

Evaluación HIRA asistida por computador de peligros potenciales en la producción de aceite de palma crudo*

Computer-assisted Hira Assessment of Hazardous in the Production of Crude Palm Oil



ÁNGEL D. GONZÁLEZ DELGADO

Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Investigación en Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (NIPAC), Universidad de Cartagena, Colombia.

Department of Chemical Engineering, Group of Research in Nanomaterials and Process Engineering Assisted by Computer (NIPAC), University of Cartagena, Colombia.

CITACIÓN: González, A.D. (2019). Evaluación HIRA asistida por computador de peligros potenciales en la producción de aceite de palma crudo. *Palmas*, 40 (Especial, Tomo II), 56-66.

PALABRAS CLAVE: aceite de palma, seguridad de procesos, evaluación, CAPE, HIRA.

KEYWORDS: Palm oil, process safety, assessment, CAPE, HIRA.

*Artículo original recibido en español.

Resumen

El procesamiento de aceite de palma es una de las actividades económicas más dinámicas en Colombia, dada su alta productividad para la extracción de aceite crudo. Dicho aceite vegetal se usa ampliamente como fuente de biodiésel, cosméticos y productos alimenticios, después de varias etapas de refinación. La extracción de aceite de palma crudo (CPO, por su sigla en inglés) de los racimos de fruta fresca,

requiere fases de procesamiento (por ejemplo, esterilización, desfrutado, digestión, prensado, clarificación y secado) que pueden ser una fuente de riesgos potenciales. En este trabajo, estos se determinan a través de la metodología de Identificación y Clasificación de Riesgos (HIRA, por su sigla en inglés) con el objetivo de identificar las unidades más críticas y proponer correcciones relevantes. La evaluación de la seguridad del proceso mostró riesgos de incendio y explosión, debido a las emisiones de polvo combustible y al manejo de materiales inflamables. Para la mayoría de las unidades estudiadas, el índice de daño por incendio y explosión (FEDI) alcanzó valores por encima de 400, que corresponden a la categoría altamente peligrosa. Para reducir los riesgos, se sugirieron algunos controles de seguridad del proceso hacia una producción de aceite crudo más segura.

Abstract

The palm oil processing is one of the most dynamic economic activities in Colombia due to its high productivity for crude oil extraction. Such vegetable oil is widely used as source of biodiesel, cosmetics and food products after further refining steps. The crude palm oil (CPO) extraction from fresh fruit bunches requires processing stages (e.g. sterilization, threshing, digestion, pressing, clarification and drying) that may generate potential hazards, which can be identified through Hazard Identification and Ranking (HIRA) methodology in order to identify the most critical units and propose relevant safety corrections. The process safety assessment showed risks of fire and explosion due to emissions of combustible dust and handling flammable materials. For most of the studied units, FEDI achieved values above 400, which correspond to highly hazardous category. To reduce risks, some process safety controls were suggested towards a safer crude oil production.

Introducción

La demanda global de aceite de palma, como fuente de grasas y aceites baratos en la industria alimenticia y oleoquímica, ha aumentado con los años. Para 2018, su consumo global alcanzó 19.72 millones de toneladas (Ahmad *et al.*, 2019). La producción de aceite de palma en Colombia representa una importante actividad para el crecimiento socioeconómico del país, posicionándose como el primer productor latinoamericano (Rincón *et al.*, 2014). En 2015, se cosecharon más de 150.000 ha de palma para cubrir la demanda colombiana en aplicaciones alimentarias e industriales (Rincón *et al.*, 2015). El aceite que contiene la fruta es extraído como un aceite naranja brillante, conocido como aceite de palma crudo (CPO, por su sigla en inglés), que se puede usar para cocinar, producir biodiésel o como fuente de antioxidantes de alto valor como tocotrienoles y betacaroteno (Castiblanco *et al.*, 2015; Lau *et al.*, 2019). El CPO se extrae a través de dos métodos comunes que involucran procesos húmedos o secos. Sin embargo, ambos requieren etapas

tales como la recepción de racimos de fruta fresca, esterilización y digestión (Inyang *et al.*, 2019).

La seguridad de los procesos es otro tema importante que afecta la productividad en todo el mundo, y es necesario explorar las mejoras relacionadas con esta para la extracción del aceite de palma crudo, con el propósito de garantizar la expansión continua de la agroindustria. Se han reportado muchos incidentes, que incluyen incendios y explosiones. Por ejemplo, una máquina de esterilización explotó y la puerta fue lanzada a unos 11 metros de distancia, matando a cuatro trabajadores (Kamarden *et al.*, 2014). Los casos de percances revelan la necesidad de alternativas de gestión de seguridad de procesos en la agroindustria del aceite de palma, que pueden identificarse mediante el uso de ingeniería de procesos asistida por computador. Se han desarrollado varios indicadores para cuantificar los riesgos de explosión e incendio en cualquier proceso, entre los que se destacan el índice de seguridad inherente (ISI), el índice de riesgo ponderado de seguridad (SWHI) y el índice de incendio y explosión (F&EI) (Jafari *et al.*, 2018). A pesar del

progreso actual en la gestión de la seguridad del proceso en la agroindustria, existe una brecha de conocimiento en la identificación de riesgos de incendio y explosión en cada etapa de la producción de CPO.

Este trabajo intenta evaluar el desempeño de seguridad del proceso de producir aceite de palma crudo a partir de los racimos de fruta fresca, utilizando herramientas asistidas por computadora. Para este fin, se aplicó la metodología HIRA para calcular los peligros potenciales de explosión e incendio. La siguiente sección proporciona la descripción del proceso convencional de extracción de aceite de palma crudo, y explica la metodología seleccionada para realizar la evaluación de la seguridad del proceso. Luego se presentan los principales resultados obtenidos y se brinda información sobre las posibles mejoras.

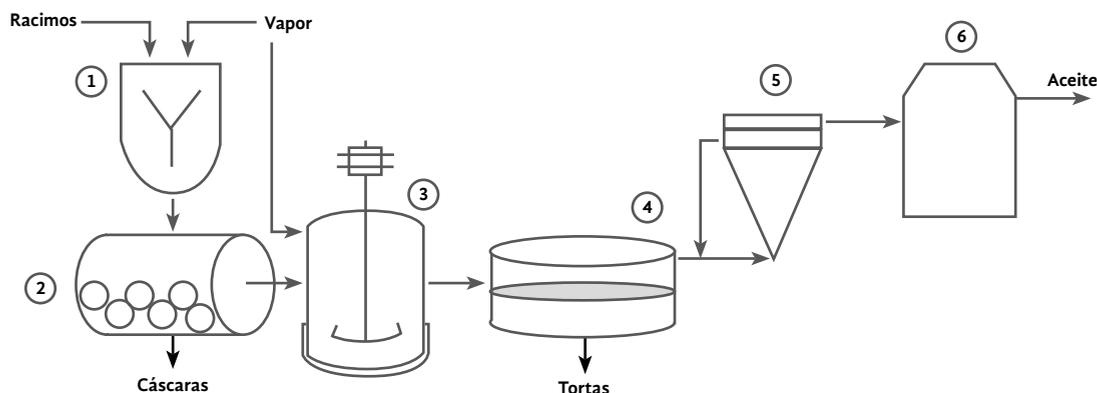
Materiales y métodos

Descripción del proceso

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo simplificado de un proceso convencional de extracción de aceite de palma crudo. Los racimos de fruta fresca (FFB, por su sigla en inglés) se someten a esterilización con vapor a alta presión, para inhibir la formación de ácidos grasos libres (FFA, por su sigla en inglés) y aflojar las frutas en el racimo (Sukaribin & Khalid, 2009). La esterilización es un paso clave en productos de alta calidad debido a la mejora de la ruptura de las células con aceite, así

como a la presencia de cambios químicos como la hidrólisis (Syahro *et al.*, 2016). Los racimos esterilizados se separan del vapor y los condensados restantes, y se envían a la etapa de desfrutado, para separar los frutos de los tallos del racimo (Chavalparit *et al.*, 2006). Los racimos de fruta vacíos que se extraen de esta corriente, contienen altos nutrientes para las plantas y se usan comúnmente como fertilizantes y acondicionadores del suelo después de la incineración. Sin embargo, las preocupaciones ambientales relacionadas con el humo blanco han limitado su aplicación (Yusoff, 2006). Los frutos se someten a un proceso de digestión para la ruptura de las células de aceite, permitiendo que el aceite fluya durante la operación de prensado (Owolarafe & Faborode, 2008). El digestor usa vapor para aumentar la temperatura de operación que ayuda a destruir la cubierta exterior de la fruta y reducir la viscosidad del aceite. Las frutas digeridas se introducen en un equipo de prensado, en el que se obtiene un licor compuesto de aceite crudo, junto con la torta de prensado. El aceite retenido en esta torta podría emplearse como un buen combustible sólido, pero, este trabajo está restringido para considerarlo como desechos de procesamiento. El licor resultante se mezcla con agua para diluirlo y facilitar su posterior procesamiento. La mezcla de aceite y agua se somete a un proceso de clarificación con un decantador, en el que el aceite se separa de los lodos. Estos se envían a centrifugación con el objetivo de recircular el aceite recuperado a la etapa de mezcla. Finalmente, el aceite de palma crudo se seca y se almacena.

Figura 1. Diagrama simplificado de la producción de aceite de palma crudo a partir de racimos de fruta fresca. 1. Esterilización. 2. Desfrutado. 3. Digestión de frutas. 4. Prensado. 5. Clarificación. 6. Secado.



Evaluación de la seguridad del proceso de producción de aceite de palma crudo

El enfoque principal de este estudio se basa en la identificación de mejoras del proceso desde un punto de seguridad, con el objetivo de desarrollar rutas más sostenibles. Los actores de la sociedad, es decir, las empresas, el Gobierno y la comunidad, deben avanzar hacia prácticas más seguras y sostenibles, por lo tanto, se han propuesto metodologías para evaluar y comparar alternativas a través de herramientas asistidas por computadora. Los peligros potenciales en la producción de aceite de palma crudo a partir de racimos de frutas frescas, se analizaron utilizando el enfoque de HIRA, seleccionado debido a su disponibilidad y simplicidad. La Figura 2 muestra una representación esquemática de los pasos implicados en esta metodología.

La evaluación de la seguridad del proceso se realizó a través de Identificación y Clasificación de Riesgos (HIRA), un algoritmo sistemático, completo y fácil de implementar. Este enfoque presenta una combinación del índice de daño por incendio y explosión (FEDI), así como índice de daño por toxicidad (TDI). Es una herramienta de evaluación para determinar qué peligros representan el mayor riesgo

y qué tan grandes pueden ser sus impactos potenciales (Sunaryo & Hamka, 2017). La metodología propuesta de HIRA incluye los siguientes pasos:

- Clasificación de las unidades de la planta en cinco categorías: i) de almacenamiento, ii) que involucren operaciones físicas, iii) que implican reacciones químicas, iv) de transporte, y v) otras unidades peligrosas
- Evaluación de factores energéticos.
- Asignación de sanciones.
- Valoración del daño potencial.
- Estimación de FEDI.

Unidades de almacenamiento: para la clasificación de esta unidad, se seleccionan tres factores diferentes (F1, F2, F3) que tienen en cuenta la energía química y física, como se indica en las ecuaciones 1 a 3.

(Ec. 1)

$$F1 = 0,1 * M * Hc / k$$

(Ec. 2)

$$F2 = 1,304 * 10^{-3} * PP * V$$

(Ec. 3)

$$F3 = 1,0 * 10^{-3} * 1 / (T + 273) * (PP - PV)^2 * V$$

Las penalizaciones se calculan para medir el impacto de los parámetros en FEDI. El de la tempera-

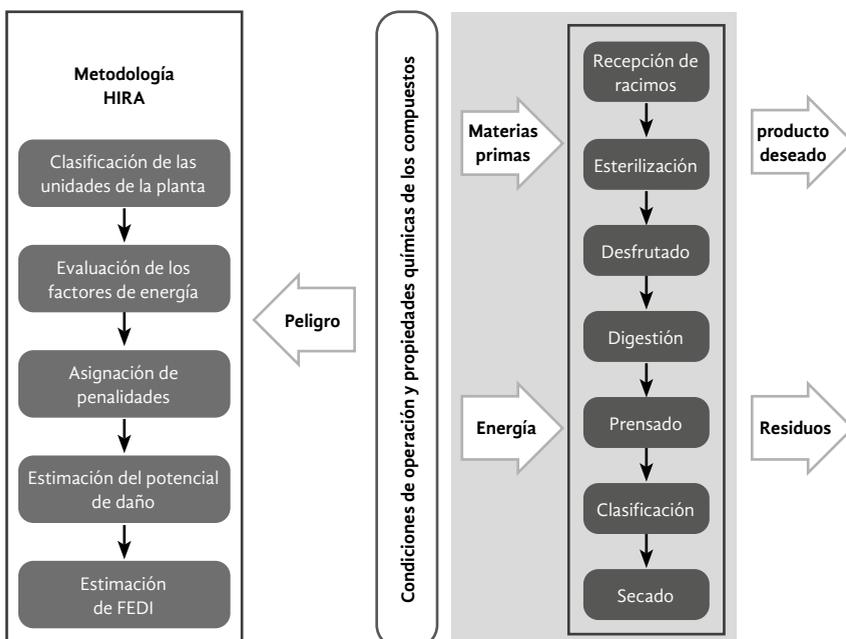


Figura 2. Esquema de la metodología propuesta.

tura se refiere a $pn1$ y es función del punto de inflamación, la temperatura de ignición y la de operación. Para una temperatura de operación mayor que el punto de inflamación y la de ignición mayor que el punto de inflamación ($temperatura > punto\ de\ inflamación < temperatura\ de\ ignición$), la penalización $pn1$ toma el valor de 1.34. Si $temperatura > temperatura\ de\ ignición < temperatura\ de\ auto-ignición$, $pn1$ es 1.55. Para otros casos, el valor seleccionado de $pn1$ es 1.1. El impacto de la presión se cuantifica mediante la penalización $pn2$, utilizando los valores de los factores de energía $F2$ y $F3$. La función f (condiciones de funcionamiento) se traza en relación con el factor F , que se calcula de la siguiente manera:

(Ec. 4)

$$F = F2 + F3 \text{ (If } VP > AP \ \& \ PP > VP)$$

(Ec. 5)

$$F = F2 \text{ (If } VP > AP \ \& \ PP < VP)$$

(Ec. 6)

$$F = F3 \text{ (If } VP < AP \ \& \ PP < VP)$$

La penalización $pn3$, debida a la ubicación de la unidad de almacenamiento cerca de otras unidades riesgosas, se estima en función de la distancia del peligro más cercano. La penalización $pn4$ está relacionada con la cantidad de producto químico manejado en la unidad. Las características de estos productos también se incluyen en la metodología, como se indica en la ecuación 7.

(Ec. 7)

$$pn5 = 1 + 0,25 * (NR + NF)$$

La penalización debida a la densidad de unidades $pn6$, corresponde al porcentaje de espacio ocupado por la unidad en un área de 30 m. Después de estimar tanto las penalizaciones como los factores de energía, el potencial de daño y el FEDI se calculan mediante las ecuaciones 8 y 9.

(Ec. 8)

$$damg.pot = (F * pn2 + F1 * pn1) * pn3 * pn4 * pn5 * pn6$$

(Ec. 9)

$$FEDI = 4,76 * (DAMG.POT)^{1/3}$$

Unidades que involucran operaciones físicas: las operaciones unitarias que se ajustan a esta clasi-

ficación involucran transferencia de masa y calor. En este caso, tres factores de energía y seis penalizaciones se estiman de manera similar a las unidades de almacenamiento. Sin embargo, la formulación de sanciones varía para este propósito y debe explicarse claramente. La penalización debida a la temperatura ($pn1$) tiene un valor máximo de 1.95, cuando la temperatura de operación es mayor que la del punto de ignición de los químicos. Puede tomar valores de 1.45, 1.75 o 1.1, según la temperatura de operación, de ignición, de autoignición y el punto de inflamación.

La penalización debida a la presión se calcula de dos maneras: i) decidiendo la combinación de los factores de energía $F2$ y $F3$, ii) estimándola comparando la presión de operación con la presión de vapor. Las funciones empleadas en la formulación de penalizaciones están definidas por las ecuaciones 10 a 12.

(Ec. 10)

$$fp1 = 1 + ((PP - PV) / PP) * 0,6$$

(Ec. 11)

$$fp2 = 1 + ((PP - PV) / PP) * 0,4$$

(Ec. 12)

$$fp3 = 1 + ((PP - PV) / PP) * 0,2$$

Las penalizaciones por la cantidad de producto químico manejado en la unidad ($pn4$) y la ubicación de la unidad peligrosa más cercana ($pn3$), se determinan de manera similar a la de las unidades de almacenamiento. El efecto de la inflamabilidad y reactividad del producto químico se cuantifica en función de NF y NR (ver la ecuación 7). Entonces, el daño potencial se calcula utilizando la siguiente ecuación:

(Ec. 13)

$$damg.pot = (F1 * pn1 + F * pn2) * pn3 * pn4 * pn5 * pn6$$

Unidades que involucran reacciones químicas: las reacciones químicas representan una fuente de varios peligros debido a la reactividad y la inflamabilidad de los productos químicos, y al cambio repentino de temperatura o presión que causa reacciones fuera de control. En este sentido, se incluye un nuevo factor de energía ($F4$) para considerar la entalpía de la reacción, por lo tanto, la liberación de energía debido a las reacciones químicas:

(Ec. 14)

$$F4 = M * Hrxn / k$$

También se consideraron sanciones adicionales relacionadas con la naturaleza de la reacción (pn7) y la probabilidad de reacciones secundarias o "reacciones fuera de control" (pn8). Finalmente, el daño potencial está definido por la ecuación 15:

(Ec. 15)

$$damg.pot = (F1 * pn1 + F * pn2 + F4 * pn7 * pn8) * pn3 * pn4 * pn5 * pn6$$

Unidades de transporte: las penalizaciones asignadas a las unidades de transporte están relacionadas con la temperatura (pn1), la presión (pn2), la cantidad transportada (pn3), característica de los productos químicos como la inflamabilidad y la reactividad (pn4), el estado físico del producto químico durante el transporte (pn5), ubicación de la unidad peligrosa más cercana (pn6) y densidad de unidades en el área (pn7). Este trabajo se limita a la transformación de materias primas en productos de alto valor, y no se consideran las unidades de transporte. Por lo tanto, estas no tomarán relevancia durante la aplicación del enfoque HIRA.

Otras unidades peligrosas: las unidades incluidas en esta clasificación son calderas, intercambiadores de calor de combustión directa, hornos, entre otros. Las penalizaciones adicionales de esta tienen en cuenta el efecto del tipo de combustible (pn1), el estado físico del combustible (pn2) y la tasa de uso del combustible (pn3). La penalización pn1 viene dada por la siguiente ecuación:

(Ec. 16)

$$pn1 = \text{minimum}(1, 0.25 * (NF + NR))$$

La penalización pn2 y pn3 se calculan mediante las ecuaciones 17 y 18, respectivamente.

(Ec. 17)

$$pn2 = f(\text{physical state})$$

(Ec. 18)

$$pn3 = 1 + \frac{NF}{1000} * \text{quantity in use per hour (t/h)}$$

Resultados y discusión

Simulación de procesos

La simulación de la producción de CPO proporcionó balances de masa y energía extendidos, condiciones operativas, estimación de propiedades termodinámicas, entre otros parámetros, que se requieren para realizar una evaluación de seguridad. La capacidad de procesamiento de 30 t/h de racimos de fruta fresca se seleccionó de acuerdo con una planta real de extracción de aceite crudo, ubicada en el Departamento de Bolívar (Colombia). El diagrama de flujo del proceso de esta planta se muestra en la Figura 3. Como se observa, la corriente del proceso S1 ingresa a la caldera con el objetivo de producir el vapor sobrecalentado (S2), requerido para esterilizar los FFB (S3) en el mezclador 1. Durante la esterilización, se generan condensados debido a la saturación de vapor, por lo tanto, la mezcla resultante (S4) pasa a través de una etapa de separación (separador 1) para eliminar dichos condensados (S7) del vapor saturado (S6). Los racimos (S8) se envían a un tambor giratorio para separar los racimos de fruta vacíos (EFB, por su sigla en inglés) de la fruta (S10). Esta última corriente se somete a un proceso de digestión (digestor) utilizando vapor (S13). Las frutas tratadas (S11) se prensan para extraer el aceite (S14) que se diluye con agua (S16) y el líquido remanente después de la centrifugación (S22). Esta mezcla (S18) se envía a una etapa de clarificación (decantador), en la que se recolecta el 90 % del aceite. Finalmente, el contenido de humedad del aceite de palma crudo se reduce al evaporar el agua bajo condiciones de vacío. Las propiedades de operación (por ejemplo, temperatura, presión y flujo de masa) de las corrientes principales del proceso se resumen en la Tabla 1.

Evaluación de la seguridad del proceso

El potencial de explosión o incendio en la planta de beneficio de aceite de palma se cuantifica a través del índice de daño de incendio y explosión. Como se reportó anteriormente, esta metodología requiere datos detallados de las corrientes, propiedades químicas de las sustancias, clasificación de la NFPA y datos de

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite crudo a partir racimos de frutos de palma.

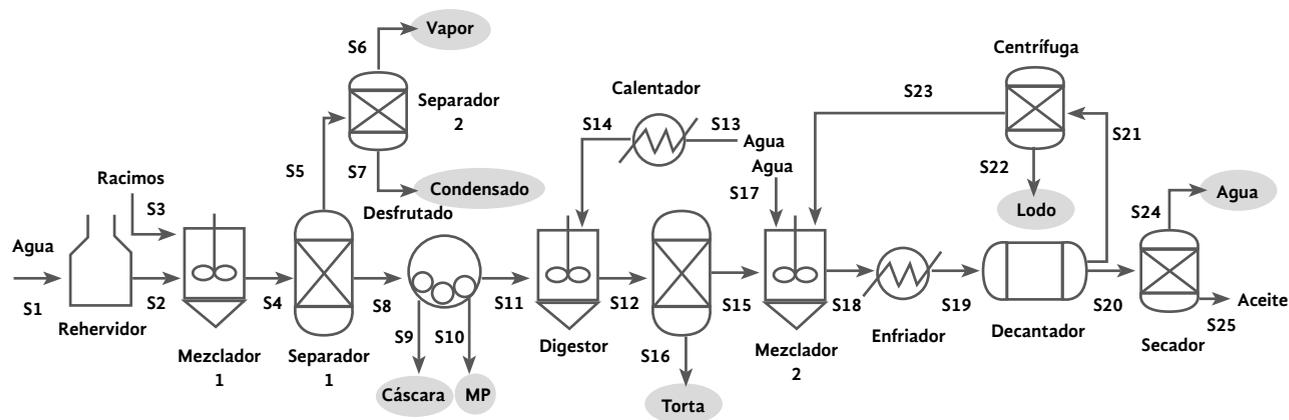


Tabla 1. Flujo másico y condiciones operativas de las principales corrientes del proceso.

Corrientes	S3	S6	S7	S9	S12	S16	S22	S24	S25
Temperatura (K)	303.15	420.85	358.15	406.3	378.19	378.19	375.46	332.6	332.57
Presión (atm)	1.00	4.40	1.00	2.72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Flujo másico (kg/h)	30000	1416	10063	7756.22	20277	11695	6039.59	7.531	5070.2
Composición másica									
Agua	0.3010	1.000	0.999	0.215	0.2669	0.2109	0.9061	1.000	1.8E-04
Aluminio	3.5E-02	0.000	0.000	3.9E-02	3.7E-02	1.9E-02	8.7E-02	0.000	0.000
Silicio	1.9E-03	0.000	0.000	2.2E-03	2.0E-03	0.000	6.8E-03	0.000	1.6E-05
Celulosa	0.1784	0.000	0.000	0.200	0.1871	0.3244	0.000	0.000	0.000
Hemicelulosa	9.9E-02	0.000	0.000	0.112	0.1047	0.1816	0.000	0.000	0.000
Lignina	0.1212	0.000	0.000	0.136	0.1271	0.2204	0.000	0.000	0.000
Ácido palmítico	5.5E-03	0.000	7.9E-06	6.2E-03	5.8E-03	2.3E-04	0.000	0.000	2.2E-02
Ácido esteárico	5.3E-04	0.000	1.1E-06	5.9E-04	5.6E-04	1.9E-05	0.000	0.000	2.2E-03
Ácido oleico	5.1E-03	0.000	6.8E-06	5.8E-03	5.4E-03	2.7E-04	0.000	0.000	2.1E-02
Ácido linoleico	9.2E-04	0.000	1.1E-06	1.0E-03	9.6E-04	2.5E-05	0.000	0.000	3.8E-03
Ácido mirístico	1.9E-04	0.000	0.000	2.1E-04	1.9E-04	1.4E-04	0.000	0.000	4.8E-04
Ácido láurico	2.3E-04	0.000	0.000	2.6E-04	2.4E-04	4.2E-04	0.000	0.000	0.000
Tripalmitin	1.4E-02	0.000	1.9E-05	1.6E-02	1.5E-02	4.1E-04	0.000	0.000	5.8E-02
TAG-P-01	7.2E-02	0.000	1.0E-04	8.1E-02	7.6E-02	2.1E-03	0.000	0.000	0.2978
TAG-P-02	6.2E-02	0.000	8.8E-05	6.9E-02	6.5E-02	1.8E-03	0.000	0.000	0.2566
TAG-P-03	2.6E-02	0.000	3.7E-05	2.9E-02	2.7E-02	7.6E-04	0.000	0.000	0.1076
TAG-P-04	2.4E-02	0.000	3.3E-05	2.7E-02	2.5E-02	7.0E-04	0.000	0.000	9.9E-02
Triolina	1.6E-02	0.000	2.3E-05	1.8E-02	1.7E-02	4.6E-04	0.000	0.000	6.6E-02
TAG-P-05	1.6E-02	0.000	2.2E-05	1.8E-02	1.6E-02	4.5E-04	0.000	0.000	6.5E-02
TAG-L-01	4.9E-03	0.000	0.000	5.5E-03	5.1E-03	8.9E-03	0.000	0.000	0.000
Trilaurina	5.8E-03	0.000	0.000	6.6E-03	6.1E-03	1.1E-02	0.000	0.000	0.000
TAG-L-02	2.7E-03	0.000	0.000	3.1E-03	2.8E-03	4.9E-03	0.000	0.000	0.000
TAG-L-03	3.3E-03	0.000	0.000	3.7E-03	3.5E-03	6.1E-03	0.000	0.000	0.000
CCLA	2.8E-03	0.000	0.000	3.1E-03	2.9E-03	5.1E-03	0.000	0.000	0.000

los equipos (Guillen-Cuevas *et al.*, 2018). Primero, el equipo de proceso fue categorizado de acuerdo con el tipo de unidad. Como se indica en la Tabla 2, todos los equipos instalados en unidades que involucran operaciones físicas y otras unidades peligrosas, se caracterizan principalmente por la transferencia de calor y de masa. El alcance de este trabajo se restringió solo a la desfrutadora, prensadora, decantador y secador, porque el contenido de agua de las corrientes en las otras unidades de procesamiento fue significativamente alto, y ningún tipo de riesgo puede cuantificar el índice FEDI para el agua.

Las propiedades de los productos químicos, como la temperatura del punto de inflamación, la del punto de ignición, la de autoignición y el calor de combustión, se encontraron en la hoja de datos de seguridad del material (MSDS) que está disponible en los sitios web de los proveedores y en la literatura (Bailey, 2005; Emmons & Atreya, 1982). El tamaño del equipo para todas las unidades se estimó de acuerdo con la capacidad de procesamiento cotizada por proveedores. Los pasos adicionales son el cálculo de los factores de energía para unidades que involucran operaciones físicas a través de las ecuaciones 1-2 y asignación de sanciones. La Tabla 3 resume los resultados de los pasos intermedios en el cálculo de FEDI, que se emplearon para determinar el potencial de daño.

El índice de incendio y explosión calculado para cada equipo de proceso, se informa en la Figura 4. La caracterización del peligro se realizó de acuerdo con el valor de FEDI. La mayoría de las unidades reportaron valores superiores a 400, que corresponden a la categoría altamente peligrosa. La causa de tales riesgos en este caso, podría ser el resultado de varios factores en cada unidad de proceso. En el desfrutado, las emisiones de material particulado durante la remoción de los racimos de fruta vacíos (cáscara), pueden causar posibles incidentes de incendio debido al polvo combustible. La inflamabilidad y otras propiedades potencialmente peligrosas del aceite de palma crudo (aceites vegetales en general), también presentan tales riesgos en su manejo. La adición de la corriente S17 en la segunda mezcla, aumentó la cantidad de agua que se usa en el decantador, lo que redujo el calor promedio de la combustión y, por lo tanto, los riesgos de incendio y explosión. Así, se esperaba que el decantador alcanzara el valor FEDI más bajo (349). La cuantificación de peligros similares fue realizada por Nezamodini *et al.* (2017), cuyo trabajo se centró en la evaluación de la seguridad del proceso de una fábrica de extracción de petróleo utilizando el índice de incendio y explosión de Dow. Ellos categorizaron la unidad de extracción como un riesgo grave (índice de incendio y explosión de DOW = 243,68) y, en consecuencia, requirieron una medida de corrección.

Tabla 2. Clasificación de unidades de proceso de la planta de beneficio de aceite de palma crudo.

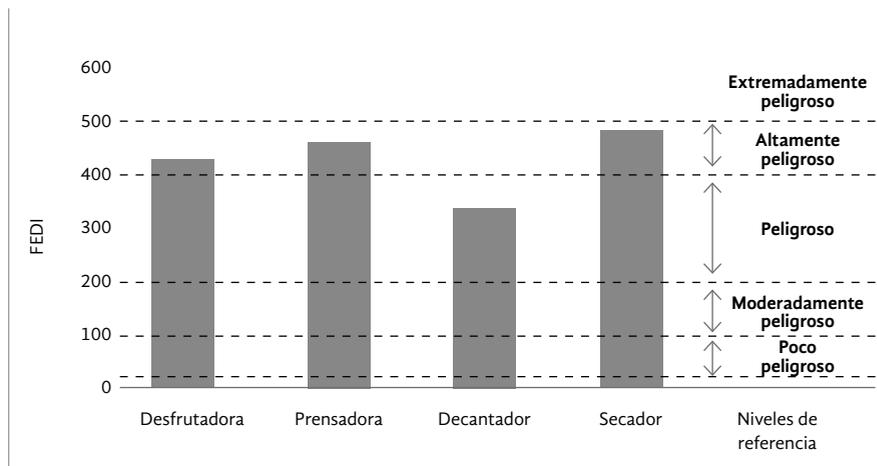
Unidades	Tipo de unidad según HIRA	Compuestos químicos	Tipo de peligro
Rehervidor	Otras unidades peligrosas	Agua	
Mezclador 1	Operaciones físicas	Agua, materiales lignocelulósicos*	-
Separador 1	Operaciones físicas	Agua, materiales lignocelulósicos*	
Separador 2	Operaciones físicas	Agua	-
Desfrutadora	Operaciones físicas	Materiales lignocelulósicos	Incendio & Explosión
Digestor	Operaciones físicas	Agua, materiales lignocelulósicos, aceite de palma*	-
Calentador	Operaciones físicas	Agua	
Prensadora	Operaciones físicas	Materiales lignocelulósicos, aceite de palma	Incendio & Explosión
Mezclador 2	Operaciones físicas	Agua, materiales lignocelulósicos*	-
Enfriador	Operaciones físicas	Agua, materiales lignocelulósicos*	
Decantador	Operaciones físicas	Aceite de palma	Incendio & Explosión
Centrífuga	Operaciones físicas	Agua	
Secador	Operaciones físicas	Aceite de palma	Incendio & Explosión

* Las corrientes de procesamiento en estas unidades son en su mayoría agua.

Tabla 3. Clasificación de unidades de proceso de la planta de beneficio de aceite de palma crudo.

Parámetros	Valores				
	Unidad	Desfrutadora	Prensa	Decantador	Secador
Factores de energía					
Factor "F1"		3.03E+05	3.78E+05	1.91E+05	4.86 E+05
Factor "F2"		1.17E+04	1.95E+04	1.93E+04	6.76E+03
Factores de severidad					
Penalidad "pn1"		1.1	1.1	1.1	1.1
Penalidad "pn2"		1.2	1.2	1.2	1.2
Penalidad "pn3"		1.1	1.1	1.0	1.0
Penalidad "pn4"		1.25	1.25	1.25	1.25
Penalidad "pn5"		1	1	1	1
Penalidad "pn6"		1.5	1.5	1.5	1.5

Figura 4. Resultados FEDI de la planta de beneficio de aceite de palma crudo.



Los peligros de explosión pueden ocurrir en el procesamiento de material lignocelulósico (por ejemplo, palma de aceite y madera), bajo la presencia de un agente iniciador de ignición, debido a la formación de una atmósfera explosiva con polvos de material. Por lo tanto, se esperaba un alto riesgo potencial de explosión en el caso de estudio seleccionado, y se propusieron algunos controles de seguridad o salvaguardas para evitar cualquier incidente. Dudarski *et al.*, (2015) sugieren estas correcciones para el procesamiento de madera, que también pueden considerarse para la extracción de CPO:

- Evitar la formación de atmósferas explosivas al eliminar las fuentes de emisión de polvo.
- Quitar las fuentes de ignición cuando es imposible eludir la emisión de polvo.

- Minimizar las posibles consecuencias de las explosiones.

Conclusiones

En este estudio, se realizó la evaluación de seguridad del proceso utilizando la herramienta asistida por computadora HIRA, con el objetivo de cuantificar los peligros potenciales en la producción de CPO. De igual forma, se identificaron posibles mejoras de procesos desde una perspectiva de seguridad. Se encontró que la mayoría de las unidades alcanzaron valores FEDI superiores a 400, que corresponden a la categoría altamente peligrosa, lo que indica riesgos potenciales de incendio y explosión. Tales resultados permitieron sugerir mejoras en la seguridad del proceso, relacionadas con la eliminación de las

fuentes de emisión de polvo durante la producción de CPO, al minimizar las emisiones de materia incorporando ciclones o precipitadores electrostáticos, bajo un control de gestión de seguridad de procesos bien establecido.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad de Cartagena por proporcionar el *software* de simulación requerido para llevar a cabo esta investigación.

Referencias

- Sunaryo, & Hamka, M. A. (2017). Safety Risks Assessment on Container Terminal Using Hazard Identification and Risk Assessment and Fault Tree Analysis Methods. *Procedia Engineering*, 194, 307–314. doi:10.1016/j.proeng.2017.08.150
- Ahmad, F. B., Zhang, Z., Doherty, W. O. S., & O Hara, I. M. (2019). The outlook of the production of advanced fuels and chemicals from integrated oil palm biomass biorefinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109(3), 386–411. doi:10.1016/j.rser.2019.04.009
- Bailey, A. E. (2005). *Bailey's industrial oil & fat products*. John Wiley & Sons, Inc.
- Castiblanco, C., Moreno, A., & Etter, A. (2015). Impact of policies and subsidies in agribusiness: The case of oil palm and biofuels in Colombia. *Energy Economics*, 49, 676–686.
- Chavalparit, O., Rulkens, W. H., Mol, A. P. J. & Khaodhair, S. (2006). Options for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystems. *Environment, Development and Sustainability*, 8, 271–287. doi:10.1007/s10668-005-9018-z
- Dudarski, G., Kowal, M., & Stochowski, C. Z. (2015). Dust explosion hazard in wood processing. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 65(90), 61–65.
- Guillen-Cuevas, K., Ortiz-Espinoza, A. P., Ozinan, E., Jimenez-Gutierrez, A., Kazantzis, N. K., & El-Halwagi, M. M. (2018). Incorporation of Safety and Sustainability in Conceptual Design via a Return on Investment Metric. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(1), 1411–1416. doi:10.1021/acssuschemeng.7b03802.
- Inyang, J., Andrew-Munot, M., Tarmizi, S., Shazali, S., & Tanjong, S. J. (2019). A Model to Manage Crude Palm Oil Production System. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 255, pp. 1–7).
- Jafari, M. J., Mohammadi, H., Reniers, G., Pouyakian, M., Nourai, F. Torabi, S. A. & Raffie Miandashti, M. (2018). Exploring inherent process safety indicators and approaches for their estimation : A systematic review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 52(December 2017), 66–80. doi:10.1016/j.jlp.2018.01.013.
- Kamarden, H., Kidam, K., Hassan, O. & Hashim, H. (2014). An Investigation Into the Need of Process Safety Management (PSM) in the Palm Oil Industry. *Applied Mechanics and Materials*, 625, 458–461. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.625.458.
- Owolarafe, O., & Faborode, M. (2008). Microstructural characterization of palm fruit at sterilization and digestion stages in relation to oil expression. *Journal of Food Engineering*, 85(4), 598–605.
- Rincón, L. E., Moncada, J., & Cardona, C. A. (2014). Analysis of potential technological schemes for the development of oil palm industry in Colombia : A biorefinery point of view. *Industrial Crops & Products*, 52, 457–465. doi:10.1016/j.indcrop.2013.11.004

- Rincón, L. E., Valencia, M. J., Hernández, V., Matallana, L. G., & Cardona, C. A. (2015). Optimization of the Colombian biodiesel supply chain from oil palm crop based on techno-economical and environmental criteria. *Energy Economics*, 47, 154–167. doi:10.1016/j.eneco.2014.10.018
- Nezamodini, Z. S, Rezvani, Z., & Kian, K. (2017). Dow's fire and explosion index: a case-study in the process unit of an oil extraction factory. *Electron Physician*, 9(2), 3878–3882.
- Sukaribin, N., & Khalid, K. (2009). Effectiveness of sterilisation of oil palm bunch using microwave technology. *Industrial Crops and Products*, 30(2), 179–183. doi:10.1016/j.indcrop.2009.05.001
- Syahro, N., Yunus, R., Abidin, Z. Z., Syafiie, S., Ramanaidu, V & Rashid, U.(2016). Effect of high pressurized sterilization on oil palm fruit digestion operation Effect of high pressurized sterilization on oil palm fruit digestion operation. *International Food Research Journal*, 23(1), 129–134.
- Emmons, H. W., & Atreya, A. (1982). The science of wood combustion. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences*, 5, 259–268.
- Lau, S. Y., Phuan, S. Lee, S., Danquah, M. K., & Acquah, C. (2019). Sustainable palm oil refining using pelletized and surface-modified oil palm boiler ash (OPBA) biosorbent. *Journal of Cleaner Production*, 230, 527–535. doi:org/10.1016/j.jclepro.2019.04.390.
- Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil e innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*, 14(1), 87–93. doi:10.1016/j.jclepro.2004.07.005