

## **Análisis de los beneficios ambientales de la recuperación de las aguas residuales en el proceso de lavado de arenas**

Analysis of the environmental benefits of wastewater recovery in the sand washing process

Alejandro Valdés-López <sup>1\*</sup> [orcid.org/0000-0002-8503-3025](https://orcid.org/0000-0002-8503-3025)

Eduardo Julio López-Bastida <sup>1</sup> [orcid.org/0000-0003-1305-852X](https://orcid.org/0000-0003-1305-852X)

Olaida Torres-Calzadilla <sup>2</sup> [orcid.org/0000-0002-2728-5179](https://orcid.org/0000-0002-2728-5179)

Enier Rodríguez-Pérez <sup>3</sup> [orcid.org/0000-0002-5623-4557](https://orcid.org/0000-0002-5623-4557)

Luis Javier Aparicio-Ortiz <sup>3</sup> [orcid.org/0000-0001-9795-676X](https://orcid.org/0000-0001-9795-676X)

<sup>1</sup>Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cuba

<sup>2</sup> Empresa de Materiales de la Construcción Cienfuegos. Cuba

<sup>3</sup> Empresa Provincial de Transporte Cienfuegos. Cuba

\* Autor para correspondencia. Correo: [avlopez@ucf.edu.cu](mailto:avlopez@ucf.edu.cu)

### **RESUMEN**

La restringida disponibilidad del agua y los cada vez más estrictos estándares para el vertimiento de las aguas residuales ha fomentado una conciencia de la importancia de una gestión integral de los recursos hídricos en los sistemas productivos. Por ello en la presente investigación se analizan los potenciales beneficios medioambientales de la recuperación del agua residual que se vierte en el proceso de lavado de arena tomando como caso de estudio la planta “El Canal” ubicada en el municipio de Cumanayagua de la provincia Cienfuegos. Para su elaboración se llevó a cabo una prueba de operación controlada que sirvió como base para un análisis de flujo de materiales y un análisis de ciclo de vida. Es notable que con la implementación de las tecnologías de clasificación centrífuga (plantas de hidrociclado) y recuperación de agua (sedimentación-filtración) se

logra disminuir el consumo de agua de 2,205 3 a 0,108 8 m<sup>3</sup>/t de arena producida y el de electricidad de 0,996 6 a 0,385 9 kWh/t de arena producida condicionando que se mejoren todas las categorías de impacto según el método ReciPe Midpoint. Luego, se propone valorar una posible inversión para la modernización del sistema objeto de estudio alertando que como esta se fundamenta en un beneficio ambiental deben integrarse a los tradicionales criterios económicos otros de diversa naturaleza.

**Palabras clave:** recuperación de agua; análisis de flujo de materiales; análisis de ciclo de vida; impacto ambiental.

## **ABSTRACT**

The restricted availability of water and the increasingly stringent standards for the discharge of wastewater has fostered an awareness of the importance of a comprehensive management of water resources in productive systems. Therefore, in this research the potential environmental benefits of the recovery of wastewater that is poured in the sand washing process are analyzed taking as a case study the “El Canal” plant, located in the municipality of Cumanayagua of the Cienfuegos province. For its preparation, a controlled operation test was carried out that served as the basis for a material flow analysis and a life cycle analysis. It is remarkable that with the implementation of the technologies of centrifugal classification (hydrocyclones) and water recovery (sedimentation-filtration) the water consumption can be reduced from 2,205 3 to 0,108 8 m<sup>3</sup>/t of sand produced and the electricity consumption from 0,996 6 to 0,385 9 kWh/t of sand produced conditioning an improvement in all the categories of impact according to ReciPe Midpoint method. Then, it is suggested to consider a possible investment in order to modernize the system highlighting that due to environmental benefits support the proposal criteria of different nature, beyond the traditional economical ones, should be analyzed.

**Keywords:** water recovery; material flow analysis; life cycle assessment; environmental impact.

## Introducción

En nuestros días la mayor parte de la economía se ha movido desde la agricultura hacia el sector industrial por lo que gran parte de los impactos ambientales debido a causas antropogénicas están dados por estas actividades. Estos se atribuyen a diversos factores entre los más importantes el consumo significativo de recursos naturales para la producción y a lo largo de la cadena de suministro, los efectos ecológicos de los productos y la contaminación por las descargas de residuos hacia el medioambiente. <sup>(1)</sup> Este escenario ha llegado a comprometer la disponibilidad de recursos para las generaciones futuras lo que evidencia la necesidad de adoptar estrategias de producción más amigables con el medio ambiente.

La percepción de estos problemas ha impulsado a muchos gobiernos a imponer estrictas normas ambientales lo que ha presionado al sector empresarial que por mucho tiempo mantuvo el tradicional sistema de producción lineal. Ante esta disyuntiva surgen los conceptos de producciones más limpias, prevención de la contaminación, descarga cero, entre otros, como un intento de eliminar el antagonismo hombre-naturaleza y donde las necesidades humanas sean satisfechas con el menor posible consumo de materiales e impacto ambiental. Sin embargo, aunque una gestión integral de los recursos es un avance significativo los patrones de consumo contemporáneos resultan insostenibles por lo que es necesario también sensibilizar a la sociedad sobre el ahorro y la racionalidad.

Considerando los recursos el agua tiene especial relevancia pues además de su importancia para la vida es inherentemente escasa. Considérese que aproximadamente el 97 % del agua en el planeta es salada y la distribución de la fracción dulce es bastante dispar entre regiones. Luego, incluso disponiendo de agua, lograr una calidad apropiada para las diferentes aplicaciones industriales o para su consumo requiere un gasto energético considerable. Esta situación, ligado a que muchas industrias no disponen de adecuados sistemas de tratamiento, ha provocado además que en varias regiones del planeta se experimenten problemas de sequía y de contaminación de los cuerpos acuíferos, los que han perdido su habilidad para sostener la vida acuática o no son suficientes para soportar la carga de las poblaciones locales. Cuba no está exento de estos problemas, y acentuado por sus condiciones geográficas una gestión integral de los recursos hídricos es una necesidad imperante.

Según Díaz, <sup>(2)</sup> el consumo excesivo de agua en el sector productivo de bienes y servicios es uno de los grandes problemas en el contexto del análisis de la sostenibilidad de los recursos hídricos en Cuba pues a diferencia de la cultura energética no existe una cultura hídrica por parte de los empresarios cubanos. La producción agropecuaria, alimenticia y azucarera han sido históricamente los mayores consumidores de recursos hídricos pero impulsado por el crecimiento urbanístico la industria de materiales de la construcción ha empezado a destacar por sus altos índices. En este sector, en el país, las plantas de lavado de arena están hoy entre las más significativas pues la tecnología implementada además de atrasada ha sufrido décadas de explotación.

Aunque el consumo de agua en la explotación de áridos es muy variable es llamativo que en la tecnología convencional por vía húmeda con tornillo sinfín y sin recuperación de agua tiene regulado como índice de consumo  $3,3 \text{ m}^3$  de agua/ $\text{m}^3$  de arena, <sup>(3)</sup> sin embargo, con la implementación de tecnologías más eficientes como la clasificación centrífuga (plantas de hidrociclado) se pueden disminuir los índices de consumo considerablemente de acuerdo a lo expuesto por algunos autores. <sup>(4)</sup> Además, con la introducción de la tecnología de filtración se puede mejorar aún más este escenario. Por ello este trabajo tiene como objetivo analizar las potencialidades de recuperación del agua que se vierte en los residuales del proceso de lavado de arena, así como los beneficios ambientales a lo largo del ciclo de vida de llevar a cabo este proceso. Para ello se tomó como caso de estudio la planta de lavado de arena “El Canal” localizada en el municipio Cumanayagua, de la provincia de Cienfuegos.

## **Métodos utilizados y condiciones experimentales**

### **Descripción del caso de estudio**

La planta de beneficio de arena “El Canal” pertenece a la Empresa de Materiales de la Construcción Cienfuegos. La entidad se localiza a una distancia de 2,5 km al Norte de la ciudad de Cumanayagua por la carretera que enlaza Cumanayagua con el poblado de Potrerillo. La instalación limita por el Norte con terrenos pertenecientes a la Empresa Pecuaria “El Tablón”, por el Este con la carretera Cumanayagua-Potrerillo, al Sur con el canal Paso Bonito Cruces y al Oeste con los terrenos de la Empresa Pecuaria “El Tablón”. La planta fue montada entre los años 1982 a 1986 y comenzó su explotación en este último, realizándose de conjunto con el MINBAS y la Empresa Geólogo Minera Centro, determinándose como tiempo de vida útil del yacimiento de 35 a 38 años incluyendo las

reservas inundadas que representan un 7% y que no está previsto en el proyecto extraer por ser un volumen pequeño, además de cambiar el método de extracción diseñado y el equipamiento.

El proceso de beneficio de arena en la planta se divide en cuatro etapas principales: recepción de la arena natural, proceso de lavado y clasificación preliminar, proceso de relavado y clasificación final y etapa de almacenamiento y venta. En la etapa de alimentación la arena es depositada en la tolva de alimentación con una capacidad de 27 m<sup>3</sup> en cuya parte superior se encuentra una criba de barras fijas con abertura cuadrada de 200 mm; el material alimentado es elevado a través de las bandas transportadoras hasta la zaranda lavadora. El lavado y clasificación preliminar se realiza en la zaranda lavadora, donde el agua llega en forma de ducha a presión permitiendo el lavado y cernido de la arena a través del paño existente, donde inicialmente la fracción superior a 5 mm es separada y pasa a través de un transportador de banda o cinta transportadora como desperdicio enviándola hasta el área del patio de acopio, el material cernido con granulometría menor que 5 mm pasa por una canal mezclada con el agua al tornillo lavador.

En el relavado el agua conjuntamente con el material cernido que llega a través de la canal al tornillo clasificador lavador de espiral (tornillo sin fin) por medio del movimiento de rotación y avance se produce el lavado y separación granulométrica en medio hidráulico, obteniendo como clasificación final una granulometría de 5-0,15 mm. Las fracciones menores son decantadas con el agua residual que sale del tornillo y por una tubería existente en la parte baja salen al canal de salida y esta lo vierte en las lagunas de sedimentación, donde ocurre un proceso de decantación del sólido sedimentable y el agua se vierte por reboso al río (cuerpo receptor). En la etapa de almacenamiento y venta la fracción obtenida en la clasificación final es depositada en el patio donde se realiza para la certificación de calidad del producto el ensayo final de granulometría según la normativa para árido fino destinado para la elaboración de hormigones cumpliendo además las condiciones de acopio y operación de despacho para árido fino.

El agua utilizada para el proceso productivo es bombeada del canal Paso Bonito Cruces a través de bombas, a la cisterna de almacenamiento con capacidad de 4977 m<sup>3</sup>, esta envía por gravedad a una segunda cisterna con capacidad de 3040 m<sup>3</sup>, la que suministra el agua

a la planta a través de dos bombas de capacidad 160 m<sup>3</sup>/h y 130 m<sup>3</sup>/h con un consumo de 30 kW/h y 22 kW/h respectivamente.

## **Análisis de flujo de materiales**

El análisis de flujo de materiales (AFM) es un método para la valoración sistemática del estado y los cambios de los flujos y depósitos de materiales dentro de un sistema definido en espacio y tiempo. <sup>(5)</sup> Por la ley de conservación de materia, los resultados de un AFM pueden ser controlados por un balance de masa comparando todas las entradas, depósitos, y salidas de un proceso. Es esta característica la que hace atractivo al método como una herramienta para la toma de decisiones en la gestión medioambiental, de recursos y residuos dado que permite identificar el flujo de materiales a través de un sistema conociendo así la demanda de recursos. Sin embargo, la literatura <sup>(6)</sup> señala que uno de los inconvenientes de estos estudios es que típicamente tratan a los sistemas socioeconómicos como una caja negra y muchas veces no permiten analizar cómo fluyen exactamente los materiales dentro de estos. Por ello, en dependencia de la complejidad del sistema, en aplicaciones prácticas para casos industriales se realiza una variante del AFM referido como análisis de flujo de sustancia (AFS) si una sustancia específica es el objetivo del análisis, aunque como los fundamentos son los mismos si se disponen de suficientes datos se puede analizar el flujo de todas las sustancias dentro de cualquier sistema.

Este método está estrechamente relacionado con el análisis de entradas y salidas (*input-output analysis*) que por su estructura matemática para su conducción es conveniente usar programas especializados. En esta investigación se adoptó el software STAN fundamentado en las siguientes ventajas <sup>(7)</sup>: interfaz gráfica de usuario, modelación gráfica con traducción automática al modelo matemático, consideración de incertidumbres, reconciliación de datos contradictorios, cálculo de cantidades desconocidas de flujos y depósitos y graficación automática de resultados en diagramas Sankey. La sustancia de análisis para el caso de estudio es el agua y para comprender su flujo a través del sistema se realizó una prueba controlada en la entidad.

Para la prueba de operación controlada se limpió totalmente la planta y los canales de residuales, se procesó una cantidad de arena igual a la capacidad máxima de la tolva de alimentación (27 m<sup>3</sup>) y se midieron flujos en distintos puntos del proceso, así como el

consumo de energía para el bombeo de agua como en la planta. Para estimar la incertidumbre en los datos esta se repitió 5 veces y a cada conjunto de mediciones se le realizó la prueba t para estimar la adecuación de las medias y la prueba Chi cuadrado para estimar la adecuación de las varianzas con un nivel de significancia  $\alpha=0,05$ .

Una vez determinado el flujo de materiales en el proceso se estimaron índices de desempeño dividiendo el consumo de electricidad, o el flujo analizado, por la capacidad máxima de la tolva de alimentación sirviendo para aproximar los flujos correspondientes para procesar el flujo de arena anual. A partir de estos datos, se realizó el análisis de flujo de materiales considerando que el volumen de materia prima procesado coincide con el promedio de los últimos 3 años, o sea  $104\ 548,7\ m^3$  de arena/año asumiendo que se manifiesta una funcionalidad lineal respecto a los resultados obtenidos en la prueba de operación controlada. Como la ley de conservación está referida a la masa los valores expresados en unidades volumétricas fueron multiplicados por su densidad. Para esto se usó la densidad de la arena beneficiada ( $2,62\ t/m^3$  por datos de la entidad) y la del agua y la arena natural siendo  $0,997\ t/m^3$  y  $2,3\ t/m^3$ . <sup>(8)</sup>

Para estimar el consumo de energía en la propuesta para la recuperación del agua residual (RP) se dividió el consumo de electricidad por bombeo ( $C_b$ ) en la prueba controlada por el volumen de agua trasegada ( $V_{ab}$ ) determinándose un índice de consumo ( $IC_b$ ). Luego el consumo de electricidad para la variante propuesta resulta de multiplicar este índice por el nuevo consumo de agua a incorporar al proceso ( $V_{at}'$ ) sumado a la energía consumida para la recirculación dentro del sistema (E).

$$RP\ (kWh) = IC_b \times V_{at}' + E \quad (1)$$

La energía para bombear el agua de recirculación del sistema de filtración ( $C_{b_n}$ ) se estimó a partir de la ecuación 2 donde  $V_{ar}$  es el volumen de agua recirculado ( $m^3$ ),  $C_{p_{b_n}}$  es la capacidad de la nueva bomba a instalar ( $m^3/h$ ) cuya potencia es  $P_{b_n}$  (kW). Por su parte la energía consumida por el filtro ( $C_f$ ) está dada por la potencia del motor del equipo ( $P_f$ ) multiplicado por la cantidad de horas de trabajo (h) según la ecuación 3. La suma de estas magnitudes determina el consumo de energía para recircular el agua (E).

$$C_{b_n}(kWh) = \frac{V_{ar}}{C_{p_{b_n}}} * P_{b_n} \quad (2)$$

$$C_f = P_f * h \quad (3)$$

Para estimar la potencia de los equipos de bombeo se utilizaron las curvas del apéndice H presentadas por Darby y Chhabra, <sup>(9)</sup> con la premisa de maximizar la eficiencia a la que trabajan los equipos. En el caso del filtro, luego de un análisis documental y la consulta a expertos se estimó que en promedio una potencia de 10 kW es requerida para operar el equipo. Se consideró que la planta opera 8 h al día, de lunes a viernes, por lo que fue estimado que el filtro trabaja 2080 h en el año aproximadamente.

### **Análisis de ciclo de vida**

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología para la evaluación de los impactos ambientales potenciales de un sistema en el que se analizan las interrelaciones de los procesos que lo componen, así como el flujo de materiales que lo atraviesan, desde su adquisición como materias primas a partir de recursos naturales hasta la gestión final de los desechos. El enfoque metodológico de esta herramienta ha permitido su uso para: 1) contribuir al entendimiento de la presión de las actividades humanas sobre el medio ambiente, 2) identificar posibles cambios tecnológicos con mejoras ambientales con la perspectiva que en la búsqueda de soluciones se debe evitar generar problemas mayores, 3) identificar las etapas más relevantes de un proceso, 4) estimar el desempeño ambiental de los sistemas permitiendo comparar a aquellos que brindan productos y/o servicios similares, entre otras.

El marco de referencia para conducir un análisis de ciclo de vida consiste en cuatro fases: 1) definición del objetivo y el alcance, 2) análisis del inventario de ciclo de vida, 3) evaluación del impacto del ciclo de vida y 4) interpretación del ciclo de vida. En la primera fase se definen los límites espaciales y temporales, así como la unidad funcional del sistema producto. En el análisis de inventario se cuantifican los flujos de materiales y energía (materias primas, productos intermedios y emisiones) que fluyen en el sistema objeto de estudio. Luego en la evaluación de impactos se modela la contribución de los flujos de la etapa anterior a determinadas categorías de impacto ambiental que varían de acuerdo al método de evaluación y finalmente en la interpretación se analizan los resultados y se revelan las insuficiencias de las etapas anteriores por lo que en ocasiones es necesario un proceso iterativo. <sup>(1)</sup>

El análisis de flujo de materiales es una herramienta que se articula bien con el análisis de ciclo de vida debido a que permite una cuantificación real de los flujos en el proceso para la construcción del inventario sin embargo el último requiere por su enfoque la utilización

de bases de datos. En la presente investigación se dispuso de la *European Reference Life Cycle Database* (ELCD 3.2 v2.18) y debido a la cantidad de datos para manipular se utilizó del software libre OpenLCA versión 1.10.1 desarrollado por GreenDelta.

Para la conducción del análisis de ciclo de vida en la presente investigación se estableció como objetivo del estudio comparar los posibles beneficios ambientales que se obtendrían con la implementación de mejores tecnologías para la clasificación y la recuperación de agua en la producción de arena. Como unidad funcional se tomó 1 t de arena beneficiada y como límites espacio-temporales se analizó la producción del promedio de los años 2016-2018 de la planta “El Canal”. Para este estudio quedaron excluidas las cargas ambientales asociadas a la fabricación y mantenimiento de los equipos, así como las implicaciones de distribución y consumo del producto final. El método de evaluación de impacto usado fue ReciPe Midpoint. <sup>(10)</sup> Los datos procesados se obtuvieron principalmente de registros de la empresa, de investigaciones previas,<sup>(4)</sup> mientras que otros fueron estimados a partir del análisis de flujo de materiales precedente.

Según datos de la entidad el consumo de diésel es de aproximadamente 0,384 35 kg/t de arena procesada. Como este solo se usa para la trasportación del material el consumo respecto a la cantidad de arena producida fue hallado multiplicando este por el flujo de arena procesada y luego dividiéndolo por la arena producida. Las emisiones gaseosas fueron estimadas a partir del análisis del combustible de la entidad que le comercializa a la empresa, el que aparece representado en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición másica del combustible diésel usado en la empresa

| Elementos                     | % Peso |
|-------------------------------|--------|
| Carbono (C)                   | 86.5   |
| Dihidrógeno (H <sub>2</sub> ) | 13     |
| Azufre (S)                    | 0.05   |

Se supuso una combustión completa de acuerdo a las reacciones químicas mostradas en las ecuaciones 4 y 5 y mediante un análisis masa-masa se estimó la cantidad de dióxido de carbono y dióxido de azufre emitido a la atmósfera.



## Resultados y su discusión

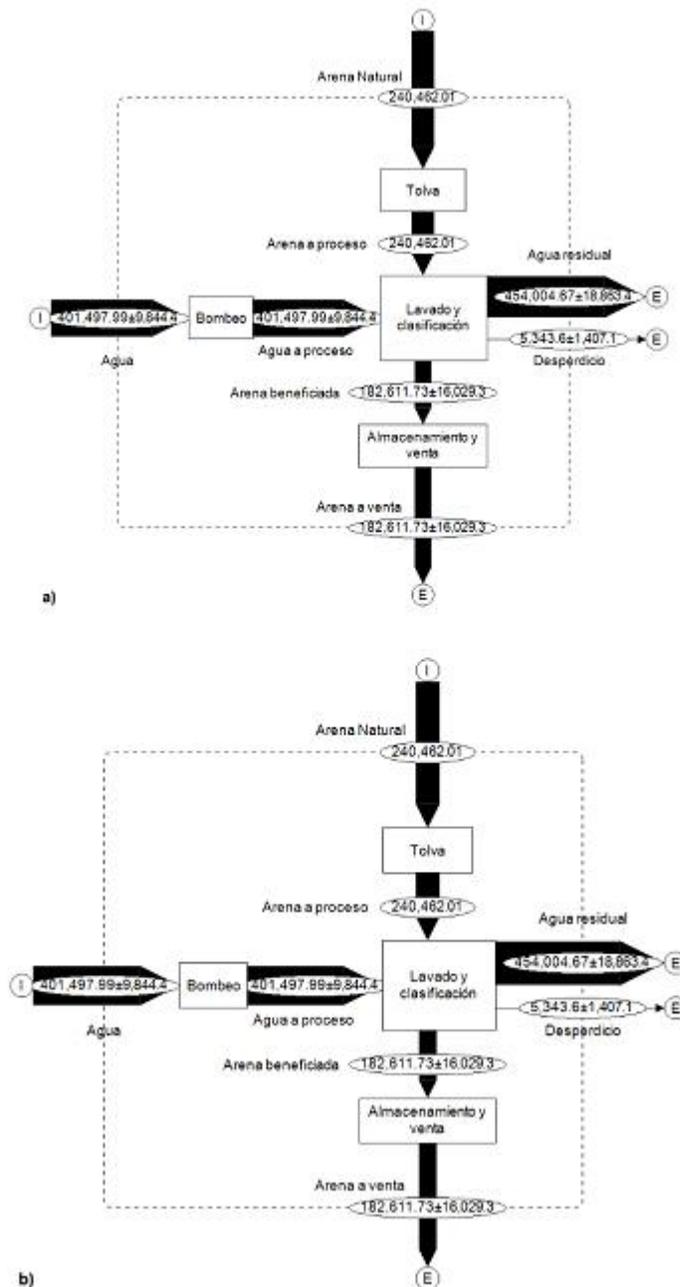
### Desempeño técnico del sistema actual

En la tabla 2 se muestran los resultados de las 5 pruebas de operación controlada, junto con los promedios y desviaciones estándares. La prueba t evalúa la hipótesis de que la media de t es igual a la calculada para cada muestra contra la hipótesis alternativa de que esta es diferente. Para todos los casos no se puede rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95 %. Por su parte la prueba de Chi cuadrado evalúa la hipótesis de que la desviación estándar es igual a las calculadas contra la hipótesis alternativa que estas son diferentes. Igualmente, no se puede rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95 %.

**Tabla 2.** Resultados de la prueba de operación controlada

| No de prueba        | VMP (m <sup>3</sup> ) | t (min) | V <sub>ab</sub> (m <sup>3</sup> ) | C <sub>b</sub> (kWh) | Et (kWh) | V <sub>Ab</sub> (m <sup>3</sup> ) | V <sub>Rs</sub> (m <sup>3</sup> ) | V <sub>Sr</sub> (m <sup>3</sup> ) | V <sub>Aab</sub> (m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|----------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1                   | 27                    | 41      | 101                               | 25                   | 46       | 16                                | 0,8                               | 8,6                               | 17,01                              |
| 2                   | 27                    | 37      | 102                               | 26                   | 50       | 20                                | 0,4                               | 8,3                               | 22,27                              |
| 3                   | 27                    | 40      | 106                               | 22                   | 48       | 18                                | 0,6                               | 8,4                               | 18,85                              |
| 4                   | 27                    | 39      | 104                               | 24                   | 45       | 19                                | 0,5                               | 7,4                               | 20,66                              |
| 5                   | 27                    | 38      | 107                               | 28                   | 46       | 17                                | 0,7                               | 9,3                               | 19,46                              |
| Promedio            | 27                    | 39      | 104                               | 25                   | 47       | 18                                | 0,6                               | 8,4                               | 19,65                              |
| Desviación estándar | -                     | 1,58    | 2,55                              | 2,24                 | 2        | 1,58                              | 0,158                             | 0,682                             | 1,97                               |

De estos datos se comprueba que el consumo de electricidad por bombeo representa en la prueba de operación controlada el 53 % aproximadamente. Del material que entra al proceso solo se aprovecha una fracción de 2/3 por lo que más del 33% del material se pierde entre los desperdicios gruesos o se escapa en las aguas residuales. Por otra parte, el índice de consumo de agua en el proceso es de aproximadamente 3,852 m<sup>3</sup> de agua/m<sup>3</sup> de arena procesada (aproximadamente 2,205 3 m<sup>3</sup> de agua/t de arena producida) lo que representa un consumo excesivo para procesos de este tipo. En la figura 1 se representa el análisis de flujo de materiales en el proceso expresado en toneladas por año.

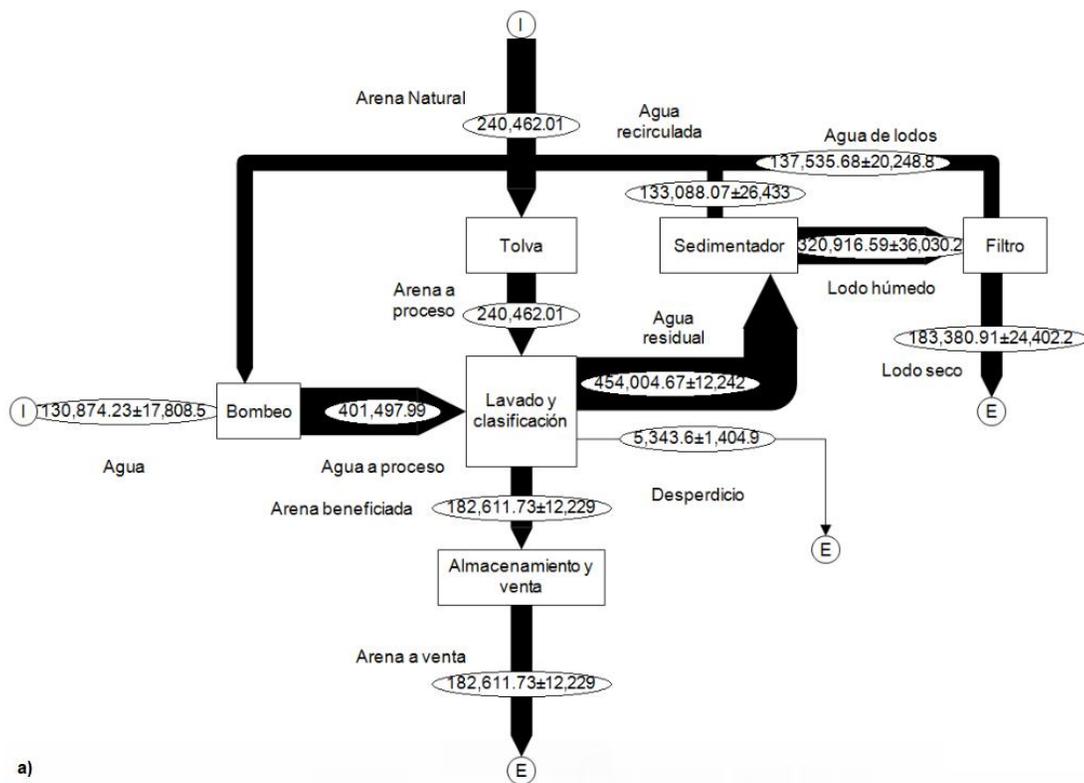


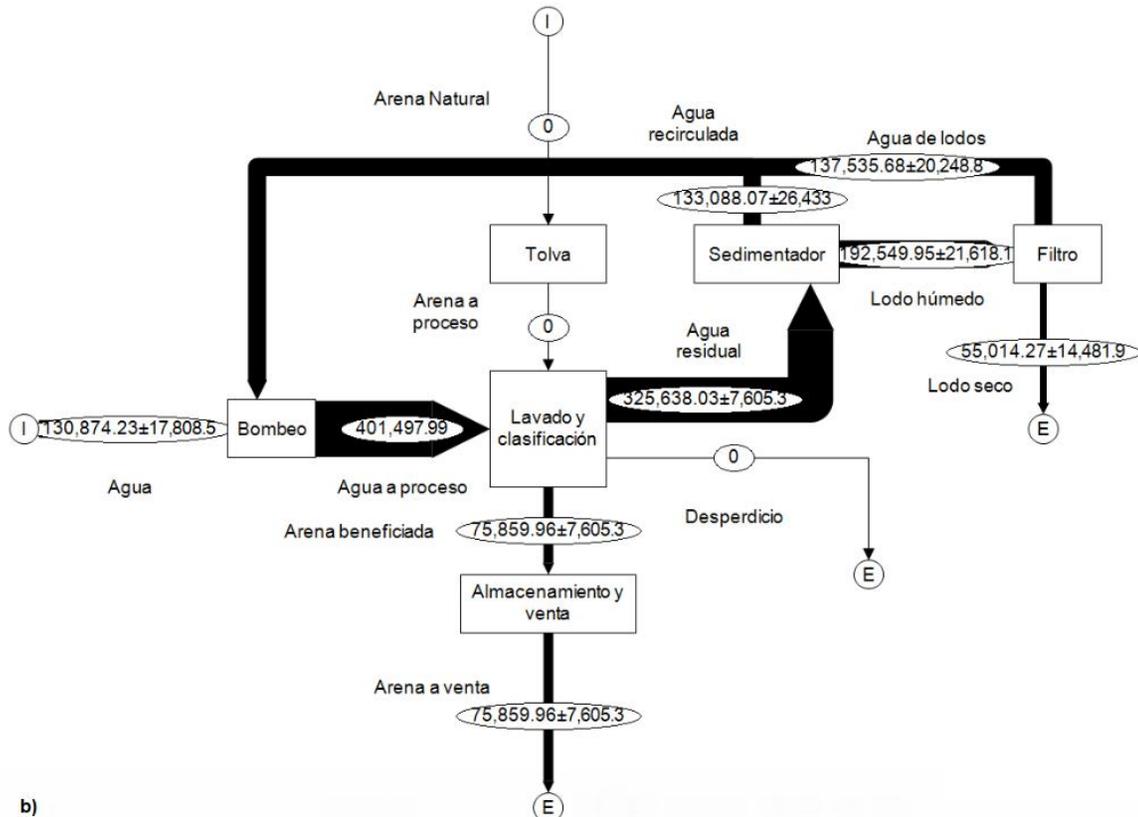
**Fig. 1.** Análisis de flujo de materiales con la tecnología actual (clasificador mecánico de tornillo sinfín). **(a)** flujo total, **(b)** flujo de agua

Se puede comprobar que aproximadamente el 80 % del agua incorporada al proceso se escapa en las aguas residuales lo que representa un excelente potencial para la recuperar. Además, la fracción fina perdida en estas aguas representa 24 veces la descartada en el rechazo reafirmando la necesidad de implementar los hidrociclones para la clasificación con la posibilidad de aprovechar hasta el 90-95 % del material procesado y el beneficio adicional de usar más eficientemente el recurso agua.<sup>(4)</sup>

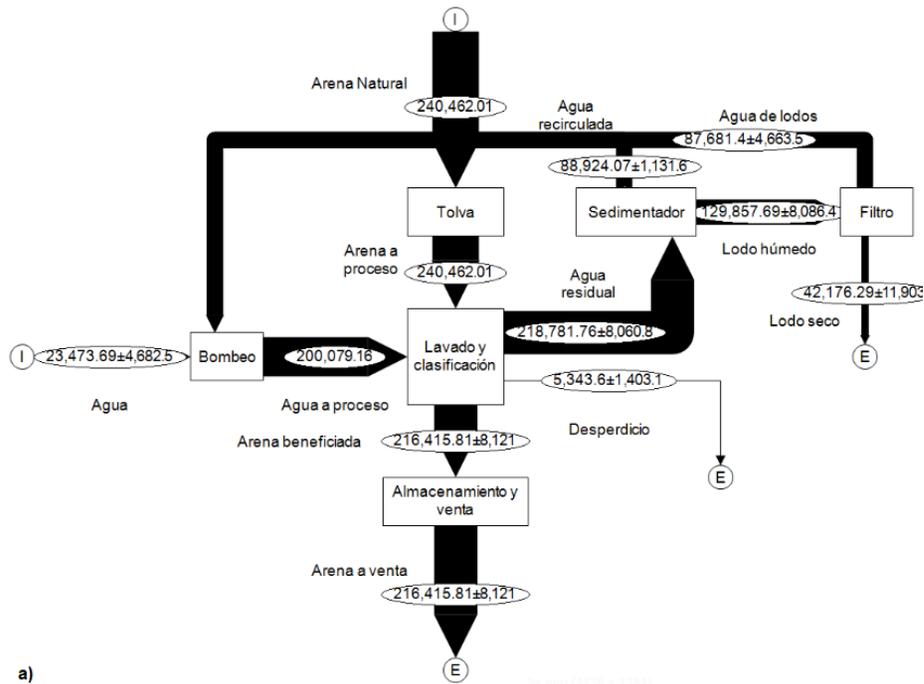
### Beneficios de la recuperación del agua

De acuerdo a Bouso <sup>(11)</sup> mediante el empleo de filtros prensa se pueden obtener sólidos secos con un contenido de agua del 25-35 % en peso y en la actualidad la operación de estos se encuentra automatizada como es el caso del tipo C-1500 de 28 cámaras. En las figuras 2 y 3 se muestra el análisis de flujo de materiales para la recuperación de agua para el proceso analizado. Se puede ver la reducción, al menos en un nivel teórico, del consumo de agua primaria hasta 0,5459 m<sup>3</sup>/t de arena procesada (0,718 8 m<sup>3</sup>/t de arena producida) y 0,0979 m<sup>3</sup>/t de arena procesada (0,108 8m<sup>3</sup>/t de arena producida) en las variantes sin usar y usando clasificador centrífugo respectivamente. El resultado para ambos casos es significativo considerando el desempeño del sistema actual y la importancia estratégica de este recurso.

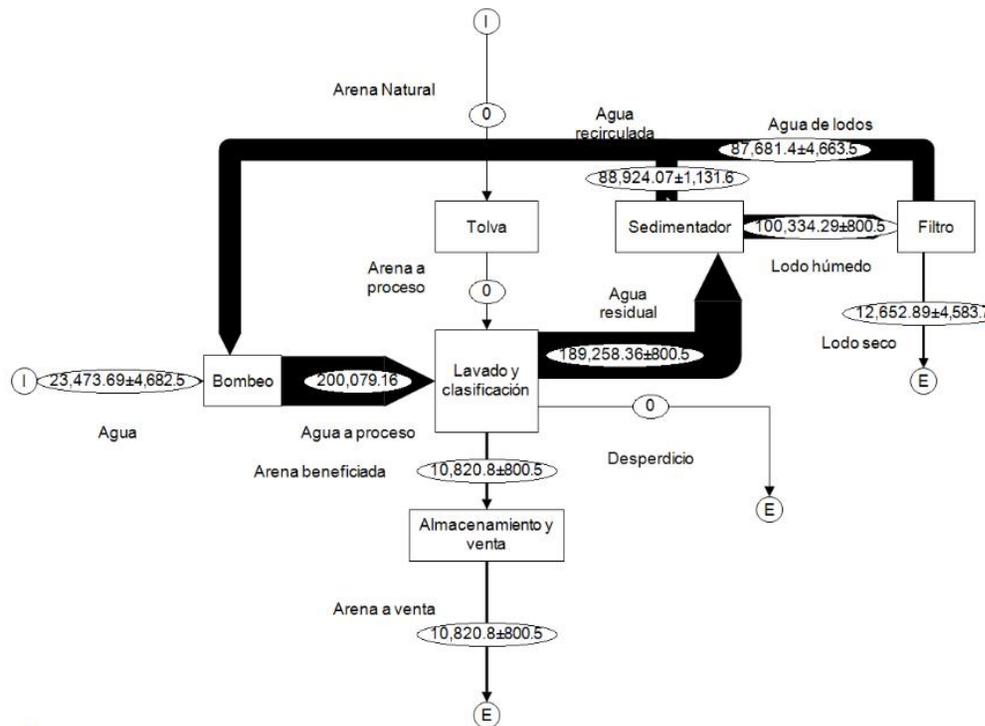




b)  
**Fig. 2.** Análisis de flujo de materiales para la recuperación de agua (con clasificador mecánico de tornillo sinfín). **(a)** flujo total, **(b)** flujo de agua



a)



b)  
**Fig. 3.** Análisis de flujo de materiales para la recuperación de agua con clasificador centrífugo (planta de hidrociclonado). **(a)** flujo total, **(b)** flujo de agua

Una vez determinados los flujos de agua a recircular se estimó el consumo por bombeo para las variantes con y sin clasificador centrífugo. Sin hidrociclón la bomba necesaria debe tener una capacidad aproximada de 140 m<sup>3</sup>/h mientras que con hidrociclón al tener que recircular menos agua 90 m<sup>3</sup>/h para un sobredimensionamiento menor al 10%. De acuerdo al modelo 4LR II la potencia necesaria es de 13 hP (9,561 kW) y 10 hP (7,355 kW) respectivamente. Luego en la tabla 3 se muestra el consumo de agua primaria y energía eléctrica referidas al total de producción para cada una de las variantes tecnológicas.

**Tabla 3.** Índices de desempeño para las diferentes variantes tecnológicas

| Variante tecnológica |   | Consumo de agua (m <sup>3</sup> /t de arena producida) | Consumo de electricidad (kWh/t de arena producida) |
|----------------------|---|--|--|
| V0                   | Proceso actual                                    | 2,205 3  | 0,996 6  |
| V1                   | Recuperación de agua sin clasificación centrífuga | 0,718 8  | 0,745 5  |
| V2                   | Recuperación de agua con clasificación centrífuga | 0,108 8  | 0,385 9  |

Los cálculos del análisis masa-masa reportan que por cada kg de combustible usado se desprenden a la atmósfera 3,169 5 kg de CO<sub>2</sub> y 0,099 9 kg de SO<sub>2</sub> requiriendo 10,171 kg

de aire. En la tabla 4 se muestran el consumo de diésel estimado para cada propuesta y las emisiones hacia la atmósfera.

**Tabla 4.** Consumo de diésel y emisiones para las diferentes variantes tecnológicas

| Variante tecnológica |   | Consumo de diésel (kg/t de arena producida) | Emisiones de CO <sub>2</sub> (kg/t de arena producida) | Emisiones de SO <sub>2</sub> (kg/t de arena producida) |
|----------------------|---|---|--|--|
| V0                   | Proceso actual                                    | 0,506 1                                     | 1,604 1  | 0,050 56   |
| V1                   | Recuperación de agua sin clasificación centrífuga | 0,506 1                                     | 1,604 1  | 0,050 56   |
| V2                   | Recuperación de agua con clasificación centrífuga | 0,427 1                                     | 1,353 7  | 0,042 67   |

A partir de estos datos y los calculados anteriormente se estimaron los potenciales impactos ambientales según el método Recipe Midpoint H para las variantes tecnológicas como se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5.** Evaluación del impacto de ciclo de vida para las variantes de beneficio de arena

| Impact category                 | Reference unit          | V0        | V1        | V2        |
|---------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| agricultural land occupation    | m <sup>2</sup>          | 0,011 354 | 0,008 611 | 0,004 61  |
| climate change                  | kg CO <sub>2</sub> -Eq  | 2,436 512 | 2,306 79  | 1,821 048 |
| fossil depletion                | kg oil-Eq               | 0,794 086 | 0,755 558 | 0,600 299 |
| freshwater ecotoxicity          | kg 1,4-DCB-Eq           | 0,005 039 | 0,004 094 | 0,002539  |
| freshwater eutrophication       | kg P-Eq                 | 0,000 245 | 0,000 19  | 0,000 108 |
| human toxicity                  | kg 1,4-DCB-Eq           | 0,203 235 | 0,161 337 | 0,095 569 |
| ionising radiation              | kg U <sub>235</sub> -Eq | 0,314 32  | 0,241 326 | 0,132 949 |
| marine ecotoxicity              | kg 1,4-DCB-Eq           | 0,004 544 | 0,003 596 | 0,002 116 |
| marine eutrophication           | kg N-Eq                 | 0,001 123 | 0,000 942 | 0,000 619 |
| metal depletion                 | kg Fe-Eq                | 0,007 915 | 0,006 822 | 0,004 698 |
| natural land transformation     | m <sup>2</sup>          | 0,000 234 | 0,000 234 | 0,000 198 |
| ozone depletion                 | kg CFC-11-Eq            | 4,01E-07  | 3,93E-07  | 3,25E-07  |
| particulate matter formation    | kg PM <sub>10</sub> -Eq | 0,011 767 | 0,011 446 | 0,009 35  |
| photochemical oxidant formation | kg NMVOC                | 0,008 897 | 0,008 375 | 0,006 562 |
| terrestrial acidification       | kg SO <sub>2</sub> -Eq  | 0,055 86  | 0,054 776 | 0,045 179 |
| terrestrial ecotoxicity         | kg 1,4-DCB-Eq           | 3,13E-05  | 2,79E-05  | 2,03E-05  |
| urban land occupation           | m <sup>2</sup>          | 0,001 85  | 0,001 445 | 0,000 828 |
| water depletion                 | m <sup>3</sup>          | 2,208 833 | 0,721 582 | 0,110 421 |

De acuerdo a los resultados obtenidos se comprueba que resulta inadecuado la recuperación de agua sin antes mejorar la tecnología de clasificación debido a que se perdería gran parte de la fracción fina de arena. Luego, debido a los grandes volúmenes

de agua a tratar en el sistema de sedimentación-filtración se incrementarían los costos para la adquisición de estas tecnologías dado que estos aumentan proporcionalmente con el área de los equipos. Respecto al análisis de ciclo de vida se comprueba en la tabla 5 que en todas las categorías de impacto las variantes tecnológicas mejoran el desempeño del sistema actual. Sin embargo, hay que señalar que dadas las características del caso de estudio donde el consumo de electricidad en el bombeo representa más de la mitad de la requerida en la planta este escenario no tienen que coincidir necesariamente con otros sistemas similares por lo que se recomienda la adaptación de los cálculos aquí expuestos a otros casos de estudios.

Los resultados anteriores justifican valorar una posible inversión para la modernización del sistema alertándose que como esta tiene un fundamento ambiental no deben considerarse solo indicadores de carácter económico pues estos no son del todo adecuados para integrar la complejidad del fenómeno analizado. Por ello es necesario como destaca Valdés y colaboradores <sup>(1)</sup> que se analicen factores de desempeño ambiental, sociales y técnicos-económicos en el proceso de decisión lo que estriba en soluciones más acertadas para conducir al sistema hacia la sostenibilidad.

## **Conclusiones**

Un uso adecuado de los recursos naturales es uno de los más grandes desafíos de la sociedad moderna para operar sistemas tecnológicos sostenibles, y dada la tendencia perceptible hacia condiciones meteorológicas más extremas el agua es de especial atención. Los resultados de este trabajo demuestran el beneficio ambiental a lo largo del ciclo de vida de la recuperación de agua en la planta “El Canal” lo que es un incentivo para la implementación de estas tecnologías tanto en el caso de estudio como en sistemas similares constituyendo medidas de adaptación y mitigación al cambio climático.

De esta manera se promueve un uso más racional de este recurso estratégico para la nación lo que tributa en una mejor gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, se alerta de que como el fundamento de una inversión en estos sistemas tiene un carácter medioambiental no solo deben analizarse desde una perspectiva económica pues se corre el riesgo de desestimar factores de otra índole que pudieran tener un peso relevante en el proceso de decisión.

## **Nomenclatura**

$C_b$  – consumo eléctrico del bombeo

$E_t$  – consumo total de energía eléctrica

$t$  – tiempo de duración de cada prueba

$V_{Aab}$  – contenido de agua en la arena beneficiada

$V_{Ab}$  – volumen de arena beneficiada

$V_{ab}$  – volumen de agua bombeada

VMP–volumen de materia prima suministrado en la prueba

$V_{Rs}$  – volumen de residual sólido emitido en la prueba

$V_{Sr}$  – volumen de sólidos disueltos en la corriente de residual líquido

## Referencias bibliográficas

1. VALDÉS, A., E. J. LÓPEZ AND A. ALONSO Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica. *Universidad y Sociedad*, 2019, **11**(4), 424-435.
2. DÍAZ, J. A. El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2018, **39**(2), 46-59.
3. MINISTERIO DE JUSTICIA. Índices de consumo de agua. *Gaceta Oficial de la República de Cuba*, 2016, **16**, 235-257.
4. TORRES, O. Evaluación de Producciones más Limpia en la planta de beneficio de arena "El Canal". Tesis en opción al nivel académico Master en Producción Más Limpia Universidad de Cienfuegos, 2010.
5. BRUNNER, P. H. AND H. RECHBERGER *Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers*. 2 ed. United States of America: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 1315313448.
6. KRAUSMANN, F. Social metabolism. In C.L. SPASH ed. *Routledge Handbook of Ecological Economics: Nature and Society*. New York: Routledge, 2017, p. 108-118. ISBN 1317395107.
7. CENCIC, O. MFA with Software STAN. In P.H. BRUNNER AND H. RECHBERGER eds. *Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers*. Boca Ratón, Florida: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016, p. 148-176. ISBN 1315313448.

8. GREEN, D. W. AND M. Z. SOUTHARD *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. 9 ed. United States of America: McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 9780071834094.
9. DARBY, R. AND R. P. CHHABRA *Chemical Engineering Fluid Dynamics*. 3 ed. United States of America: CRC Press, 2017. ISBN 9781498724456.
10. GOEDKOOP, M., R. HEIJUNGS, M. A. J. HUIJBREGTS, A. DE SCHRYVER, et al. ReCiPe 2008-A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. In. The Hague: Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), 2012.
11. BOUSO, J. L. El consumo de agua en el lavado de áridos. Canteras y explotaciones, 2008, 54-62.

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses

### **Contribución de los autores**

MSc. Olaida Torres Calzadilla-Prueba de operación controlada

Dr.C. Eduardo Julio López Bastida- Análisis estadístico

Ing. Luis Javier Aparicio Ortiz-Análisis de flujo de materiales

Ing. Enier Rodríguez Pérez- Análisis de ciclo de vida

MSc. Alejandro Valdés López-Diseño de la investigación y redacción del informe final.

.