

Economía circular del agua: industria de recuperación de celulosa de envases multicapa

Edith E. Gutiérrez-Segura ¹, Yohuali Zarazua-Aguilar ², María de Lourdes Hurtado-Alva ², Thelma Beatriz Pavón-Silva ^{2,*}

¹ Universidad Autónoma del Estado de México; Facultad de Química; Toluca, Estado de México, México.

² Universidad Autónoma del Estado de México; Unidad Académica Profesional Acolman; Acolman Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: tbpavons@uaemex.mx; Tel.: +52 7222066702.

Recibido: 23 de abril de 2021 Aceptado: 8 de mayo de 2021

Resumen: En el presente trabajo se reporta la implementación y puesta en marcha de una Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial (PTAR) de una empresa de recuperación de celulosa de envases multicapa. El proceso implicó una prueba piloto con el fin de verificar la tratabilidad del agua por medio de un tratamiento biológico anaerobio-aerobio. Con los resultados de esta prueba se procedió a realizar una propuesta de tratamiento, el diseño, construcción, puesta en marcha y evaluación de la PTAR. El resultado final es la recuperación del agua para tener una descarga cero y el ahorro en la compra de esta, que era efectuada por pipas, considerando a esta empresa como parte de una economía circular y con mayor dominio de la sustentabilidad. La propuesta del tren de la PTAR consta de: cribado, lodos activados, sedimentación secundaria, y el tratamiento terciario con filtros de arena y carbón activado y desinfección para la reutilización de agua. Se obtienen eficiencias de remoción de 82% para grasas y aceites, 85% para sólidos sedimentables, 70% para sólidos suspendidos y 75% para DBO₅, sin embargo, se hace necesario el uso de un inóculo por mes para el reactor biológico y es la etapa de evaluación que se reporta, es necesario la operación correcta del proceso terciario para evitar presencia de patógenos en la celulosa recuperada, así mismo, se obtiene descarga cero al reutilizar el total del agua tratada, ahorrando por mes un aproximado del 90% del costo del agua.

Palabras clave: Descarga cero; sustentabilidad; PTAR; reciclado; envases multicapa.

Circular water economy: cellulose recovery industry of multilayer packaging

Abstract: Herein it is reported the implementation and start up of a Wastewater Treatment Plant (WWTP) installed in a cellulose recovery company from multilayer packings. Initially, it was verified the treatability of the water sample by an aerobic-anaerobic biological procedure. Based on the obtained results of the initial stage, it was proposed the design, construction, start up and evaluation of the WWTP. It was achieved the total recovery of the treated water (zero discharge) and an economic benefit for the company since the available amount of water was almost enough for the requirements of the company and only a small fraction was purchased to external contractors. These principles fit well with the concept of circular economy and sustainability. The proposed WWTP configuration included the following components: sieving, activated sludges, a secondary sedimentation and a third treatment with sand filters, activated carbon and disinfection of the water. It was attained the following results: 82% of removal of oils and fats, 85% of removal of settleable solids, 70% of removal of suspended solids and 75% of removal of DBO₅. Nevertheless, it was necessary the monthly utilization of an inoculum in the biological reactor to avoid the presence of pathogens in the recovered cellulose. The correct operation of the tertiary process is necessary to avoid the presence of pathogens in the recovered cellulose, likewise, zero discharge is obtained by reusing the total treated water, saving approximately 90% of the cost of water per month.

Keywords: Zero discharge; sustainability; WWTP; recycling; multilayer packaging.

Introducción

Agua y economía circular implica sustentabilidad siendo conceptos relacionados en la intersección de la economía y el ambiente cuyo objetivo es dar valor a los productos materiales (Melgarejo, 2019), pero sobre todo a los recursos, entre ellos el agua, su recuperación o reutilización. Como lo indica el Banco Mundial, el agua residual se deja de ver como residuo y pasa a ser un recurso que va a ayudar a alcanzar los Objetivos del Desarrollo Sostenible; Banco Mundial (2021).

En la industria del papel y celulosa, el agua, es considerada como uno de los mayores insumos, la empresa Ziklum genera un proyecto para recuperar celulosa de los envases multicapa de desecho o tetrabrik® que por su procedencia (material de desecho proveniente de basura), pueden contener organismos patógenos (Singh and Chandra 2019), sin embargo desde el punto de vista de la sustentabilidad de tomar un desecho como materia prima para generar un nuevo producto también forma parte de la economía circular. Así la celulosa recuperada de los envases multicapa, se mezcla con celulosa depurada de fibra corta proveniente de archivo blanco en proporciones 70:30 y 80:20 y después de realizar pruebas como blancura, velocidad de drenado, índice de tensión, índice de rasgado, volumen, longitud de la fibra y

nivel de contaminantes se vende a otras empresas para la elaboración de papel Tissue o bien libretas para escritura (Mañón, 2018). Un envase multicapa contiene celulosa (74-75%) polietileno de baja densidad (20-22%), y aluminio (4-5%). La celulosa recuperada por esta empresa cuenta con marca registrada ZIKLUMCEL® conocida como celulosa NBKS (Northern softwood Bleached Kraft) o de fibra larga que se comercializa para producir papel Tissue; se obtiene un segundo producto conocido como polialuminio con el cual se fabrican láminas compactas de marca ZIKLUMPLAK® similar a un conglomerado de madera con diversas aplicaciones (techos para vivienda, muros falsos, plafones, cornisas, perfilera para ventanas o puertas, carrocerías, jardines verticales y muebles entre otros) (Chung, 2003; Inche *et al.*, 2003; Morales, 2017), por lo tanto de un material de desecho se están obteniendo dos productos.

Domínguez-Ríos y colaboradores (2017), reportan que por el alcance del internet se dejaría de utilizar el papel para impresiones, sin embargo, esto no es así, debido a la economía e innovación de las impresoras; las empresas buscan imprimir sus documentos y la industria de la celulosa sigue creciendo INEGI (2013), reporta datos de producción de papel de la siguiente manera: con un aumento del 10% de 2007 a 2012, en el mismo periodo el aumento para papel facial es del 27.6%, para servilletas es de casi 500%, toallas Tissue 93.5% y en cuadernos disminuye un 48.3%. En la actualidad dos terceras partes del insumo para la producción del papel provienen de papel reciclado, lo que implica ventajas como menores costos de producción y por supuesto mantener los bosques, contribuyendo con esto a la baja en la emisión de gases efecto invernadero con el 0.7% del PIB. (Cámara del papel, 2019, INEGI, 2013).

De acuerdo con el reporte de la industria del papel (Seale & Associates, 2017), se indica que se genera un producto sustentable si se controla el origen de las fibras, el consumo de energía, agua y otros recursos teniendo un ciclo de vida superior a otras materias primas generales. En cuanto a la tratabilidad del recurso agua, existen tecnologías tanto químicas como biológicas, sin embargo, dependerá de su composición para establecer el proceso más adecuado, ésta puede contener componentes muy tóxicos como gases, metales, compuestos orgánicos e inorgánicos (Singh and Chandra, 2019). Compuestos orgánicos persistentes que son tóxicos y causan alteraciones del sistema endocrino (Kumar, *et al.* 2019), se reportan tratamientos tanto fisicoquímicos como biológicos (aerobio o anaerobio) Mazhar, *et al.*; 2019, Birjandi *et al.*; 2013. Ashrafi *et al.*; 2015. Latorre *et al.*, 2007. Thompson *et al.*; 2001- y métodos electroquímicos (Martínez Herrera, *et al.*; 2005) o la combinación de algunos de estos (Buttazzoni *et al.*; 2020, Izadi *et al.*; 2018, Shankar *et al.*; 2013, Salamanca-Torres *et al.*; 2009). Con el fin de contribuir a la sustentabilidad de este tipo de industria, la empresa Ziklum, implementa una PTAR, con el fin de reciclar el 100% del agua y reducir la merma de celulosa (5%) que, como resultado del proceso de despulpado, hoy queda en el agua residual, considerando también la baja en presencia de organismos patógenos que es un problema presente en el producto recuperado, debido a la procedencia de la materia prima. Para consolidar los proyectos se forma una alianza con la empresa Eco-Intellutions S.A. de C.V., con experiencia en manejo sustentable de agua que participará en el diseño, planeación, construcción y puesta en marcha de la PTAR. El papel de la Universidad Autónoma del Estado de México consistió en apoyar con servicios sociales el trabajo de arranque de la operación y control de la PTAR, integrándose al grupo al arranque de la fase de construcción de la propuesta seleccionada.

Materiales y Métodos

Metodología para la PTAR

El proyecto estuvo dividido en tres etapas: La primera etapa fue la prueba de tratabilidad, llevada a cabo en un reactor piloto compuesto por un reactor anaerobio seguido del reactor aerobio (lodos activados) con el sedimentador acoplado, el flujo de trabajo fue de 0.05 m³/d, tomando muestras del influente y salida del sedimentador esto con la alianza de una empresa consultora Eco-Intellutions S.A. de C.V., la prueba tuvo una duración de 30 días analizando los parámetros de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos totales (SST) de entrada y salida de planta piloto. Los estudios fueron llevados a cabo por cuadruplicado.

A partir de los resultados de la prueba piloto se llevó a cabo la segunda etapa que consistió en el escalamiento y construcción de la PTAR. Una vez construida, se llevaron a cabo pruebas hidráulicas, se optimizaron los tiempos de retención de los reactores biológicos, así como gastos de recirculación y demás parámetros de control de proceso. La tercera etapa fue el arranque de la PTAR y su estabilización que duró aproximadamente cuatro meses, punto en el cual se integran los estudiantes de la licenciatura en Ingeniería Química para apoyar con el proceso de arranque de la PTAR. En la Figura 1 se muestra la secuencia metodológica que se siguió en el presente trabajo.

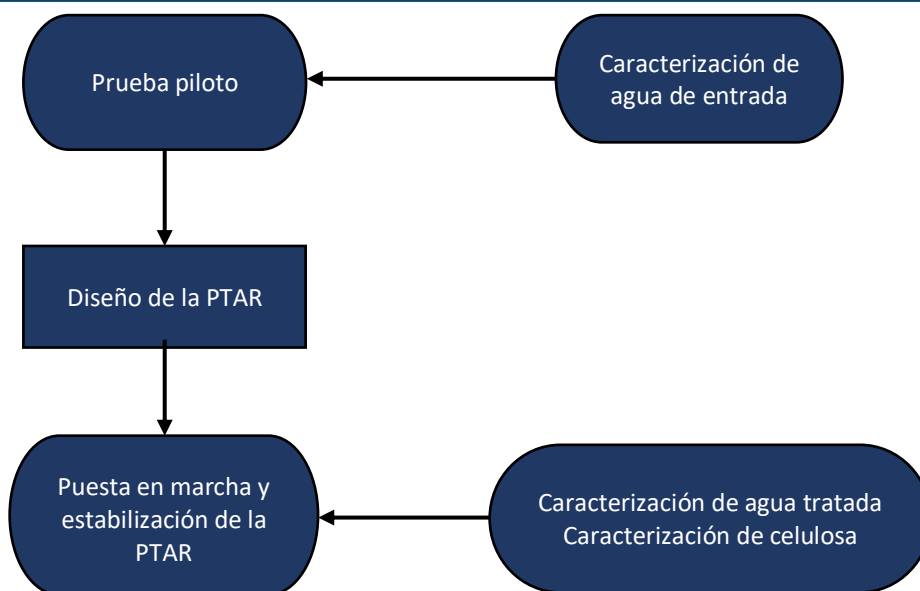


Figura 1. Secuencia metodológica

Caracterización del agua tratada

La caracterización del agua se realizó de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y con esto fue posible reutilizar el 100% de agua tratada. Los análisis fueron realizados en un laboratorio acreditado de acuerdo con las NMX correspondientes en la NOM. (Standard Methods for the Examination of Water and wastewater 2017).

Caracterización de la celulosa recuperada con agua tratada

Se realizó la caracterización microbiológica de la celulosa recuperada en cuanto a las pruebas de control, así mismo para patógenos: bacterias mesófilas aeróbicas, cuenta de mohos, cuenta de levaduras, coliformes fecales y coliformes totales, de acuerdo con los estándares de las normas oficiales mexicanas (NOM-092-SSA1-1994, NOM-111-SSA1-1994, NOM-210-SSA1-2014).

Paralelo a esto se cuantifico el costo de uso de agua, considerando el número de pipas que se compran por mes para calcular el ahorro al tener el 100% reciclada y solo reponer las pérdidas durante el proceso.

Resultados y Discusión

Resultados de la prueba piloto

En la Tabla 1, se presentan los resultados de la prueba piloto con los parámetros de Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Obteniendo 91.6 %, 95 % y 97.5 % de remoción respectivamente para estos parámetros.

Tabla 1. Resultados promedio de la prueba piloto a la entrada y salida de PTAR.

Parámetro	Influente de la PTAR	Efluente de la PTAR
SST (mg/L)	350±6.1	29.5±0.6
DBO (mg/L)	599.7±11	29.7±0.5
DQO (mg/L)	1199±21.8	30

NA: No Aplica. Fuente: Empresa consultora

De acuerdo con estos resultados la empresa Eco Intellutions diseña la PTAR para el efluente en cuestión, propone el tren de tratamiento considerando el proceso biológico, a continuación, se describe las operaciones unitarias de la propuesta.

Tratamiento primario.

Se implementa un cribado con dos fines, eliminar la celulosa residual de la descarga y con esto recuperar el 5% de la celulosa y eliminar la mayor parte de sólidos para el tratamiento biológico. Esto retiene aproximadamente un 90% de la celulosa que salió del proceso en el agua de descarga. El sistema de cribado (Figura 2) cuenta con cuatro niveles de tamiz: de malla # 8, # 16, #22 y # 30, con el fin de retener la celulosa remanente, así como sólidos que se encuentran en el agua, consistentes en residuos de plástico y aluminio.



Figura 2. Operación unitaria de cribado

Tratamiento secundario.

Propuesto por un sistema acoplado anaerobio-aerobio, se diseñaron el reactor biológico anaerobio y un tanque aerobio (lodos activados), así como el sedimentador secundario. En la Figura 2 se muestra el plano de la planta, **a.** vista en planta y **b.** corte transversal observando el tren de tratamiento: reactor anaerobio ($V=32 \text{ m}^3$), reactor aerobio de lodos activados ($V=29 \text{ m}^3$), posteriormente un sedimentador para la separación de lodos considerando el lodo de recirculación, con el fin de mantener la relación adecuada de alimento/microorganismos.

Cabe hacer mención que al revisar los análisis de la prueba piloto y evaluar la propuesta de implementación del proceso acoplado anaerobio-aerobio, de acuerdo con lo reportado en la literatura no se considera la propuesta más adecuada se considera que la información proporcionada por la empresa, referente a los datos técnicos del equipo utilizado en la planta para realizar la medición son limitados y no se cuenta con una total certeza de su precisión. Las mediciones de DBO difieren considerablemente de valores previamente adquiridos: concentración máxima de 153.9 mg/L y concentración mínima de 92.3 mg/L. Partiendo de ese antecedente se sugirió a la empresa realizará análisis de DQO y verificar la relación existente de estos dos parámetros para la toma de decisión, sin embargo, la decisión tomada fue construir el proceso biológico anaerobio-aerobio como se muestra en los planos de diseño (Figura 3).

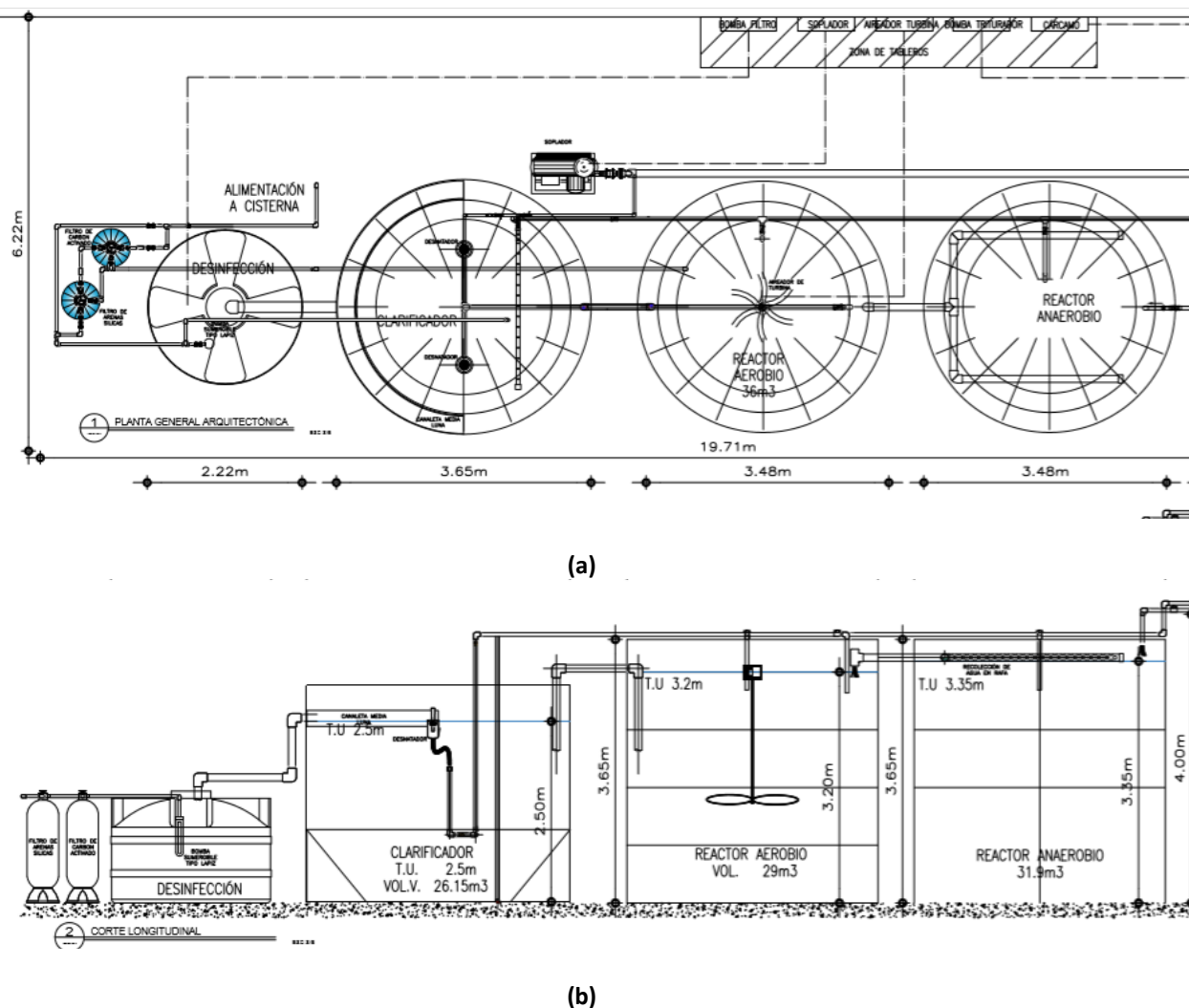


Figura 3. Planos generales de la PTAR, sin considerar el cribado a. vista en planta, b. corte transversal. Fuente: Empresa colaboradora de la recicladora de envases multicapa, en colaboración con estudiante de servicio social de la UAEM-Acolman

Tratamiento terciario

Compuesto por un filtro de arena, un filtro de carbón activado y la desinfección por cloro, éste último, además de cumplir con la función de eliminar patógenos presentes en el agua, contribuye como cloro residual en la primera etapa de recuperación de la celulosa de envases multicapa que es en el hidrapulper, ayudando a la eliminación de patógenos procedentes de los envases que como ya se mencionó en un mayor porcentaje provienen de la basura.

Problemas presentados durante el proceso

Considerando que al ser una industria que obtiene celulosa de un material de desecho (proveniente de tiraderos), la contaminación procede de la descomposición del alimento que contiene ese envase (lácteos, jugos, etc.), por otro lado, al tener sólo una línea de producción no se espera variación considerable del proceso y por ende cambios en las descargas del efluente, debido a esto el tratamiento de agua no espera complicaciones generadas por las diferencias del efluente como lo expresa Thomson, *et al.* (2013), generando cuando hay un desbalance de la carga orgánica, la presencia de bacterias filamentosas, dando lugar a lo que se conoce como lodos voluminosos, lo que es desfavorable al reducir las velocidades de sedimentación y la compactación del lodo.

En cuanto a los reactores biológicos la etapa de acondicionamiento y crecimiento celular no se pudo lograr en el reactor anaerobio, se argumenta la baja carga orgánica presente en el agua, o bien a la toxicidad presente como lo mencionan Singh and Chandra (2019) que indican una gama diversa de productos químicos como gases, metales y diversos

compuestos tanto orgánicos como inorgánicos que provocan toxicidad directa a diversos organismos acuáticos. En este trabajo no hay evidencia de la toxicidad del agua, sin embargo, considerando la relación DBO_5 a DQO como la cantidad que representa la fracción de compuestos orgánicos fácilmente biodegradables, el valor calculado es de 0.5 (datos de la Tabla 1), por lo que efluente en cuestión es considerado como de baja biodegradabilidad y por lo tanto el tratamiento deberá ser fisicoquímico (Hube *et al.*, 2016). Derivado de este problema la empresa especialista en la degradabilidad del agua, consideró, sólo cambiar sus condiciones a otro reactor biológico de tipo aerobio, y de esta manera la PTAR pasa a tener dos reactores biológicos aerobios.

Consideramos que esto fue error de diseño desde la propuesta piloto, ya que se mencionó en el informe de la empresa consultora un reactor piloto anaerobio-aerobio, pero las evidencias (proporcionadas por la empresa) solo dan resultado de un reactor biológico aireado, por lo que se presumen no consideraron esta etapa. Izadi y colaboradores (2018), reportan un estudio de agua residual de industria de reciclado de papel, con DQO de 900 mg/L y SST de 4120mg/L, pero su método de tratamiento es electrocoagulación, por otro lado Salamanca-Torres y colaboradores (2009) para descargas de agua de este tipo de industria, proponen la combinación de procesos fotooxidativo-microbiológico, garantizando con el primero la destrucción de compuestos tóxicos o recalcitrantes, dejando disponible el alimento para el tratamiento biológico que en este caso es un consorcio de microorganismos específicos para este tipo de agua, alcanzando eficiencias de remoción de entre 45 a 67%. Ashrafi *et al.*, (2013) reportan a la industria del papel como el tercer lugar en la variabilidad de composición de las descargas y cantidad de aguas residuales y de acuerdo al proceso que se le dé a la pulpa será la composición de las descargas de aguas residuales y por lo tanto el tipo de tratamiento, sin embargo Pokhrel D. y Viraraghavan T. (2004) reportan combinación de tratamiento anaerobio-aerobio para este tipo de efluentes considerando su composición como orgánicos solubles en el agua.

De inicio se realizaron pocos análisis por la empresa constructora de la PTAR y ninguno de ellos bajo un laboratorio acreditado para los parámetros de la norma oficial mexicana, por lo que hizo falta un mayor seguimiento del comportamiento de descargas en cuanto a caracterización y garantizar de esta manera de biodegradabilidad del efluente para confirmar el proceso biológico que se propone.

Parte de lo que se recomendó a la empresa Ziklum, fue la realización de análisis de descargas es sabido de la variación tanto de flujos como de composición por las actividades inherentes de la empresa en las diferentes épocas del año, por lo que los análisis de descargas deben ser realizados por tiempos prolongados para reconocer estas diferencias (Crites *et al.*, 2000).

Aspectos que no fueron considerados dentro del proyecto son los relacionados con el control y operación de la PTAR, como: potenciómetro, medidor de Oxígeno disuelto (OD), cono Imhoff para sólidos sedimentables, etc., por lo que cuando se hace entrega de la PTAR por la empresa colaboradora queda latente este problema, aunado a que no se cuenta con una persona capacitada para el manejo de la PTAR y el operador asignado cubre un turno de 8 horas, cuando es sabido que una PTAR trabaja 24 horas al día los 365 días del año.

Después de que se estabilizó el sistema durante un periodo de aproximadamente 60 días, se procedió a realizar la evaluación de la entrada y salida del tratamiento biológico, En la Tabla 2 se presentan los resultados de los parámetros obteniendo eficiencias de remoción de 82% para grasas y aceites, 85% para sólidos sedimentables, 70% para sólidos suspendidos y 75% para DBO_5 ; en cuanto a los parámetros microbiológicos exceden lo establecido reportando los coliformes fecales de 46,000 a 110,000 NMP/100mL, con presencia de 2 huevos de helminto. Considerando que es un recurso que se reutilizará, la empresa debe confirmar estos niveles como adecuados para su proceso debido a que uno de los problemas para la celulosa recuperada será la eliminación de patógenos de la misma. Singh and Chandra (2019) reportan que descargas de industria de papel y celulosa inducen el crecimiento de bacterias coliformes fecales generando un riesgo para la salud, también ha confirmado la presencia de *Escherichia coli* entre otras bacterias coliformes termotolerantes.

En cuanto a la caracterización de la celulosa recuperada con el agua tratada se presentan resultados de ésta antes y después de usar el agua recirculada, en la Tabla 3, se puede observar los parámetros coliformes totales y coliformes fecales los cuales han reducido su cantidad en 99%, 99.8% respectivamente y la cuenta para *E. coli*, es de 43 NMP/g, para la celulosa de la línea de producción con el uso del agua tratada, también hay presencia de bacterias mesófilas aeróbicas, mohos y levaduras.

Tabla 2. Caracterización del agua de entrada y salida de la PTAR

Parámetro	Influyente	Efluente
Grasas y Aceites (mg/L)*	82.82	14.95
Sólidos sedimentables (mg/L)	10	1.5
Sólidos suspendidos (mg/L)	282	84
DBO (mg/L)	223.1	55.6
NT Kjeldahl (mg/L)	12.27	3.1
Nitratos (mg/L)	0.25	0.13
Nitritos (mg/L)	<0.02	<0.02
Nitrógeno total (mg/L)	12.54	3.25
Cianuro (mg/L)	<0.02	<0.02
Fosforo (mg/L)	34.21	6.36
Arsénico (mg/L)	0.005	0.003
Cobre (mg/L)	0.4	0.1
Cadmio (mg/L)	<0.1	<0.1
Cromo (mg/L)	<0.1	<0.1
Mercurio (mg/L)	<0.002	<0.002
Plomo (mg/L)	0.28	0.02
Zinc (mg/L)	0.63	0.67
Níquel (mg/L)	<0.1	<0.1

*Promedio ponderado de cuatro muestras simples, NA: No Aplica

Tabla 3. Parámetros coliformes totales

Parámetro	Celulosa con agua tratada sin tratamiento terciario	Celulosa con agua tratada
Coliformes totales (NMP/g)	≥ 240,000	≥ 2,400
Coliformes fecales (NMP/g)	≥ 240,000	460
<i>E. coli</i> (NMP/g)	ND*	43
Bacterias mesófilas aeróbicas (UFC/g)	ND*	5400
Cuenta de mohos (UFC/g)	ND*	1000
Cuenta de levaduras (UFC/g)	ND*	<10

* No determinado

Si bien a la empresa se le recomendó un proceso fisicoquímico mismo que garantizaría mejores resultados y control del proceso, la decisión fue instalar un proceso biológico, mismo que no funcionó en su totalidad y presenta deficiencias en la remoción de contaminantes, por lo cual el mismo proveedor de la PTAR sugirió el uso de inóculo microbiológico destinado a efluentes de papel y celulosa, dichos microorganismos tienen una duración de un mes para después de este tiempo cambiar el inóculo, lo que incrementa el costo del tratamiento. Ospina-Betancourth *et al.* (2021), han logrado desarrollar un inóculo de bacterias fijadoras de nitrógeno en efluentes de una fábrica de papel en reactores de secuenciación por lotes, el lodo activado es alimentado con un residuo que contiene (C/N 100:0.5) con esto logran reducir la carga orgánica en un 89%, sin embargo, el número de bacterias fijadoras de nitrógeno se reduce con el tiempo. En este trabajo se concluye que la carga de nitrógeno debe de ser menor ($C/N \leq 100:0.07$), por lo que si se considera seguir con el proceso biológico es recomendable obtener un inóculo “*ad-hoc*” para la composición de esta descarga, o bien hacer la reingeniería del tratamiento.

La construcción de esta planta con los gastos inherentes contribuirá al ahorro de agua potable de 20 – 40 m³ por día que, al mes, corresponde a 900 m³. El costo de la pipa de agua es de \$500.00 (quinientos pesos 00/100 MN), y se utilizaban de 38 a 40 pipas/mes, con un costo total de \$20,000.00, con lo que la puesta en operación de la planta de tratamiento se ahorra \$18,000.00, ya que solo se consideran las recargas por perdidas (2 pipas/mes)

La contribución de esta empresa se contabiliza de la siguiente manera: se generan beneficios como retirar de los tiraderos de basura y rellenos sanitarios un total de 270 toneladas de envases multicapa de desecho al mes; reutilizar

75 toneladas de archivo blanco al mes; obteniendo 200 toneladas de celulosa de fibra larga NBSK (ZIKLUMCEL®) y 70 toneladas de una mezcla de polietileno y aluminio, materia prima para la producción láminas termoacústicas ZIKLUMPLAK®. Se generan 47 empleos directos (43 hombres y 4 mujeres) y cerca de 220 indirectos, éstos últimos asociados a la red de abasto de envases de desecho que se ha consolidado.

Conclusiones

El concepto de economía circular se aplica desde el momento que la empresa utiliza como materia prima un desecho que son los envases multicapa, esto lleva a esta industria a catalogarla dentro de la sustentabilidad, aunado a esto la propuesta de descarga cero, cierra el ciclo hidrológico de la empresa en cuanto al consumo de agua, utilizando sólo lo requerido por pérdidas del preciado líquido.

En cuanto al proceso implementado, se considera que la PTAR puede trabajar de esta manera, pero requiere de un mayor control y atención además de la capacitación para el personal que manejará la planta. El cribado cumple la función de recuperar la celulosa remanente, sin embargo, se plantea una reingeniería en el primer tanque biológico y modificación de la primera operación unitaria con la finalidad de preservar el tiempo de vida del inóculo.

Es necesario mejorar la aplicación del tratamiento terciario para la eliminación de patógenos y eliminar su presencia en la celulosa recuperada, ya se cuenta con los filtros de carbón activado, arena y desinfección por cloro.

Se proyecta con la empresa realizar pruebas de electrocoagulación y coagulación química al inicio del proceso buscando la degradabilidad de la materia compleja con el fin de dejarla disponible a los microorganismos del proceso biológico que ya se tiene.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma del Estado de México por el apoyo otorgado a través del proyecto: 4578/2018/CI, así mismo a la empresa Ziklum S. A. de C.V., por la colaboración para la realización del proyecto.

Bibliografía

- Ashrafi O., Yerushalmi L., Haghighat F. (2015). Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: a review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. *J Environ Manag.* 158: 146–57. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.05.010
- Ashrafi O., Yerushalmi L., Haghighat F. (2013). Greenhouse gas emission by wastewater treatment plants of the pulp and paper industry – Modeling and simulation. *International Journal of Greenhouse Gas Control.* Volume 17, September Pages 462-472. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.06.006>
- Banco Mundial (2021). Consultada en abril de 2021. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative>
- Birjandi N, Younesi H, Bahramifar N, Ghafari S, Zinatizadeh AA, Sethupathi S. (2013). Optimization of coagulation flocculation treatment on paper-recycling wastewater: application of response surface methodology. *J Environ Sci Health A.* 48(12):1573–82. DOI: 10.1080/10934529.2013.797307
- Buttazzoni Mion M. Goi D. (2020). Evaluation of ozonation applicability to pulp and paper streams for a sustainable wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production.* Volume 258, 10 June, 120781. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120781>
- Chung F. A. Tectán. Reciclando tetra pack. *Industrial Data. Notas científicas.* (2003). http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/Vol6_n1/pdf/tectan.pdf
- Domínguez Ríos M. del C., Hernández Contreras R. G., Medina Hernández R. M. (2017). Innovación y sustentabilidad de la industria de papel en México, *Revista Global de Negocios* Vol. 5, No. 5, pp. 87-97.
- Hube M., Meyys J.R., Hermosilla D., Blanco A., Yerushalmi L., Lindholm-Lehto P., Khodaparast Z., Kamali M., Elliott A. (2016). Wastewater Treatment and Reclamation: A Review of Pulp and Paper Industry Practices and Opportunities. *Bioresources* 11(3):7953-8091. DOI 10.15376/biores.11.3.Hubbe.
- Inche M., Jorge; Chung P., Alfonso; Del Carpio G., Javier; Yenque D., Julio; Ráez G., Luis; Mavila H., Daniel. (2003). Diseño y desarrollo de un prototipo a partir de envases reciclados. *Industrial Data.* Vol. 6, núm. 2, diciembre, pp. 7-11 A.
- INEGI. Estadísticas a propósito de la Industria del Papel. (2013). http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/economico/a_proposi_de/Papel.pdf
- Izadi A., Hosseini M.; Najafpour Darci G.; Gholamreza D.; Nabi Bidhendi G.; Pajoum Shariati F. (2018). Treatment of paper-recycling wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 16:257–264 <https://doi.org/10.1007/s40201-018-0314-6>
- Kumar Singh A. and Chandra R. Pollutants released from the pulp paper industry: Aquatic toxicity and their health hazards. (2019). *Aquatic Toxicology* 211, 202-216. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31029991/>

- Latorre A, Malmqvist A, Lacorte S, Welander T, Barceló D. (2007). Evaluation of the treatment efficiencies of paper mill whitewater's in terms of organic composition and toxicity. *Environ Pollut.* 147(3):648–55. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.09.015
- Mañón L. (2018). Comunicación personal representante legal de la empresa Ziklum.
- Martínez Herrera G., Guerra González R., Martínez Cinco M.A. (2005). Estudio sobre la reducción de contaminantes en aguas residuales provenientes de la industria de la celulosa y papel por métodos electroquímicos. *Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Cámara del papel Medio Ambiente.* Año 5, No. 9. <http://camaradelpapel.mx/> Consultada el 05-04-2019
- Mazhar S. Ditta A., Bulgariu L. I. Ahmed M. Allah Nadiri A. (2019). Sequential treatment of paper and pulp industrial wastewater: Prediction of water quality parameters by Mamdani Fuzzy Logic model and phytotoxicity assessment. *Chemosphere* Volume 227, Pages 256-268. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.022.
- Melgarejo Moreno J. Agua y Economía Circular. Congreso Nacional del Agua (2019). Innovación y sostenibilidad. Instituto del Agua y de las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/88467/1/Congreso_Nacional_Agua_2019_27-52.pdf
- Morales Rodríguez L. (2017). Fabricación de aglomerados TECTAN como sustituto de la madera haciendo uso del reciclaje de envases Tetra Pak. Universidad Manizales. <https://www.slideshare.net/luiselesez/reciclaje-de-empaques-tetra-pak>.
- Ospina-Betancourth C., Acharya K., Allen B., Head I. M., Sanabria J. and Curtis P. T. (2021). Valorization of Pulp and Paper Industry Wastewater Using Sludge Enriched with Nitrogen-Fixing Bacteria MAIN DOCUMENT (CLEAN VERSION).
- Pokhrel D. and Viraraghavan T. (2004) Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review. *Science of The Total Environment.* Volume 333, Issues 1–3, 15 Pages 37-58. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017>
- Salamanca-Torres A, Geissler G. y Sánchez-Salas J. L. (2009). Tratamiento de aguas provenientes de la industria papelera por medio de la combinación de un proceso fotooxidativo y un proceso microbiológico. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 5 (1):50-57
- Seale & Associates (2017). Reporte de la Industria del Papel. Washington D.C. Monterrey México <http://mnamexico.com/wp-content/uploads/2017/05/Industria-Papel-4.pdf>. Consultado del 13-05-2019.
- Shankar R., Singh L., Mondal P., Chand S. (2013). Removal of Lignin from Wastewater through Electro-Coagulation. *World Journal of Environmental Engineering*, Vol. 1, No. 2, 16-20. DOI:10.12691/wjee-1-2-1
- Singh A. K. and Chandra R. (2019). Pollutants released from the pulp paper industry: Aquatic toxicity and their health hazards. *Aquatic Toxicology.* 211, 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.04.007>
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (2017). 23rd Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Thompson G., Swain J., Kay M., Forster C.F. (2001). The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresour Technol.* 77(3): 275–86. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852400000602>