3
	Conductividad (µs/cm)	1280	1192	1286	1320	1318	1267	1174	1319	1343	1287
	Nitrogeno Amoniacal (mg/l)	1,7	2,9	1,1	2,1	0,9	1,0	1,1	0,9	0,8	0,8
Fosforo Soluble(mg/l)	0,11	0,12	0,13	0,23	0,09	0,09	0,10	0,06	0,05	0,07	
EFICIENCIA	% RED. DQO Soluble (mg O2/l)	47,7	59,3	57,4	57,8	46,6	48,8	52,7	45,0	45,5	42,6
	Red. Carga DQOs (Kg/m3/d)	0,71	0,87	0,79	0,91	0,83	0,69	0,72	0,60	0,64	0,77
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulico	10,2	10,0	10,2	10,3	10,4	10,0	10,2	10,0	10,3	9,5