Artículo original / Original article / Artigo original

DOI: 10.22507/pml.v14n1a5

Estrategias de producción más limpia –PML: caso aplicado a la industria de curtiembre

Edinson Fabián Monroy Ávila, Cesar Arbey Peña Monroy, Giovanna del Pilar Garzón Cortés

Resumen

Introducción. La industria de la curtiembre es un sector importante del desarrollo económico al norte de Cundinamarca, allí se encuentra más de 190 empresas dedicadas a la transformación de piel bovina putrescible en cuero no putrescible; actividad que genera vertimientos altamente tóxicos que llegan de manera directa al río Bogotá, ocasionando efectos adversos en el ambiente y la salud pública al carecer de sistemas tecnificados bajo principios de PML. **Objetivo.** Este estudio se centró en analizar el sistema de producción de una curtiembre del norte de Cundinamarca, para formular estrategias de PML a nivel de microempresas del sector. **Materiales y métodos.** El estudio verificó datos en campo de cada una de las actividades del proceso productivo, para luego construir el diagrama de procesos, el balance de masas; herramientas que permitieron la consolidación de estrategias planteadas de PML y la cuantificación de los beneficios económicos esperados para mejorar el desempeño ambiental de la empresa de curtido. **Resultados.** Este estudio evidenció que mediante acciones de PML fue posible ahorrar un 52 % en el consumo de agua, reducir el 75 % de residuos sólidos a disponer en rellenos sanitarios, 73 % de insumos químicos requeridos para el curtido; además la transformación y tecnificación del sistema productivo permitirá recuperar aproximadamente COP 932.766 por cada proceso productivo de 1.000 kg de piel cruda. **Conclusiones.** Las estrategias de PML consolidadas, permiten transformar los sistemas artesanales de producción a sistemas

1 Artículo original derivado de la investigación: Remoción de Cromo Hexavalente (Cr6+) en aguas residuales mediante bioabsorbentes (naranja y salvado de trigo) en la curtiembre Rodríguez Melo municipio de Chocontá. Investigación realizada durante el 2017 y 2018 como opción de grado para optar por el título de Magíster en Tecnologías para el manejo de Aguas y Residuos, financiado por los autores

2 M Sc. en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, especialista en Aguas y Saneamiento Ambiental de la Universidad Manuela Beltrán, Ingeniero Ambiental de la Universidad de Cundinamarca. Investigador principal, Docente de Ingeniería Ambiental e investigador del semillero Gestión Sostenible del Recurso Hídrico adscrito al grupo de investigación COBIDES, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, Colombia.

3 Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad de Cundinamarca, coinvestigador, integrante del Semillero de Investigación Estudios Alternativos de Teorías de Desarrollo y Medio Ambiente del grupo GUIA de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, sede Girardot, Colombia.

4 PhD (c) en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, MBA, Especialista en Gestión Integrada de la Calidad, Seguridad y Medio Ambiente de la Universidad Viña del Mar,
Administradora Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Colombia, coinvestigadora, grupo de investigación SYRAS.
Autor para correspondencia: Edinson Fabian Monroy, correo electrónico: ingenierofabianm@gmail.com
Recibido 9/4/2019 Aceptado: 28/08/2019

tecnificados más competitivos y productivos en coherencia con los objetivos de desarrollo sostenible.

Palabras clave: desarrollo sostenible, curtiembre, tecnología limpia, producción sostenible, industria del cuero.

Cleaner production strategies–PML: a case applied to the tannery industry

Abstract

Introduction. The tannery industry is an important sector of the economic development of the north of Cundinamarca; there are more than 190 companies dedicated to the transformation of putrescible bovine skin into non-putrescible leather; an activity that generates highly toxic discharges directly into Bogotá river, causing adverse effects on the environment and public health, due to the lack of technified systems under the principles of Cleaner Production (CP). **Objective.** This study focuses on analyzing the production system of a tannery in northern Cundinamarca to formulate CP strategies at the microenterprise level in that sector. **Materials and methods.** The study verified data in the field of each one of the activities of the productive process, to then build the process diagram, the mass balance; tools that allowed the consolidation of PML strategies, and the quantification of the economic benefits expected to improving the environmental performance of the tanning company. **Results.** This study shows that through CP actions it is necessary to save 52% in water consumption, and reduce 75% of solid waste available in sanitary landfills, and 73% of the chemical inputs required for tanning; In addition, the transformation and technification of the production system will allow the recovery of approximately COP 932,766.0 for each production process of 1,000 kg of raw skin. **Conclusions.** Consolidated CP strategies allow the transformation of artisanal production systems into technified systems, these being more competitive and productive in coherence with sustainable development objectives.

Keywords: sustainable development, tannery, clean technology, sustainable production, leather industry

Estratégias de produção mais limpa–PML: caso aplicado à indústria de curtume

Resumo

Introdução. A indústria de curtume é um setor importante do desenvolvimento econômico ao norte de Cundinamarca, ali encontra-se mais de 190 empresas dedicadas à transformação de pele bovina putrescível de couro en couro não putrescível; atividade que gera vazamentos altamente tóxicos que chegam de maneira direta ao rio Bogotá, ocasionando efeitos adversos no ambiente e na saúde pública ao carecer de sistemas automatizados sob princípios de PML. **Objetivo.** Este estudo -se en analisar o sistema de produção de curtume do norte de Cundinamarca, para formular estratégias de PML a nível de microempresas do setor. **Materiais e métodos.** O estudo verificou dados em campo de cada uma das atividades do processo produtivo, para depois construir o diagrama de processos, o balanço de massas; ferramentas que permitiram a consolidação de estratégias planejadas da PML e a quanti-

ficação dos benefícios econômicos esperados para melhorar o desempenho ambiental da empresa de curtimento. **Resultados.** Este estudo evidenceu que a través ações da PML foi possível poupar um 52 % no consumo de água, reduzir o 75 % de resíduos sólidos para dispor em aterros sanitários, 73 % de insumos químicos requeridos para o curtimento; além da transformação e automatização do sistema produtivo permitira recuperar aproximadamente $932.766 por cada processo produtivo de 1.000 kg de pele crua. **Conclusões.** As estratégias da PML consolidadas, permitem transformar os sistemas artesanais de produção à sistemas automatizados mais concorrentes e produtivos em coherência com os objetivos de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: desenvolvimento sustentável, curtume, tecnologia limpa, produção sustentável, indústria do couro.

Introducción

La industria de la curtiembre se encuentra intrínsecamente relacionada con dos sectores económicos importantes en el país: uno referente al sacrificio animal en la provisión de materias primas (pieles) y otro en el aprovechamiento de pieles para marroquinería y calzado, este último es el de principal importancia para el consumidor como producto final (Barrientos, Tobon & Gutierrez, 2007).

La actividad industrial dedicada al curtido se ha establecido en su mayoría en el departamento de Cundinamarca (Martínez & Romero, 2017), bordeando la cuenca alta del río Bogotá. Esta actividad, al igual que la industria metalmecánica y la minería de oro, en sus procesos de producción usan distintos tipos de sustancias, tales como el cromo, que al oxidarse con la materia orgánica pasan a un estado hexavalente, el cual persiste en el efluente residual dado que no existen procesos de tratamiento eficientes en los sistemas de depuración de aguas residuales (Hongrui et al., 2017) transformarlos en el ámbito industrial de este sector económico.

Al norte de Cundinamarca, las curtiembres son los principales responsables de la degradación del río Bogotá, debido a que la actividad pasó de ser artesanal a ser una industrial de alto impacto ambiental (SIRAC, 2014), dado que allí se concentran más del 81 % de las industrias del país (Escobar, Ubaque & Bohórquez, 2012).

Es por ello que se hace necesaria la implementación de políticas, programas, proyectos y estrategias que generen cambios de los actuales patrones de producción y consumo, teniendo en cuenta que existen instrumentos para apoyar dichas iniciativas, como lo ratifica la Conferencia de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible –Río + 20, el Plan de Implementación de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, el Convenio Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático –CMNUCC, y entidades como el Centro Nacional de Producción más Limpia, entidad asesora en la aplicación de PML como estrategia ambiental preventiva e integrada a los procesos productivos, con el fin de reducir los riesgos a los seres humanos y al medio ambiente.

En mérito de lo expuesto, el objetivo de esta investigación se centró en analizar el sistema actual de producción en una curtiembre del norte de Cundinamarca; a partir de dicho

análisis se consolidaron las estrategias de PML que le permitan a las pequeñas y medianas empresas dedicadas a dicha actividad económica, considerar la transformación y mejoramiento del sistema actual de producción a sistemas que den respuesta a principios de sostenibilidad proponiendo estrategias en los cambios de patrones de producción y consumo, de modo que se puedan implementar de manera gradual e ir cambiando los procedimientos y operaciones del proceso de curtido en cualquier industria donde se implementen las estrategias planteadas en el presente estudio.

Materiales y Métodos

El estudio de caso se llevó a cabo en una empresa ubicada sobre la cuenca alta del río Bogotá en municipio de Villapinzón, Cundinamarca, dedicada a la actividad económica del curtido, pero por razones de confidencialidad en el presente documento se mantendrá en anonimato y nos referiremos en adelante como Empresa de Curtido.

El estudio considera la investigación cualitativa y cuantitativa, mediante verificación de datos en campo de los procesos productivos, el desarrollo del diagrama de procesos, balance de masas, estrategias de PML y cuantificación de los beneficios económicos, que permiten mejorar el desempeño ambiental de la empresa de curtido.

Para determinar la operatividad del sistema de curtido, se analizó información suministrada por el representante legal de la empresa, previo a la realización de varias visitas de campo, con el fin de identificar las áreas, actividades, infraestructura, equipos, insumos y el recurso humano que hace parte de la actividad económica del curtido. Lo anterior permitió generar un diagrama de flujo (ver figura 1. a partir de Jordán & Gómez, 2016).

En contraste con lo anterior, para el desarrollo del balance de masas de la empresa de curtido, se consideró la metodología sugerida por (Silva, 2011), la cual consiste en calcular los consumos y productos por cada actividad del proceso productivo, para la evaluación del balance de masas se tuvieron en cuenta los criterios aplicados por Tipiani (s. f.); Méndez, Vidal, Karl & Márquez (2007), quienes establecen que el consumo total de agua depende de la tecnología empleada por cada empresa, para los demás criterios y flujos másicos se empleó el modelo de balance de masa del proceso de fabricación del cuero, propuesto por Cárdenas (2012), de donde se obtuvieron dos escenarios.

El primer escenario se refiere al estado inicial o en el que se encontró la empresa en el sistema productivo de curtido, donde se listó e identificaron los principales materiales e insumos químicos requeridos, las cantidades de agua demandada y los residuos sólidos y líquidos generados en cada una de las actividades de producción, además de la cuantificación económica de los activos y pasivos. Sobre este aspecto, es importante resaltar que el curtido se hace, al menos, una vez al mes y que sustancialmente varía la producción conforme a la demanda.

Para el segundo escenario se tomó como base el diagrama de flujo diseñado, en el cual se identificaron las actividades propias de la empresa de curtido, a partir de allí se calcularon los flujos de masa para piel, insumos químicos y agua, cuantificando las entradas, salidas y transformaciones de los flujos a lo largo de la línea de producción.

Con base en lo anterior, y a partir de las metodologías diseñadas por el Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles – CPTS (2015), el CEGESTI (2011), los programas de PML propuestos por la Universidad Nacional -UNAL y la Corporación Ambiental Regional CAR, 2007), los programas de PML en curtiembres definidos por la Secretaría Distrital de Ambiente (2010), la *Guía para la gestión y manejo integral de residuos de la industria de curtiembres y tenerías*, la Secretaría Distrital de Ambiente (2016) junto con los planteamientos de Giannetti, Bonilla & Almeida, (2012), y los enfoques para la PML aplicando el método SASI a las microindustrias en Villapinzón desarrollado por Sanz, Siebel, Ahlers & Gupta (2016), se consolidaron cuatro estrategias de producción más limpia que corresponden a *i.* Prácticas operativas, *ii.* Acondicionamiento de las pieles, *iii.* Mejoras etapa de ribera *iv.* y Mejoras en la etapa de piquelado, curtido y recurtido; las cuales facilitan la transformación de los patrones de producción en la curtiembre estudiada.

Finalmente, para la cuantificación de los beneficios económicos que pueden lograrse con la transformación del sistema actual de producción se desarrolló una matriz de doble entrada (cantidades y precios), para identificar los activos económicos provenientes de la implementación de estrategias de PML (ver tabla 3).

Resultados

De la verificación en campo de dicha empresa de curtido, el estudio permitió construir la figura 1. Diagrama de proceso de la empresa de curtido.

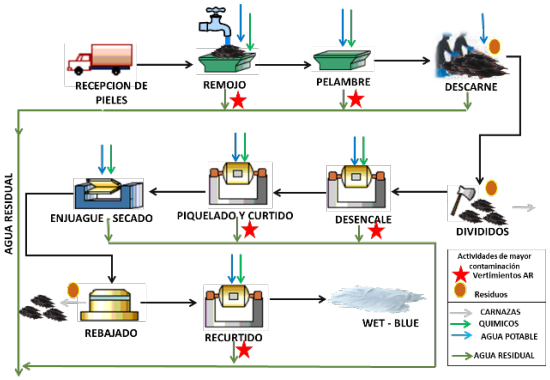


Figura 1. Diagrama de procesos de la empresa de Curtido

La *Figura 1* permite identificar las actividades de alto impacto durante los procesos de producción en la empresa estudiada, siendo una herramienta de identificación y localización de áreas que la empresa no tenía claramente definidas, de modo que el diagrama facilitó, a partir de los recorridos y conversaciones sostenidas con el propietario y los trabajadores, identificar procesos de mayor contaminación, especialmente en cuanto a vertimientos (señalados con estrellas) y los residuos sólidos (círculos), los cuales son considerados como puntos críticos a controlar según su presencia y manejo durante las actividades de producción, de modo que los colores de las convenciones (estrella y círculo) fueron previstas por el código de semáforo: el rojo significa punto crítico relevante, el amarillo punto crítico tolerante y verde, cuando el punto se está manejando de manera adecuada.

Luego de obtener el diagrama de flujo e identificar los procesos de mayor relevancia ambiental en la empresa de curtido, se procedió a desarrollar el balance de masa previsto en el estudio.

El **escenario 1,** corresponde al estado inicial en el que se encontró la empresa de curtido,

identificando consumos de materiales e insumos y los mecanismos de producción de la misma. Es preciso destacar que la tecnología que se emplea a lo largo de todos los procesos es de forma empírica y artesanal (Sánchez y Ramírez, 2016). Sobre desempeño gerencial de la empresa, se notó que la mano de obra es personal familiar. Los registros de insumos (químicos y otros) versus cantidad producida omiten cálculos que conllevarían a optimizar la eficiencia del proceso del curtido, ocasionado fuertes impactos ambientales en relación con el aspecto económico.

Desde la gerencia es preciso tomar medidas de seguimiento y control en los diferentes procesos, desde contar con un organigrama organizacional, que delimite áreas, funciones, instalar sistemas de medición y cuantificación en cada una de las actividades, entre otros aspectos, para que los operarios hagan un mejor uso de los materiales e insumos y de este modo evitar las elevadas cargas contaminantes, que pueden afectar la salud de los trabajadores y la salud pública al desarrollar la actividad (Castillo, G., et al. 2004).

En cuanto al aspecto ambiental, como se mencionó anteriormente, al no existir un diagrama de procesos de la empresa y carecer de sistemas de medición del consumo de agua y no contar dosificadores de insumos químicos en cada actividad de la línea de producción, fue imposible determinar en detalle los flujos de materia por cada proceso o actividad. Obteniendo en campo información que se consolida en la tabla 1. Características iniciales del sistema de curtido para 1.000 kg de piel, encontrando aspectos relevantes en la curtiembre estudiada en su estado inicial de producción.

Tabla 1. Características iniciales del sistema de curtido para 1.000 kg de piel.

Ítems verificados	Cant.	Unidad de medida
Pieles recibidas	40,0	pieles
Peso promedio de pieles (entrada)	25,0	kg / piel
Peso total lote de piel (entrada)	1.000,0	kg/ lote
Agua promedio consumida por cuero	350,0	L
Agua promedio consumida en el proceso productivo del curtido	14.000,0	L
Cantidades de insumos químicos requeridos en el proceso productivo del curtido	670,0	kg
Peso promedio del cuero de salida	8,0	kg / cuero
Peso total lote cuero	320,0	kg/ lote
Peso total de los residuos generados	680,0	kg/ lote
Peso total de los residuos aprovechados	128,0	kg/ lote
Peso total de los residuos enviados al relleno	552,0	kg/ lote
Precio de compra de piel	50.000–80.000	$ / piel
Venta de Piel por unidad	150.000,0	$ / piel

Fuente: los autores a partir del sistema inicial de producción en la curtiembre

*Piel, estado en el que llega la materia prima a la empresa de curtido sin tratamiento alguno.

**Cuero, es la transformación química, que se entrega como producto final.

De acuerdo con la Tabla 1, de las 40 pieles que ingresan sin tratamiento, se determinó la masa de las mismas mediante una báscula romana, arrojando un peso unitario aproximado de 25 kg que en efecto de lote son en promedio 1.000 kg de pieles. En coherencia con el diagrama de flujo (figura 1), se deter-

minaron los consumos de agua a lo largo del proceso del curtido obteniendo un promedio de 14.000 L, es decir 350,0 L/piel, cuya agua se dispone a la fuente hídrica (cuenca alta del río Bogotá) sin tratamiento alguno, pero con una importante carga contaminante de insumos químico (vale la pena referir que el agua retenida por el cuero se evapora en la actividad del secado).

Igualmente, se determinó que el proceso productivo demanda aproximadamente 670 kg de insumos químicos entre ellos ácidos orgánicos e inorgánicos, sales de amonio, bisulfito de sodio, sales de cromo y enzimas (Monroy, 2018) los cuales cuestan aproximadamente $951.000 por cada proceso. El producto final (cuero) pasó de tener una masa 25 kg/piel a 8 kg /piel tratada, es decir el total de cuero se redujo en un 68 % de su masa inicial, así, 680 kg corresponden al material sobrante del cuero (producto final), de los cuales 128 kg son comercializados como subproducto, mientras que los 552 kg de material sobrante son dispuestos en el relleno sanitario. En cuanto a los costos globales del mercado, se identificaron los precios promedio de compra de piel y venta del cuero curtido para la industria de la marroquinería.

Por otro lado, retomando el diagrama de procesos diseñado previamente, se propuso el **escenario 2**, balance de masas, para los tres flujos más importantes en el proceso del curtido: piel, agua e insumos químicos, los cuales se determinaron con la ecuación general de conservación de la materia (entrada–acumula = salida), tomando como base de cálculo una tonelada de piel (1.000 kg), cuantificando las entradas, acumulaciones y salidas del proceso en cada una de las actividades ver (Tabla 2), para un escenario prospectivo a fin de propender una PML en la industria de la curtiembre estudiada.

El balance de masas para piel arrojó que en el escenario 2 o prospectivo, la pérdida de masa en piel tratada es del 68 %, igual que en el escenario 1, en cuanto a la actividad del divido como punto crítico relevante 374,8 kg de generación de residuos, en tanto que se identificó, el punto crítico tolerante, el proceso de descarnado con una generación de 220 kg de residuos sólidos por cada 1.000 kg de piel procesada.

Tabla 2. Balance de masas sistema de producción optimizado.

	PIELES			INSUMOS QUÍMICOS			AGUA		
Operación	**Entrada (kg)**	**Desechos (kg)**	**Salida (kg)**	**Entrada (kg)**	**Acumula (kg)**	**Salida (kg)**	**Entrada (L)**	**Acumula (L)**	**Salida (L)**
Recepción	1000,0	10,0	990,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Remojo	990,0	0,0	990,0	14,4	3,6	10,8	1903,8	307,7	1596,2
Descarnado	990,0	220,0	770,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,2
Pelambre	770,0	46,7	723,3	24,9	6,2	18,6	1745,3	0,0	1437,6
Dividido	723,2	374,8	348,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	125,4
Desencale	348,5	0,0	348,5	4,0	1,0	3,0	789,2	0,0	789,2
Piquelado	348,4	0,0	348,5	28,1	7,0	21,1	789,2	0,0	789,2
Curtido	348,5	0,0	348,5	29,4	7,4	22,0	739,8	221,9	517,8
Escurrido	348,5	0,0	348,5	0,0	0,0	0,0	221,9	0,0	217,5

	PIELES			INSUMOS QUÍMICOS			AGUA		
Operación	**Entrada (kg)**	**Desechos (kg)**	**Salida (kg)**	**Entrada (kg)**	**Acumula (kg)**	**Salida (kg)**	**Entrada (L)**	**Acumula (L)**	**Salida (L)**
Rebajado	348,5	35,2	313,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Recurtido	313,3	0,0	313,3	31,0	7,7	23,2	276,9	0,0	**276,9**
Suavizado	313,3	0,0	313,3	49,2	12,3	36,9	276,9	0,0	276,9
Secado	313,3	0,0	313,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	177,5
SUMA		686,7			45,2	135,6		529,615	6213,5
TOTAL			1000,0	180,8		180,8	6743,1		6743,1

Fuente: elaborado por los autores basado en Cárdenas (2012).

En cuanto al balance de insumos químicos, para el escenario prospectivo, se determinó que se requiere de 180,8 kg de productos entre ácidos orgánicos e inorgánicos, sales de amonio, sales de cromo y anilinas (Monroy, 2018) para el proceso completo, de los cuales 45 kg son adheridos a la piel y 135,6 kg son residuos sólidos y líquidos disueltos en los vertimientos de agua de cada una de las actividades. Del mismo modo, se estableció como punto crítico relevante el alto consumo de productos químicos (rellenantes, acrílicos y anilinas), en la actividad del suavizado con un consumo del 27 % del total de insumos químicos, los puntos críticos tolerante en el consumo de insumos químicos son curtido y recurtido, actividades que demandan del 33 % de las sales de cromo y agentes recurtientes.

Para el último flujo másico correspondiente al balance de masas de agua, se determinó que el volumen requerido para producir 1.000,0 kg de piel, es de 6.743,0 L de agua potable, de los cuales 529,0 L de agua se absorben y posteriormente son eliminados mediante secado; los 6.213,0 L restantes son vertidos al río Bogotá sin contemplar algún tratamiento previo. La Tabla 2 también deja en evidencia los puntos críticos relevantes de los consumos y vertimientos generados por la actividad del remojo y desencale, los cuales significan aproximadamente un 54 % del consumo total. Dados los altos consumos de insumos químicos altamente complejos en la actividad de curtido y recurtido, se encontraron como puntos críticos relevantes los vertimientos producto de estas actividades, puesto que las sales de cromo al entrar en contacto con materia orgánica, aumenta la toxicidad, que afecta la biota acuática y terrestre en el recorrido de sus componentes.

La construcción del balance de masas permitió identificar los puntos críticos en los cuales se deben enfocar las estrategias de PML para la empresa de curtido, de este modo y tomando como referente el mismo balance, se propone el escenario 3, implementación de estrategias de PML, para ello se consolidaron las siguientes estrategias: estrategia en prácticas operativas, acondicionamiento de pieles, mejoras etapa de ribera y mejoras en la etapa de piquelado, curtido y recurtido.

Las estrategias recomendadas para el desarrollo de las **prácticas operativas**, y disminuir los daños ambientales generados durante el proceso y las externalidades de la actividad económica, se basan principalmente en instalar medidores de agua para identificar consumos y ejercer control de la demanda de agua, reemplazar las mangueras existen-

tes por tuberías conectadas directamente al componente del sistema evitando pérdidas de agua en la producción, adecuar los sistemas de recolección de aguas residuales, con el fin de evitar riesgos ambientales y sanitarios y accidentes laborales en el área de trabajo, incorporando un programa de seguridad en el trabajo con enfoque a la seguridad y los riesgos químicos.

Con el fin de disminuir los consumos de agua en el remojo de piel y **acondicionamientos previos a ribera**, se proponen las siguientes alternativas: la primera, consiste en establecer las condiciones de calidad en la compra de la piel teniendo en cuenta un incremento en el costo de compra; la segunda opción, realizar el lavado con agua a alta presión disminuyendo el volumen requerido para la eliminación de residuos de estiércol, sangre y residuos orgánicos; y tercera alternativa, llevar las pieles al tambor, donde por rotación se pueda garantizar la limpieza mecánica, dicho procedimiento permite recolectar los lodos y separarlos de las aguas residuales que posteriormente se pueden recircular en la misma operación de lavado, de este modo se minimiza la presencia de vectores plaga y roedores en el sistema productivo.

La **etapa de ribera** (recepción, remojo, descarnado, pelambre, dividido, desencale y piquelado), se puede mejorar mediante el ahorro de agua al unir las actividades de limpieza y remojo, se recomienda una sustitución de químicos y bactericidas por sustancias menos contaminantes; la implementación de equipos dosificadores de insumos químicos; la construcción de un sistema para filtrar los sólidos residuales de pelambre antes de que las aguas sean enviadas al tanque de igualación o recirculadas; finalmente el aprovechamiento de subproductos generados en el descarne y dividido.

Las mejoras en la etapa de piquelado, curtido y recurtido que se pueden implementar para mejorar la eficiencia de las actividades, consiste en evaluar la viabilidad de emplear otros ácidos, sales curtientes con menor contenido de cromo, aluminio y circonio, al igual que mejorar las técnicas de remoción de cromo de los efluentes o en su defecto hacer la recuperación de cromo, mediante precipitación química o bioadsorción. Del mismo modo, se debe implementar un programa de gestión integral de residuos sólidos y un sistema de tratamiento de aguas residuales que depuren y disminuyan las cargas contaminantes de los efluentes, a fin de dar cumplimiento a la normatividad vigente y disminuir el deterioro del cuerpo río Bogotá.

Como resultado de lo anterior, en términos económicos, se cuantifica la variación de proyectar la PML a partir de las estrategias planteadas con respecto a los resultados del sistema inicial (Tabla 3), a partir de ello fue posible cuantificar los activos económicos que puede percibir la empresa por cada proceso productivos, respecto a la base de cálculo.

Tabla N° 3: Escenarios Económico a partir de las estrategias de PML

Ítem	Inicial	PML	Diferencia /Proceso	Costo unitario	Valores Económicos ($)
Agua	14.000,0 L	6.743,0 L	7,26 m^3	$ 1.114,0	$ 8.084,3
Residuos aprovechados	128,0 Kg	549,0 Kg	421,0 Kg	$ 550,0	$ 231.715,0
Residuos a relleno	552,0 Kg	137,0 Kg	415,0 Kg	$ 80,0	$ 33.166,4

Ítem	Inicial	PML	Diferencia /Proceso	Costo unitario	Valores Económicos ($)
Peso de salida/piel	8,0 Kg	7,8,0 Kg	-8,0 Kg	$ 4.500,0	-$ 36.000,0
Insumos químicos requeridos	670,0 Kg	180,0 Kg	490,0 Kg	$ 1.420,0	$ 695.800,0
				Total	$ 932.766

Fuente: elaborado por los autores basado en Cárdenas (2012).

Las estrategias de PML, propuesta para el sistema productivo de la empresa de curtido, permitiría al empresario ahorrar por cada proceso productivo al menos el 52 % del volumen de agua, ahorro que corresponde a 7.257,0 L los cuales significan un ahorro económico cercano a $8.084,3 pesos. Del mismo modo, se pueden reducir en un 75 % los residuos dispuestos en relleno sanitario pasando de disponer 554,0 kg a 137,0 kg con la transformación del sistema, este ítem le significa ahorros de hasta $33.166,4. Igualmente la implementación de estrategias de PML, permite ahorrar cerca de $695.000 en la compra de insumos químicos, dado que la disminución en cantidades que se pueden lograr es de hasta 490,0 kg de insumos químicos. En cuanto al peso del producto final en el escenario prospectivo se pierde 0,2 kg por cuero procesado, lo que equivale a pasivos monetarios que oscilan en los $36.000 pesos por la venta de 40 pieles.

Es así que, la transformación o tecnificación del proceso con las estrategias de PML en cada una de las

actividades le permitirá generar nuevos ingresos cercanos a $231.715 por el concepto de comercialización de las carnazas y demás subproductos, de este modo el rubro de ahorro y activos monetarios que se pueden lograr con dichas estrategias son de aproximadamente $932.766 por cada proceso productivo.

Para terminar, es importante considerar la tecnificación y transformación de las actividades que al interior de las pequeñas curtiembres se desarrollan, dados los beneficios económicos que se pueden alcanzar con la optimización de procesos. Siendo, el balance de masas una herramienta clave en el diseño de escenarios prospectivos en líneas de procesos industriales.

Discusión

De acuerdo con Martínez & Romero (2017), en el norte de Cundinamarca se encuentran más de 190 empresas dedicadas al sector económico del curtido de cuero, convirtiéndose dicha actividad en uno de los ejes del desarrollo local de importancia empresarial para el país y en especialmente para el municipio de Villapinzón, siendo el sector que más provee empleo en la región a familiares y personas de la comunidad.

Pese a la relevancia de la actividad a lo largo de los años, se observan efectos adversos sobre los recursos naturales, además de los sanitarios sobre el cauce del río en la cuenca media y baja del río Bogotá. Los incentivos económicos de la actividad de curtido, son el resultado de la deficiencia en la gobernanza que aqueja el capital natural del territorio colombiano.

El deseo inherente de producir desconociendo las externalidades (Singh, Mishra,

& Akolkar, 2016) y las consecuencias de la acción particular sobre la sociedad, se convierte en fallos de mercado (Riera, 2005), que las políticas públicas omiten en buena medida por la incapacidad de desarrollar acciones de educación (Elinor Ostrom, 2000), transmisión de información, seguimiento y control tanto en los procesos productivos de las curtiembres como en la disposición de materiales sólidos y líquidos que en algunos casos se pueden considerar residuos aprovechables a nivel de PML.

Tal reacción tardía de los entes estatales, redunda en efectos críticos como los de la recuperación del río Bogotá, donde puede ser más costoso recuperar el río que haber desarrollado procesos de mitigación y control en la operación de las curtiembres, a pesar de que el Consejo de Estado mediante la sentencia del río Bogotá (2014) ordenara a la Corporación Autónoma de Cundinamarca -CAR, cofinanciar todas las obras de infraestructura que se requirieran para la implementación de procesos de producción más limpia en las curtiembres de la cuenca alta.

Dentro de las dificultades para desarrollar acciones efectivas de PML, están las relacionadas con las deficientes acciones de acompañamiento, inspección vigilancia y control -IVC por parte de la autoridad ambiental (CAR), para brindar la asistencia técnica requerida en la transformación y tecnificación de procesos de curtido (Cortés & Ardila, 2010), con el objeto de fortalecer la economía regional, y evitar las sanciones en el marco de la recuperación ambiental del río Bogotá.

Para lograr un sistema productivo con estrategias de PML, es necesario que la industria se adapte de manera gradual a las nuevas tecnologías, procedimientos y operaciones del proceso de curtido, es importante hacer uso del ciclo *Deming* (Planear, hacer, verificar y actuar) (Patón, Lorente, Fernández, Lasquetty, Hernández, Escot, Quero & Navarro, 2013), el cual permite minimizar costos de insumos y materiales; de este modo las estrategias de PML buscan cambiar el modelo lineal (hacer, usar y desechar) (Fundación Ellen Macartur, 2014), el cual se caracteriza por el descarte del producto al final de la vida útil, buscando reducir la generación de residuos sólidos Michelini, Moraes, Cunha, Costa & Ometto, (2017).

La construcción del diagrama de procesos fue clave para la elaboración el diagnóstico del sistema de producción artesanal, que resultó esencial para identificar deficiencias a lo largo de la cadena de valor de curtido del cuero, permitiendo recolectar información para elaborar el diagnóstico y proponer el diseño de mejora continua (Pérez & Soto, 2005).

El balance de masas es una de las herramientas que permite alcanzar beneficios de tecnificación de procedimientos (Martínez, Cansino, López, & Garza, 2015), cuantificando los flujos másicos de una línea de producción y considerando una herramienta de gran ayuda para visualizar en dónde se pueden introducir medidas para minimizar las emisiones y reducir el consumo de insumos, reduciendo costos de operación del sistema productivo (Biagio, Feni, Moraes, Almeida & Ulgiati, 2015).

Con la identificación de los puntos críticos, en los escenarios determinados y con base en las estrategias de PML propuestas por el Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles – CPTS (2015); CEGESTI (2011); CAR (2007); Secretaría Distrital de Ambiente (2010); Secretaría Distrital de Ambiente (2013); Giannetti, Bonilla & Almeida, (2012)

y Sanz, Siebel, Ahlers & Gupta (2016), fue posible consolidar las mejores alternativas para microempresas de curtido, obteniendo el aumento en el aprovechamiento de los subproductos generados, la sustitución de algunos insumos químicos y por tanto la reducción en los volúmenes de agua vertida.

Una vez los empresarios del sector curtiembres consideren la tecnificación y transformación de los procesos, las estrategias de PML les permitirán mejorar la competitividad, incrementar los niveles de producción, mejorar la rentabilidad (Torres, Vera & Manzano, 2017), aumentar el desempeño ambiental y disminuir los costos de producción (Loayza & Silva, 2013).

Conclusiones

Las estrategias de PML y la transformación del sistema inicial de producción, permiten reducir el volumen de agua necesario para el proceso productivo, como consecuencia de ello se disminuirán los efluentes tóxicos vertidos directamente al río Bogotá.

El estudio permitió proponer una nueva metodología para el diagnóstico, establecimiento de escenarios iniciales -prospectivos y la consolidación de estrategias de PML que permitan a los empresarios analizar la situación, para considerar la transformación del sistema de producción.

A partir del desarrollo de este estudio, los autores consideran que este primer acercamiento, puede permitir mayores mejoras a nivel de PML y Producción y Consumo Sostenible -PyCS que contribuyan a disminuir los impactos ambientales y sociales generados por el crecimiento industrial del país.

Finalmente, la investigación permite ampliar el conocimiento acerca de la importancia de implementar acciones de PML, presentando un estudio de caso real que puede ser implementado por otras empresas aledañas en similar condición de tecnología artesanal.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales al empresario de la industria estudiada, por mostrar el interés de mejorar los procesos productivos y permitir a los investigadores estudiar su sistema industrial. A la profesora Giovanna por sus aportes y enseñanzas, a mi hermano César Arbey por su colaboración en la recolección, análisis y procesamiento de la información, de igual manera a mis amigos Diego Armando Bueno y Jhon Fredy González quienes aportaron en la construcción de este documento, a mi familia por su apoyo brindado a lo largo de mis posgrados. Especial agradecimiento a las Ph. D. Monika Echavarría y Dora Luz Gómez por sus aportes, a mis compañeros y a amigos. Finalmente, al equipo editor de la revista Producción + Limpia por su colaboración en la divulgación de la investigación que promueve prácticas de desarrollo sostenible.

Referencias

Barrientos, Jorge., Tobón, D. & Gutiérrez, E. (2007). Sobre la eficiencia de la industria del cuero en los sectores de calzado y marroquinería en Colombia. Centro de Investigaciones y Consultorías de la Universidad de Antioquia

Biagio, F., Feni, A., Moraes, L., Almeida, M. & Ulgiati, S. (2015). Ulgiati, Multicri-

teria cost–benefit assessment of tannery production: The need for breakthrough process alternatives beyond conventional technology optimization. *Environmental Impact Assessment Review, 54*, 22-38, ISSN 0195-9255.

Cárdenas Cerón, J. (2012). Diseño de una metodología para la selección de esquemas de mejoramientos alcanzados con PML. Caso: cadena del cuero del Valle del Cauca. Universidad Del Valle -Facultad De Ingeniería, Santiago de Cali. Recuperado de http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8110/1/CB-0461302.pdf

Castillo, G., Díaz, M., Pica, Y., Ronco, A., Sobrero, C. & Bulus, G. (2004). Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas: estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (pp. 15-19).

CEGESTI. (2011). Siete pasos para implementar la producción más limpia en su organización. Recuperado de http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_138_230211_es.pdf

Centro de promoción de tecnologías sostenibles. CPTS. (2003). La guía técnica de producción más limpia para curtiembres.

Corporación Ambiental Regional–CAR, (2014). Caso Emblemático–OPAG–Contaminación del Río Bogotá por curtiembres en Choconta. Observatorio ambiental.

Cortés, L.F. & Ardila Téllez, L. (2010). Diagnóstico a las pymes productoras de cuero bajo el modelo SCOR con el fin de determinar el estado actual. estudio de caso. Universidad de la Salle, Bogotá.

Elinor Ostrom. (2000). El gobierno de los bienes comunes. La evolución de las instituciones de acción colectiva.

Escobar, A., Ubaque, C., & Bohórquez, M. (2012). Identificación y evaluación de la contaminación del agua por curtiembres en el municipio de Chocontá.

Fundation Ellen MacArthur (2014), Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada. (pp. 8-12).

Giannetti, B., Bonilla, S. & Almeida, C. (2012). Cleaner production initiatives and challenges for a sustainable world. *Journal of Cleaner Production, 47*, 1-10, bISSN 0959-6526

Jordán, E. & Gómez Coello, R. (2016). Plan de mejora de la productividad en la producción de cuero en la empresa tenería San José cía. Ltda. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Recuperado de http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23470

Loayza, J & Silva Meza, V. (2014). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales.

Martínez Buitrago, S. & Romero Coca, J. A. (2017). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad De Ciencias Económicas, 26*(1), 113-124

Méndez Pampín, R., Vidal Sáez, G., Karl Lorber, E. & Márquez Romegialli, F. (2007) Producción limpia en la industria de curtiembre. Universidad De Santiago De Compostela. Recuperado de http://www.usc.es/libros/index.php/spic/catalog/book/431

Michelini, G., Moraes, N., Cunha, N., Costa, J. & Ometto, A. (2017). From Linear to Circular Economy: PSS Conducting the Transition, Procedia. *CIRP, 64*, 2-6, ISSN 2212-8271.

Monroy Avila, Edinson F. (2018). Remoción de cromo en aguas residuales mediante bioadsorbentes (naranja y salvado de trigo) en la curtiembre Rodríguez Melo municipio de Villapinzón. Universidad Manuela Beltrán, Tesis de Grado Maestría. Bogotá.

ONU. (2015). La ONU llama a transformar patrones de consumo insostenibles para hacer frente al cambio climático.

Patón Villar, F., Lorente Granados, G., Fernández-Lasquetty Blanc, B., Hernández Martínez, A., Escot Higueras, S., Quero Palomino, M., & Navarro González, I. (2013). Plan de mejora continua en prevención-tratamiento de úlceras por presión según el ciclo de Deming. Gerokomos, 24(3), 125-131.

Paul, A., Covington, E. & Philips. (2013). Bangladeshi leather industry: An overview of recent sustainable developments. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists, 97*(1), 25-32.

Pérez Ortega, G., & Soto Camargo, A. (2012). Propuesta metodológica para el mejoramiento de procesos utilizando el enfoque Harrington y la Norma ISO 9004. Revista Universidad EAFIT, 41(139), 46-56.

PNUMA. (2003). Hacia patrones sostenibles de producción y consumo en Latinoamérica y el Caribe -Aplicación del Capítulo III del Plan de Acción de Johannesburgo.

Riera, P. (2005). Manual de economía ambiental y de los recursos naturales. Medellín: Editorial Paraninfo.

Sánchez Sánchez, L. & Ramírez Rojas, J. (2016). Propuesta del Parque Ecoeficiente Industrial del Cuero: como elemento urbano que contribuye a la disminución de vertimientos causados por los procesos industriales de las curtiembres en los municipios de Villapinzón y Chocontá, Cundinamarca. Universidad Piloto De Colombia -Facultad de Ciencias Ambientales, Bogotá D.C.

Sanz, M., Siebel, M., Ahlers, R. & Gupta, J. (2016). New approaches to cleaner production: Applying the SASI method to micro-tanneries in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 963-971.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). Guía para la gestión y manejo Integral de residuos industria de curtiembres y tenerías (pp. 12-55).

Secretaría Distrital de Ambiente. (2016). Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá. Enfoque en vertimientos y residuos.

Silva Villanueva, J.L. (2011). Rol de las ecotecnologías limpias y de tratamiento, en control de la contaminación generada por las curtiembres de Trujillo –Perú. Universidad Nacional de Trujillo. Perú.

Recuperado de http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/8191

Singh, R., Mishra, P. & Akolkar, B. (2016). Management of tannery wastewater in kanpur–A review. *Indian Journal of Environmental Protection, 36*(8), 686-692.

SIRAC. (2014). Proyecto gestión ambiental de la industria de curtiembres en Colombia. Manual ambiental sectorial. Recuperado de http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd30/sirac-cuero.pdf

Tipiani Huaman, J. (s.f). Balance de materia y energía. Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Ica Perú. Recuperado de https://www.academia.edu/9268782/Balance_de_Materia_y_Energ%C3%ADa

UNAL & CAR, (2007). Guía técnica para la capacitación de empresarios y trabajadores de la industria curtidora–Capacitación y acompañamiento técnico en producción más limpia al subsector curtiembres en Villapinzón y Chocontá (Cundinamarca).