

Artículo de Investigación

## Aguas agrias en el procesamiento de crudos pesados: caracterización fisicoquímica y prognosis de su impacto ambiental

### *Sour waters in heavy crude oil processing: physicochemical characterization and prognosis of its environmental impact*

Guillermo Centeno-Bordones <sup>1\*</sup>, Henry Labrador <sup>2</sup>, Guillermo Lara Moreno <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Ambiente, Biología y Química, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2005

<sup>2</sup> Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD), Departamento de Química, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2005; hjladrad@uc.edu.ve

<sup>3</sup> Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo, (PDVSA-Intevep), Pericia de Manejo de Desechos Peligrosos y Restauración de Ecosistemas Terrestres, Los Teques, Venezuela; guillermolara27@gmail.com

\*Correspondencia: gcenteno1@uc.edu.ve

Citación: Centeno-Bordones, G., Labrador, H., & Lara, G., (2021). Aguas agrias en el procesamiento de crudos pesados: caracterización fisicoquímica y prognosis de su impacto ambiental. *NovasinerGía*. 4(1). 115-135. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07>

Recibido: 06 diciembre 2020

Aceptado: 07 abril 2021

Publicado: 01 junio 2021

NovasinerGía  
ISSN: 2631-2654

**Resumen:** El objetivo de este estudio fue realizar una prognosis del impacto ambiental de las aguas agrias que resultan del mejoramiento de crudos pesados y extrapesados. Para lograr el objetivo se determinó la concentración total de hidrocarburos de petróleo (TPH) y los valores de la demanda química de oxígeno (DQO). De igual manera se determinaron los compuestos orgánicos en el agua agria mediante Cromatografía de Masa Acoplado a Masa (GC-MS). También, se determinó el contenido de metales pesados por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP). La concentración de H<sub>2</sub>S disuelto se determinó mediante la técnica potenciométrica de estandarización del Na<sub>2</sub>S. La evaluación de impacto ambiental (EIA) se realizó mediante una matriz causa-efecto (Matriz de Leopold). Como resultado se obtuvo una concentración de TPH de 99 ppm, DQO 18100 ppm y 24000 ppm de H<sub>2</sub>S. Estas concentraciones son superiores a los niveles máximos permitidos por la normativa venezolana para el vertido en plantas y masas de agua y por la normativa de seguridad y salud laboral. Así, estos residuos son tóxicos y tienen un alto impacto ambiental. Los factores ambientales más agredidos son el suelo, las aguas superficiales y subterráneas; mientras que las actividades más agresivas fueron el proceso de mejoramiento del crudo, en la reactividad por sulfuro, la corrosividad por pH, y la vulnerabilidad en el almacenamiento de estas aguas a cielo abierto, por su alto contenido de materia orgánica e inorgánica potencialmente tóxica.

**Palabras clave:** Agresores ambientales, crudos extrapesados, efluentes petroleros, factores ambientales vulnerables, industria petrolera, riesgo ambiental

**Abstract:** The objective of this study was to make a prognosis of the environmental impact of sour water resulting from the upgrading of heavy and extra-heavy crude oil. We determined the total concentration of petroleum hydrocarbons (TPH) and the chemical oxygen demand (COD) to achieve this objective. Likewise, the organic compounds in the sour water were determined by GC-MS (GC-Mass Coupled Mass Chromatography). The heavy metal content was also determined by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP). The concentration of dissolved H<sub>2</sub>S was determined by the potentiometric Na<sub>2</sub>S standardization technique. These concentrations are higher than the maximum levels allowed by Venezuelan regulations for discharge in water plants and water bodies and by occupational health and safety regulations. Thus, these wastes are toxic and have a high environmental impact. The environmental impact assessment (EIA) was carried out using a cause-effect matrix (Leopold Matrix). The result was a TPH concentration of 99 ppm, COD of 18100 ppm, and 24000 ppm of H<sub>2</sub>S. The environmental factors most affected were the soil, surface water, and groundwater. At the same time, the most aggressive activities were the crude oil upgrading process, sulfur reactivity, pH corrosivity, and vulnerability in the storage of these waters in the open air due to their high content of potentially toxic organic and inorganic matter.

**Keywords:** Environmental aggressors, environmental risk, extra heavy crude oil, oil effluents, oil industry, vulnerable environmental factors



**Copyright:** 2021 derechos otorgados por los autores a NovasinerGía. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introducción

Actualmente la mayor parte de los recursos petroleros y energéticos de Venezuela provienen de hidrocarburos pesados (CP) y extrapesados (XP), por esta razón la compañía petrolera nacional desea explotar estos hidrocarburos, por lo que ha enfocado sus esfuerzos en la investigación, producción y mejoramiento de este tipo de hidrocarburos (Alboudwarel *et al* 2006). Para el desarrollo de la explotación de hidrocarburos existen diferentes métodos y técnicas para llevar a cabo la extracción y mejoramiento de los crudos. Los mejoradores experimentales de crudos pesados (CP) y extrapesados (XP) de Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA) generan en sus plantas pilotos un efluente denominado aguas agrias, la cual no cumple con las condiciones paramétricas nacionales establecida en la norma venezolana de vertidos de aguas residuales (Decreto 883, 1995). Estas aguas generan un problema logístico y ambiental para la organización, ya que son almacenadas en barriles de metal y plástico, mientras se envían a las refinerías para ser reinyectadas en los procesos.

El contenido de estas aguas es altamente tóxico, debido a la gran cantidad de materia orgánica e inorgánica que contiene (Guimaraes *et al.*, 2012). Estas dos características representan un problema en caso de fuga o derrame, debido a que impactaría considerablemente en los factores bióticos y abióticos, que entren en contacto con estos efluentes. También se encuentra en riesgo el personal que realiza la manipulación de dichos contenedores.

Una estrategia para comprobar si los proyectos llevados a cabo por una empresa pudiesen generar un impacto ambiental es la matriz de causa-efecto, conocida como matriz de Leopold, técnica cualitativa de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Tiene un carácter fundamentalmente preventivo, porque permite identificar actividades que posiblemente modifique el medio ambiente (Coria, 2008). La información que brinda la EIA permite analizar las consecuencias ambientales de un proyecto o actividad antropogénica, cuando es unido a una valoración social y económica definen las decisiones sobre la viabilidad del mismo (Perevochtchikova, 2013). Uno de los métodos más utilizados para realizar la EIA la matriz causa-efecto o de interacción, donde se cruzan las acciones humanas con los indicadores de impacto ambiental, y son muy útiles para identificar el origen de los diferentes impactos causados a un ecosistema (Álvarez *et al.*, 2007).

La industria petrolera es una de las actividades humanas con mayor impacto ambiental, por tal motivo es conocida la aplicación de los EIA en sus actividades, un ejemplo de ello es el estudio desarrollado por Cuellar *et al.*, (2004) ante un derrame costero en México, determinando mediante análisis biofísicoquímicos y matriz de Leopold, que los efectos de los derrames petroleros en los componentes del ecosistema estudiado, se consideran puntuales, pero no se ha establecido la magnitud de los efectos a largo plazo. Por lo que los investigadores antes mencionados consideran que es difícil distinguir el impacto ambiental atribuible a la industria petrolera en la región, de aquellos causados por factores naturales (cambios climáticos, hidrográficos, aflojamientos naturales de petróleo) e impactos antropogénicos (pesca comercial, contaminaciones industriales, y otros). La aplicación de esta metodología permitió conocer el impacto ambiental actual del tratamiento de aguas de producción en la empresa Ecopetrol y de aquellas tecnologías que implementan para reducir al máximo los contaminantes de las aguas residuales industriales en la industria colombiana (Vargas-Guarín, 2020).

El objetivo de este estudio fue realizar una prognosis del impacto ambiental de las aguas agrias que resultan del mejoramiento de crudos pesados y extrapesados. Para lograr el objetivo se determinó la concentración total de hidrocarburos de petróleo (TPH) y los valores de la demanda química de oxígeno (DQO). De igual manera se determinaron los compuestos orgánicos en el agua agria mediante Cromatografía de Masa Acoplado a Masa (GC-MS). También, se determinó el contenido

de metales pesados por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP). La concentración de H<sub>2</sub>S disuelto se determinó mediante la técnica potenciométrica de estandarización del Na<sub>2</sub>S. La evaluación de impacto ambiental (EIA) se realizó mediante una matriz causa-efecto (Matriz de Leopold)

## 2. Metodología

En la figura 1 se observa la ruta metodológica a seguida para el desarrollo de la investigación.

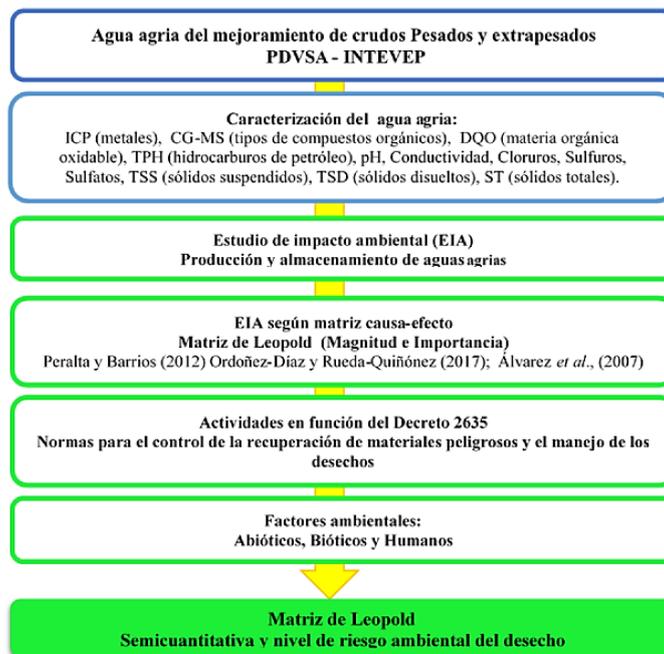


Figura 1: Diagrama metodológico para el estudio de impacto ambiental de las aguas agrias.

### 2.1. Caracterización de las aguas agrias

La muestra de agua agria se tomó de un proceso de mejoramiento de CP y XP de las plantas piloto del Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (PDVSA-Intevep). En el proceso de caracterización se aplicó diferentes técnicas analíticas que se observan en la tabla 1, especificando la marca y modelo del instrumento utilizado.

### 2.2. Evaluación del impacto ambiental mediante matriz causa - efecto (Matriz de Leopold)

La evaluación y valoración de los impactos socio-ambientales, se realizó tomando en cuenta la información recolectada por las técnicas de caracterización fisicoquímica aplicada a la muestra, y de acuerdo con la metodología propuesta por Peralta y Barrios (2012) y Ordoñez-Díaz y Rueda-Quiñónez (2017), para la cuantificación de la matriz de causa-efecto, se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

- Se identificaron las actividades principales del proceso que podrían generar un impacto ambiental (Columnas), como las fases de generación, identificación, caracterización y almacenamiento de las aguas agrias.
- Se identificaron los impactos ambientales asociados con estas actividades (Filas), tomando en cuenta tres factores principales el abiótico, el biótico y humano.

- La intersección entre una actividad y su impacto ambiental, se representa con una x en la celda pertinente. Posteriormente, se califica la magnitud e importancia del impacto como se aprecia en la tabla 2. Para determinar el valor de cada celda se deben multiplicar las dos calificaciones.
- Una vez obtenidos los valores para cada celda, se procede a determinar cuántas acciones del proceso afectan el ambiente y cuántos elementos del ambiente son afectados por el proceso, desglosando la información en positivos y negativos.
- Una vez calificadas todas las celdas relevantes, se hace una sumatoria algebraica con su respectiva media aritmética de cada columna y cada fila, para poder registrar el resultado final que permita determinar cuán beneficiosa o nociva es la acción propuesta y cuán beneficiado o perjudicado al factor ambiental (Ordoñez-Díaz y Rueda-Quiñónez, 2017; Álvarez *et al.*, 2007).

Tabla 1: Técnicas de caracterización fisicoquímica aplicada a las aguas agrias.

Técnica	Parámetro	Instrumento	Marca y Modelo
pH		pH metro digital	Orión 330 Thermo
Conductividad		Multiparámetro	WTW Tetracon 325 Cond 197i
Sólidos disueltos, suspendidos y totales	Standard Methods 2540D, (1998)	Balanza Analítica	Mettler-Toledo 3300
Demanda Química de Oxígeno método HACH		Estufa	JP Selecta 36L
Hidrocarburos totales de petróleo	EPA 8015, (2000)	Reactor abierto y espectrofotómetro	HACH DR2010
Concentración de sulfuros utilizando la técnica de estandarización del Na <sub>2</sub> S (Avantor VWR al 98%)	ASTM D 4658-03	Espectrofotómetro de fluorescencia ultravioleta	Sitelab: EDRO:16
Concentración de Sulfatos método HACH y	EPA 375.4	Electrodo selectivo de iones sulfuro	Thermo Scientific Orion silver/sulfide electrode
Espectroscopia de Plasma Inducido acoplado a Masa (ICP-MS)	EPA 6020B (revisión 2, Julio 2014)	pHmetro con escala expandible a mV	ThermoScientificOrion, 5-Star
		Reactor espectrofotómetro	HACH8051-SulfaVer4
Cromatografía de Gases acoplado a masa	ASTM D5790-95 (2012) ensayo normalizado para medidas de compuestos orgánicos purgables en agua por columna capilar de GC-MS.	ICP-MS	Agilent Technologies 7500ce con las siguientes características: Frecuencia: 27,12 MHz Potencia RF: máximo 1600 W Antorcha: tipo Fassel.
Microextracción en fase sólida		GC-MS	Agilent Technologies 6890N
		Columna C-18 (de polidimetilsiloxano) , usándose como agente de activación de la columna metanol (Merk) y como disolvente diclorometano (Sigma Aldrich)	SUPELCO-SPME
Concentración de Cloruros	Standard Methods 4500 Cl-B, (1995)	Técnica Iodométrica	

Tabla 2: Calificación de la magnitud e importancia del impacto ambiental en la matriz de Leopold.

Impactos negativos					
Intensidad	Magnitud Afectación	Calificación	Duración	Importancia Influencia	Calificación
Baja	Baja	-1	Temporal	Puntual	+1
Baja	Media	-2	Media	Puntual	+2
Baja	Alta	-3	Permanente	Puntual	+3
Media	Baja	-4	Temporal	Local	+4
Media	Media	-5	Media	Local	+5
Media	Alta	-6	Permanente	Local	+6
Alta	Baja	-7	Temporal	Regional	+7
Alta	Media	-8	Media	Regional	+8
Alta	Alta	-9	Permanente	Regional	+9
Muy alta	Alta	-10	Permanente	Nacional	+10
Impactos positivos					
Intensidad	Magnitud Afectación	Calificación	Duración	Importancia Influencia	Calificación
Baja	Baja	+1	Temporal	Puntual	+1
Baja	Media	+2	Media	Puntual	+2
Baja	Alta	+3	Permanente	Puntual	+3
Media	Baja	+4	Temporal	Local	+4
Media	Media	+5	Media	Local	+5
Media	Alta	+6	Permanente	Local	+6
Alta	Baja	+7	Temporal	Regional	+7
Alta	Media	+8	Media	Regional	+8
Alta	Alta	+9	Permanente	Regional	+9
Muy alta	Alta	+10	Permanente	Nacional	+10

### 3. Resultados

#### 3.1. Caracterización fisicoquímica de las aguas agrias

En la tabla 3 se observan los resultados obtenidos a partir de las técnicas analíticas aplicadas al agua agria, destacándose la cantidad de materia orgánica contaminante expresada en DQO y TPH, así como el contenido de sólidos en la misma. Dentro de los resultados también se tiene el contenido de salino siendo relevante la cantidad de cloruros y sulfuros en los efluentes. La cantidad de metales se muestran en la tabla encontrándose metales pesados típicos de la Faja Petrolífera del Orinoco, zona con la mayor reserva con este tipo de crudos. La cantidad de materia orgánica fue determinada mediante GC-MS, evidenciando que estas aguas forman una matriz compleja de contaminantes.

Tabla 3: Caracterización del agua agria mediante diferentes técnicas analíticas.

Técnica analítica	Valor
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	18100 ± 1 ppm
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	99,000 ± 0,001 ppm
pH	10,50 ± 0,01
Conductividad	2,80 ± 0,1 µS/Cm
Turbidez	35,99 ± 0,01 NTU
Sólidos disueltos	7878 ± 1 ppm
Sólidos suspendidos	7476 ± 1 ppm
Sólidos totales	15354 ± 1 ppm
Cloruros	86,01 ± 8,60 ppm
Sulfato	1,19 ± 0,010%
Sulfuro	2,4 ± 0,01%
Metales por ICP-MS	Ni, V, Mo, Cu, Mn, Fe : 1 ± 0,05 ppm Ca: 5,26 ± 0,05 ppm K: 612,00 ± 0,05 ppm Mg: 3,96 ± 0,05 ppm Na: 142,00 ± 0,05 ppm
Compuestos orgánicos por GC-MS	<b>Azufrados:</b> tiofeno, metanotiol, etanotiol. <b>Nitrogenados:</b> Pirrolina, dimetil-pirrolina, propanonitrilo, o-amino-tolueno, 2,4-dimetil-piridina, dimetil-pirrol, 1, 2, 3-trimetil-pirrol. <b>Carbonilos:</b> acetona, butanona, 3-hexanona, 2-hexanona. <b>Aromáticos:</b> fenol. <b>Otros:</b> 2-etil-1-octeno, 2,3-dimetil-hexeno.



Tabla 5: Estudio causa- efecto del impacto ambiental del agua agria proveniente del mejoramiento de crudos pesados y extrapesados

Elementos y características ambientales		Actuaciones causantes de posibles impactos ambientales del Agua Agria Petroleras		C. Caracterización										Total	Media Aritmética
		A. Generación	B. Identificación	1. Etiketado		2. Compuestos Orgánicos		3. NOx, SOx y COx		4. Sólidos precipitados		5. Corrosividad por pH			
		1. Mejoramiento de crudo pesado	1. Etiketado	1. Metales	2. Compuestos Orgánicos	3. NOx, SOx y COx	4. Sólidos precipitados	5. Corrosividad por pH	6. Reactividad por sulfuros	1. Patios a cielo abierto	2. Almacén Cerrado				
Factores Abióticos	1. Suelo	a. Capa superficial	-18	0	-27	-16	-35	-16	-27	-30	-30	-14	-213	-21,3	
		b. Capa intermedia (subsuelo)	-24	0	-36	-24	-42	-24	-36	-40	-40	-21	-287	-28,7	
	2. Agua	a. Superficiales	-80	0	-42	-63	-35	-49	-80	-80	-35	-20	-484	-48,4	
		b. Acuíferos	-70	0	-35	-48	-3	-25	-42	-42	-24	-15	-304	-30,4	
Factores bióticos	3. Aire	a. Troposfera baja	-42	0	0	0	-49	0	0	-50	-50	-15	-206	-20,6	
		b. Troposfera	-30	0	0	0	-30	0	0	-24	-24	-10	-118	-11,8	
	4. Flora	a. Cobertura vegetal	-30	0	-18	-27	-8	-24	-28	-27	0	0	-162	-16,2	
		b. Vegetación acuática	-70	0	-28	-36	-20	-36	-32	-36	0	0	-258	-25,8	
	5. Fauna	a. Terrestres	-16	0	-27	-14	-20	-16	-16	-27	-27	-12	-175	-17,5	
		b. Avifauna	-42	0	0	0	-35	0	0	-36	-36	-18	-167	-16,7	
Factor Humano	6. Calidad de vida	e. Especies acuáticas	-63	0	-42	-48	-24	-42	-54	-54	-28	-20	-321	-32,1	
		a. Personal técnico calificado	-81	-10	0	-10	-15	-10	-21	-27	-27	-25	-226	-22,6	
		b. Comunidades circundantes	-20	0	0	-20	-20	0	-35	-35	-35	-25	-190	-19,0	
	c. Comunidad interna	-21	0	0	-24	-15	0	-35	-27	-27	-25	-174	-17,4		
Total		-607	-10	-255	-330	-351	-242	-406	-535	-383	-220				
Media Aritmética		-43,3	-0,7	-18,2	-23,5	-25,0	-17,2	-29,0	-38,2	-27,3	-15,7				

## 4. Discusión

### 4.1. Caracterización fisicoquímica de las aguas agrias

Las técnicas de análisis aplicadas a las aguas agrias se pueden apreciar en la tabla 3, donde se observan que la DQO fue de 18100 mg/L y la cantidad de TPH fue 99 ppm. Estos valores son una referencia de la cantidad de materia orgánica en el agua, estos valores indican que las aguas poseen un alto nivel de contaminación, debido al arrastre de materia orgánica de baja masa molar durante el proceso de mejoramiento de los crudos. El valor de conductividad en el efluente está relacionado a la cantidad de cloruros presentes en las aguas connatas (aguas de formación) o al contenido salino del petróleo. Estas aguas de producción no pueden ser eliminadas por completo del crudo en el proceso de desalación, por lo que la presencia de cloruros puede también deberse a la cantidad de

sales contenidas en el los CP y XP debido a sus características de formación, como sostiene Alboudwarej *et al.*, (2006).

En el agua agria se determinó una cantidad considerable de sólidos suspendidos y totales, siendo la mayoría de ellos compuestos orgánicos precipitables y azufre ( $S_8$ ), esto a su vez guarda relación con el valor de turbidez en la muestra. La cantidad de metales presentes fueron determinados mediante ICP, se observó que la concentración de los metales de transición es de 1 ppm. Adicionalmente se obtuvo metales característicos asociados al petróleo venezolano de la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) como el vanadio (V), manganeso (Mn) y hierro (Fe) (González y Núñez, 2008). También se determinó que existe una mayor cantidad de metales alcalinos y alcalinotérreos típicos de la litología arenosa de la zona, y de las sales presentes en las aguas connatas como el potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Los minerales presentes en la litología de la FPO, van a justificar el contenido de metales determinados mediante la técnica analítica, debido a que estos metales se encuentran algunos enlazados a la matriz orgánica debido a los enlaces carbono-metal, como demostró Castro *et al* (2019). El pH presente en las muestras fue de 10.5 debido a que el vapor condensado arrastra amonio, amoníaco y el alto contenido de metales alcalinos (Noguera y Lara, 2013).

En la tabla 3, se observan las especies orgánicas identificadas en el efluente, como: tioles, aminas, carbonilos, aromáticos y alifáticos. Los compuestos están estrechamente relacionados con la cantidad de DQO y TPH medidos a la muestra. La presencia de los compuestos orgánicos en el agua agria, se debe a que el vapor de agua es condensado en presencia de compuestos orgánicos de bajo punto de ebullición, en los diferentes procesos del mejoramiento (Noguera *et al.*, 2012). Las pirrolinas encontradas en las aguas agrias se deben mayormente a partes de los asfáltenos producto las reacciones de HDT son fragmentado liberando moléculas de menor masa molecular y en el caso del asfalteno, el nitrógeno se encuentra como parte de los aromáticos (Velásquez, 2012). La identificación de compuestos fenólicos supone que pueden ser generadas en las unidades de hidrotreamiento o viscoreducción, que se caracterizan por un elevado contenido de fenoles (Noguera *et al.*, 2012; Castro *et al.*, 2019).

El azufre (S) está presente en el gas natural y el crudo de la FPO formando compuestos orgánicos azufrados como sulfatos, tioles o mercaptanos, tiofenos y benzotiofeno (Castro *et al.*, 2019), estas sustancias presentes en el crudo son las principales fuentes de  $S^{2-}$  debido a que el CP y XP cuando es tratado con un HDT experimental, reacciona con los compuestos orgánicos azufrados mediante una Hidrodesulfuración (HDS) formando hidrocarburos y  $H_2S$  (Barbosa *et al.*, 2014). Una forma de eliminar este compuesto del proceso de HDH es mediante la condensación del vapor, el cual arrastra el  $H_2S$  y es disuelto en el agua (Noguera y Lara, 2013). Como se observa en la tabla 3, la concentración de sulfuro de las muestras de agua agria está en un promedio de 2,40 %, es decir, 24000 ppm. La concentración de  $H_2S$  disuelto en el agua es debido a la relación  $H_2O:H_2S$  que se produce en el proceso de mejoramiento, el primero por la formación de  $H_2O$  de las reacciones de Hidrodesoxigenación (HDO) y separadas mediante el proceso de destilación. El  $H_2S$  producto de las reacciones de HDS que ocurren en el mejoramiento del CP y XP.

El crudo de la FPO, posee un alto contenido de azufre debido a tres condiciones principales para la sulfuración de la materia orgánica según Amrani (2014):

Primero, el reactivo reducido de S debe estar disponible. Por lo general, esto implica que la actividad de las bacterias sulfato reductoras reducirán el  $SO_4^{2-}$  a  $S^{2-}$ , e inmediatamente este último podría reaccionar con la fase mineral del yacimiento o incorporarse a la fase orgánica del crudo (Damsté *et al.*, 1998; Werne *et al.*, 2003).

Segundo, las concentraciones de iones metálicos libres, especialmente hierro, deben ser bajas. El hierro elimina rápidamente S que lo que puede reaccionar con la materia orgánica, aunque puede ser posible la formación simultánea de S orgánico y sulfuro de hierro. Esto va depender de los ambientes siliciclásticos (ricos en arcillas) donde la disponibilidad de reaccionar con el Fe y Zn disponible demandan el S<sup>2-</sup> formando pirita (FeS<sub>2</sub>), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) y blenda (ZnS), cuando esta demanda disminuye el S<sup>2-</sup> tiene la posibilidad de incorporarse a la materia orgánica del crudo y del querógeno (Amrani, A. 2014; Vairavamurthy, y Mopper, 1987).

En tercer lugar, en ambientes carbonáticos (pobres en iones de Fe), la disponibilidad de metales es limitada, por lo que el azufre generado por los microorganismos podría acumularse en condiciones anóxicas favoreciendo la incorporación del S<sup>2-</sup> en la materia orgánica (Amrani, A. 2014; Werne *et al.*, 2003; Vairavamurthy y Mopper, 1987). Se ha determinado que el azufre está presente en las 3 fases de la producción (petróleo-arenas-gas); por lo que son estos tres componentes los principales responsables de la generación de H<sub>2</sub>S en la producción y refinación del petróleo venezolano (Castro *et al.*, 2019).

#### 4.2. Evaluación del Impacto Ambiental del Agua Agria

Para el EIA, se construyó la matriz de causa- efecto, tomando en cuenta que las actividades causantes de un posible impacto ambiental en la producción y almacenamiento de las aguas agrias son: la generación del efluente (A), la identificación del envase de almacenamiento (B), la caracterización del efluente (C) y las condiciones de almacenamiento (D). Los elementos del ecosistema que pudiesen resultar dañados por algún posible derrame de estas aguas son: los factores abióticos, el factor biótico y humano. El cruce entre cada uno de ellos se realizó tomando en cuenta los componentes principales que se encuentran en la Tabla 4. La relación existente entre las actividades de producción, almacenamiento de las aguas agrias y los componentes del ecosistema, se marcan con una X.

##### 4.2.1. Generación del efluente (A)

La generación del efluente parte del proceso de mejoramiento de CP y XP en las instalaciones experimentales del centro de investigaciones de la industria petrolera nacional.

##### *Mejoramiento de crudos pesados (CP) y extrapesados (XP) (A1)*

Una de las tecnologías de prueba involucra un catalizador a base de hierro o molibdeno dispersados por medio de un emulsión y una mezcla con un material sólido (por ejemplo, coque) con un tamaño de partícula específico que ayuda a controlar la formación de espuma, promoviendo así la fase líquida y mejorar la distribución radial del hidrógeno inyectado (Bellussi *et al.*, 2013; Negretti *et al.*, 2009). Logrando que las moléculas más complejas se rompan y formen compuestos orgánicos de menor tamaño, permitiendo un aumento de los grados API del crudo y la recuperación del residuo de vacío.

Otra de las técnicas de mejoramiento de crudos se fundamenta en el nivel de transferencia de hidrógeno del agua, para acercarse al proceso de hidrocrackeo moderado (Pereira *et al.*, 1999). Donde el agua puede utilizarse como reactivo para transferir su hidrógeno al CP y XP y así aumentar los grados API. En este caso se utiliza el agua para producir hidrógeno por la vía del vaporeformado catalítico, reemplazando el hidrógeno gaseoso en esta aplicación.

Ambos procesos producen aguas agrias como subproducto para la sorción de compuestos con heteroátomos presentes en el crudo como: sales, H<sub>2</sub>S y amoníaco, además de compuestos orgánicos

que son arrastrados y separados del proceso en medio acuoso. Estas aguas pueden ser despojadas de azufre y reinyectadas al sistema de refinación en forma de vapor de baja, media y alta presión (Bellussi *et al.*, 2013). Para objeto d este estudio se analiza las aguas agrias generadas por la primera técnica de mejoramiento de crudos, debido a que es la unidad experimental que se encuentra en funcionamiento y genera una considerable cantidad de estas aguas.

### *Impacto de Generación del efluente*

#### *Impacto de los factores abióticos*

La generación de las aguas agrias podría afectar los factores abióticos, esto se manifiesta en el suelo impactando la capa superficial (F1a) y el subsuelo (F1b) por la incorporación de compuestos orgánicos (Ac2) e inorgánicos (Ac1), que comprometen el comportamiento fisicoquímico del mismo (Vílchez-Fernández y Ulloa-Carcasés, 2015). Estas aguas de producción son también un factor de contaminación para las aguas superficiales (F2a) y los acuíferos (F2b) (Moronta-Riera y Riverón-Zaldívar, 2016). En el aire el impacto del mejoramiento de CP y XP se produce por la liberación de H<sub>2</sub>S (Ac6) y COV, que afectan la calidad del aire en la troposfera baja (F3a) y en la troposfera (F3b).

#### *Impacto de los factores bióticos*

La afectación en los factores bióticos sería a la cobertura vegetal (F4a), y la vegetación acuática (F4b) (Machado-Allison, 2017). El impacto de estas aguas de producción a la fauna se manifiesta por la afectación a especies terrestres (F5a), avifauna (F5b) y las especies acuáticas (F5c) del lugar (Rodríguez, 2001).

#### *Impacto en los factores humanos*

El impacto de la producción del efluente en los factores humanos, se evidenciaría principalmente en la calidad de vida de los operadores de las refinerías (F6a), la comunidad interna (F6c) por la emanación de olores (H<sub>2</sub>S). La posible liberación de este compuesto en la industria, afecta principalmente la salud y pudiera causar la muerte del personal que labora en la empresa (Portillo *et al.*, 2008).

#### *4.2.2. Identificación del envase de almacenamiento (B)*

Es el proceso mediante donde se describen las características de una sustancia o desecho mediante una etiqueta, según su composición fisicoquímica o factores de riesgo de la sustancia. De acuerdo con el Decreto 2635 (1998), en su artículo 17 establece las condiciones que debe tener el envase de almacenamiento, así como el material del envase con sus características de resistencia a los efectos del desecho, y condiciones para que no represente riesgos de fuga.

#### *Etiquetado (B1)*

Los materiales peligrosos recuperables y desechos peligrosos deben ser identificados, los elementos de identificación deben poseer la siguiente información: Nombre del desecho, cantidad, fecha de generación, generador responsable, proceso que lo generó (Decreto 2635, 1998).

#### *Impacto de la identificación*

El proceso de etiquetado de los envases contenedores de agua agria pudiera tener un impacto en el factor humano específicamente en el personal técnico calificado debido a la manipulación de los envases y su posible contacto con el efluente.

#### 4.2.3. *Caracterización (C)*

Se refiere a la determinación de las propiedades y características fisicoquímicas que puede presentar un material o compuesto, en la tabla 2 se observa la caracterización de estas aguas mediante diferentes técnicas analíticas.

##### *Metales (C1)*

El análisis químicos por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) a las aguas agrias, arrojó que los metales presentes en la muestra son: Ni, V, Mo, Cu, Ca, K, Mg, Mn, Fe y Na. Este análisis mostró cuales se encuentran en mayor proporción son: K, Na y Ca (Tabla 3).

##### *Compuestos Orgánicos (C2)*

Con respecto a la caracterización cualitativa de los compuestos orgánicos presentes en el agua agria, determinados a través de una CG-MS para Caracterización de Muestras Híbridas, dio como resultado compuestos orgánicos como: tioles, aminas, carbonilo, aromáticos, alifáticos y otros (Tabla 3). Esta mezcla de componentes orgánicos hace de estas aguas una matriz compleja para su almacenamiento y tratamiento.

##### *Liberación NOx, SOx y COx (C3)*

Una de las principales fuentes de contaminación atmosférica son los procesos industriales petroleros, generan dióxido y monóxido de carbono (COx), óxidos de nitrógeno (NOx) y de azufre (SOx), entre otros contaminantes en sus procesos de refinación (Álvarez y Linares, 2015; Zamora y Ramos, 2010).

##### *Sólidos precipitados (C4)*

Las muestras en estudio cuando se encuentran en almacenamiento presentan la formación de sólidos de azufre y compuestos orgánicos. Además, presentan una alta cantidad de sólidos disueltos y totales formados por compuestos orgánicos de alta masa molecular (Tabla 3).

##### *Corrosividad por pH (C5)*

Las aguas agrias causan el deterioro del material de almacenamiento (envases de hierro y plástico) a consecuencia de un ataque electroquímico a los envases metálicos, propiciado por el pH 10 (Tabla 3), y en el caso de los envases plásticos se combinan este factor con el envejecimiento a la intemperie del material.

##### *Reactividad con sulfuros (C6)*

Los efluentes presentan alto contenido de sulfuro con una concentración de 24000 ppm, debido a que proceden del proceso de mejoramiento de CP y XP de la FPO, siendo esta una de las características distintivas del petróleo de esta zona. Por lo tanto, las aguas presentan un alto porcentaje de H<sub>2</sub>S disuelto, otorgándole un olor característico.

### *Impacto de la caracterización del agua agria de la refinería petrolera experimental*

En la etapa de caracterización ante un posible derrame de estas aguas almacenadas, va a afectar de forma significativa los siguientes factores:

#### ***Impacto de Metales***

##### *Impacto en el factor abiótico*

Los metales totales (C1) presentes en el agua agria, afectarían negativamente al suelo y el agua, debido a que estos metales se encuentran en una matriz acuosa con una abundante cantidad de materia orgánica tóxica, que van a influir en la composición fisicoquímica del suelo en sus capas superficiales (F1a) e intermedias (F1b). De la misma manera el agua se va a ver afectada por la concentración de metales presente en la misma, teniendo consecuencias en la calidad de cuerpos de aguas superficiales (F2a) y subterráneas (F2b).

##### *Impacto en el factor biótico*

Los metales pesados como el V y molibdeno (Mo) afectan directamente a la fauna (F5a, b y c) y la flora (F4a y b), por la bioacumulación en la vegetación y por ende a la fauna por su biodisponibilidad (Argota *et al.*, 2012).

##### *Impacto en el factor humano*

Los metales al pasar al suelo y luego a los acuíferos (F2b), que surten de agua a la población afectaría directamente la salud de las comunidades internas (F6b) y comunidades circundantes (F6c), que se abastecen por medio de pozo profundo (Reyes *et al.*, 2016).

#### ***Impacto de Compuestos orgánicos***

##### *Impacto en el factor abiótico*

Los compuestos orgánicos (C2) presentes en las aguas agrias son sustancias azufradas, nitrogenadas, aromáticos, cetonas y alifáticos, que afectarían directamente al suelo en todas sus capas (F1a y b), produciendo degradación del mismo (Vílchez-Fernández y Ulloa-Carcases, 2015). De la misma manera estas sustancias afectarían el agua debido a que elevan la concentración de carbono en las mismas, incrementando los valores de DQO y DBO, factores directamente relacionados con la contaminación de las aguas superficiales (F2a) y según su cantidad pudiesen afectar los acuíferos (F2b) de la zona de impacto en un posible derrame de la misma (Saval *et al.*, 2004).

##### *Impacto en el factor biótico*

Estas sustancias afectan directamente a la flora, debido a que como afectan el suelo, afectará directamente a la vegetación (F4a). La vegetación acuática (F4b), se vería afectada generando con la eutrofización (Rivas *et al.*, 2011). Igualmente, la fauna se afectaría (F5a), y la avifauna (F5b) por la liberación de H<sub>2</sub>S, y la fauna acuática (F5c) si alcanzara un cuerpo de agua.

### *Impacto en el factor humano*

Estos compuestos impactarían los acuíferos, afectando la salud por el consumo de agua contaminada por las comunidades internas (F6c) y externas (F6b) que se abastecen de estos (Reyes *et al.*, 2016).

### ***Impacto de la Liberación de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>x</sub>***

#### *Impacto en el factor abiótico*

La liberación de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>x</sub> (C3), va a tener un impacto importante en el aire (F3a y b), debido a que va a afectar la composición química del mismo, elevando la concentración de estas especies nocivas, produciendo la denominada lluvia ácida que afecta directamente a el suelo (F1a y b) y el agua (F2a y b) por la incorporación a estos de ácido sulfúrico, ácido nítrico y ácido carbónico afectando el pH del resto de los factores abióticos y por ende sus propiedades fisicoquímicas (Juez, 2005).

#### *Impacto en el factor biótico*

Al mismo tiempo, estas sustancias peligrosas afectan indirectamente la vegetación terrestre (F4a) por la acidificación del suelo, la vegetación acuática (F4b), por la disminución del pH del agua. Es por este motivo, que también se verá afectada la fauna en el suelo (F5a) y en el agua (F5c), sino que directamente va a afectar mayormente la avifauna (F5b).

#### *Impacto en el factor humano*

Estas sustancias en el aire afectan la salud, debido a que se elevan las afecciones respiratorias causando que el trabajador (F6c) disminuya su calidad de vida (Romero-Placeres *et al.*, 2006). Otro impacto indirecto es que la lluvia ácida afecta la infraestructura del centro de investigaciones, desmejorando la calidad estructural del edificio (F6c) y la infraestructura circundante (F6b).

### ***Impacto de Sólidos precipitados***

#### *Impacto en el factor abiótico*

Los sólidos (C4) van a estar directamente relacionados con la precipitación de sustancias orgánicas de alto peso molecular que se encuentran suspendidos en el agua, de la misma manera ocurre con los polisulfuros, que van a formar incrustaciones en las líneas de producción o en los envases contenedores de almacenamiento (Lobelles-Sardiñas *et al.*, 2016; Marcano *et al.*, 2003). Estos sólidos tendrían un impacto directo en el suelo, debido a que estas sustancias van a afectar la capa superficial (F1a), e intermedia del suelo (F1b) incorporando hidrocarburos en el mismo que producirían degradación. El azufre es un micronutriente del suelo que en proporciones adecuadas es beneficiosos para el suelo (García, 2014), pero en grandes cantidades tiene un efecto fungicida, que va a afectar la riqueza de la microbiota del suelo, de igual manera estas sustancias al estar en contacto con el suelo pueden infiltrarse en los acuíferos (F2b) contaminando esta acumulación natural de agua.

#### *Impacto en el factor biótico*

La producción de estos sólidos afectaría la vegetación (F4a), ya que los hidrocarburos inhiben el crecimiento de la vegetación y alteran la vegetación acuícola (F4b) (Adams *et al.*, 2008). La fauna

se va a ver directamente afectada si se afecta el suelo y el agua, debido a que la alta concentración de materia orgánica y azufre que impactaría la calidad del agua y del suelo, por ende, la vida en ellos principalmente la fauna terrestre (F5a).

#### *Impacto en el factor humano*

El azufre sólido tiene efectos en la salud directamente en contacto con los ojos, piel, ingestión e inhalación, causando daños severos en el personal (F6a y F6c).

#### ***Impacto por corrosividad por pH***

##### *Impacto en el factor abiótico*

El pH básico del agua agria (C5) afectaría directamente al suelo (F1a y b) debido a que, al liberar las aguas agrias por la corrosión de contenedores, va alcalinizar el suelo empobreciéndolo, generando una baja infiltración y poca permeabilidad, haciendo que el suelo se compacte y se degrade con facilidad (Ochoa *et al.*, 2004). De la misma manera esto va afectar los acuíferos (F2b).

##### *Impacto en el factor biótico*

La flora (F4a) pudiera afectarse debido a no resistir el cambio abrupto de pH y la contaminación en el lugar.

##### *Impacto en el factor humano*

Ante la posibilidad de contaminar los acuíferos se verán afectadas las comunidades internas y cercanas, que consuman aguas mediante pozo profundo (F6 a, b y c).

#### ***Impacto por reactividad por sulfuros***

##### *Impacto en el factor abiótico*

La reactividad por sulfuros (C6) va impactar directamente envases contenedores de las aguas agrias, acelerando su descomposición por la reacción directa en el H<sub>2</sub>S y el hierro (Ballesteros *et al.*, 2010), aumentando las posibilidades de derrame del agua en condiciones de almacenamiento si estos se encuentran expuestos a las cambios climáticos, donde el sol y la lluvia influirán en el comportamiento del material del envase, siendo esto también aplicable a los envases plásticos por el envejecimiento a la intemperie. Esta posible afectación tendría lugar directamente en el suelo, debido a la posibilidad del derrame del agua afectando las características fisicoquímicas del suelo en las capas superficiales (F1a) e intermedias (F1b). Si llega al suelo este efluente, también es posible que llegue a las fuentes de agua, afectando vía torrenteras las aguas superficiales (F2a) y por el suelo a los acuíferos (F2b). El aire (F3a y b) también se verá afectado debido a la liberación de H<sub>2</sub>S, que contienen esta agua disuelta y la cantidad de compuestos orgánicos volátiles que serían liberados.

##### *Impacto en el factor biótico*

Esta afectación al suelo va igualmente a impactar en la biota directamente en la flora (F4a y b) y en la fauna (F5a, b y c) (Crosara, 2012).

### *Impacto en el factor humano*

Las consecuencias al ser humano (F6a, F6b y F6c) van a ser a la salud debido a la exposición prolongada a sustancias tóxicas presentes en las aguas agrias.

#### *4.2.4. Almacenamiento del agua agria (D)*

Las aguas agrias debido al contenido de materia orgánica y H<sub>2</sub>S disuelto, se almacenan en envases metálicos y estos se encuentra a la intemperie acelerando las condiciones de degradación del material por la oxidación (Ballesteros *et al.*, 2010). Igualmente ocurre en los envases plásticos que contienen esta sustancia, debido a que el plástico expuesto a condiciones de radiación solar prolongada acelera la degradación del material por envejecimiento, convirtiéndose en una posible zona de afectación ambiental por el derrame de esta sustancia (Rojas-Flórez, 2013), una parte del almacenamiento de estas aguas se encuentran en paletas de carga situadas en tierra aplanada. Estas aguas también se encuentran en almacenes cerrados en galpones de desechos. El tiempo de almacenamiento en algunos casos sobrepasa lo establecidos en las normas ambientales de la empresa.

Según el Decreto 2635 de 1998 referente a las Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos, en su artículo 16 apartado 1, establece que el almacenamiento de materiales de este tipo debe reunir las características y la capacidad acorde con el tipo de material a almacenar exigidas en la norma venezolana de calidad COVENIN 2670.

#### *Almacenamiento a Cielo abierto (D1)*

El almacenamiento temporal del desecho, debe hacerse cumpliendo la normativa ambiental vigente de PDVSA (ma-01-02-11), que establece que este almacenamiento debe hacerse delimitando el espacio, manteniendo un estricto control de inventariado y el tiempo en estos espacios temporales no deben ser mayor a un mes en barriles y estos no deben exceder los 1000 tambores de 208 litros, de un material resistente al ataque químico.

#### *Almacenamiento Cerrado (D2)*

Las áreas techadas a ser utilizadas para el almacenamiento de materiales peligrosos recuperables y desechos peligrosos, deben cumplir con las especificaciones que establece el Decreto 2635 (1998). Esta norma en el artículo 16 apartado 3, establece que debe mantenerse protegida de la intemperie, para que no sean arrastrados vapores por el viento, ni lavado por la lluvia y el drenaje debe conducir a un tanque de almacenamiento con un sistema de tratamiento.

### ***Impacto del almacenamiento***

#### *Impacto en el factor abióticos*

Estos espacios de almacenamiento van a generar impacto ante un posible derrame en el suelo (F1a y b), en las aguas (F2 a y b) en el aire (F3 a y b).

#### *Impacto en el factor biótico*

Estos impactos van a repercutir en la flora (F4 a y b) y en la fauna (F5a, b y c).

*Impacto en el factor humano*

Al mismo tiempo el almacenamiento pudiese afectar al personal (F6a y c) y a las comunidades circundantes (F6b), por los olores ante un posible derrame por la liberación de sustancias tóxicas.

Según los datos obtenidos en la tabla 5 y lo contenido en la normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos (Decreto 2635,1998), en su artículo 8 establece, que los niveles de riesgo se presentan en cinco clases de peligrosidad creciente, las cuales deben ser identificadas, evaluadas para definir las medidas de seguridad, los planes de contingencia, garantizando la contratación de pólizas de seguros contra daños a terceros y daños ambientales. Las aguas agrias se pueden clasificar según esta norma con el mayor nivel de riesgo, debido a que presenta las siguientes características:

Sólidos, líquidos o gases que pueden producir reacciones explosivas, o ser fácilmente inflamables, muy reactivos, corrosivos, desprenden gases y vapores tóxicos, alto potencial de propagación o diseminación, efecto letales a las personas o letales y persistentes al ambiente, pueden causar destrucción o contaminación a decenas de metros del accidente (p.8).

El nivel de riesgo de las aguas agrias es de clase 5, debido a que se puede apreciar en la matriz causa-efecto, como las actividades estudiadas tienen impacto en casi todos los factores ambientales del análisis, demostrando el grado de peligrosidad de las aguas agrias para el ecosistema y el microclima de la zona, así como para el personal que labora en la institución.

Como se puede observar en la tabla 5, entre las sumatorias y promedios de las actividades que causan mayor impacto ambiental, se encuentran primero la generación del agua agria, ya que una posible liberación de este efluente en este punto causaría un daño considerable en la zona y al personal involucrado.

La alta reactividad por sulfuros, sería la segunda actividad que pudiese tener una afectación importante en los factores ambientales ante un posible derrame. De igual forma, el almacenamiento a cielo abierto, es un punto vulnerable para el ambiente, debido a que las condiciones de intemperie ocasionan daños al envase contenedor del efluente, por el contenido de especies reactivas que afectan la estructura de los contenedores metálicos y plásticos, colapsando durante alguna manipulación del mismo, causando este evento afectación al entorno. La cantidad de materia orgánica contenida en el agua al ser liberada pudiese afectar de manera considerable, el suelo, el agua y el aire, afectando directamente las especies vegetales y la fauna, que hace vida en la zona impactada por el posible derrame.

Cuando se analizó la matriz en cuanto a la afectación a los factores ambientales, se observa en las sumatorias y promedios que un posible derrame de estas aguas, podría impactar considerablemente en las aguas superficiales y los acuíferos de la zona, debido a que en el lugar de almacenamiento se encuentran torrenceras que pudiesen llevar directamente las aguas a la quebrada perimetral afectando la flora y la fauna acuática. Otro de los factores que resultarían altamente impactados serían los acuíferos, debido a la infiltración del efluente hasta los depósitos subterráneos de agua, contaminando así el agua suministrada a la comunidad interna y posiblemente a las comunidades externas de la empresa. El suelo se vería altamente afectado, debido al contenido de materia orgánica y de azufre que se pudiese incorporar al suelo afectando su composición fisicoquímica y por ende la cobertura vegetal de la zona afectada.

En la matriz causa-efecto, los valores sumatorios y promedios son negativos y altos numéricamente, indicando el potencial altamente nocivo que tienen estas aguas con relación a su impacto en los factores ambientales estudiados. En tal sentido la institución debería centrar sus esfuerzos de investigación y desarrollo, para mitigar este problema logístico-ambiental de la empresa.

## 5. Conclusiones

La caracterización fisicoquímica de las aguas agrias, permitió conocer las concentraciones de materia orgánica e inorgánica contaminante, determinándose que la demanda química de oxígeno es de 18100 ppm, el valor de hidrocarburos totales es de 99 ppm y la concentración de H<sub>2</sub>S es de 24000 ppm, siendo estas concentraciones superiores a los niveles máximos permitidos por la normativa venezolana para la descarga en plantas de aguas y cuerpos de aguas, así como también por la normativa de seguridad e higiene laboral, convirtiéndose este desecho en un tóxico con un impacto ambiental alto. Las técnicas analíticas permitieron conocer los tipos de metales en el agua identificándose algunos de tipo pesados que pueden afectar a las especies animales y vegetales. De igual manera se logró identificar las especies orgánicas en el efluente corroborando que los compuestos orgánicos que constituyen este desecho son altamente tóxicos.

Mediante la caracterización fisicoquímica de las aguas agrias, se pudo clasificar este efluente en el nivel 5 de riesgo de contaminación, debido a que es un líquido reactivo y corrosivo, que desprende gases y vapores tóxicos, con un alto potencial de propagación, teniendo un efecto letal en las personas y persistente en el ambiente. La aplicación de la matriz de Leopold evidenció el impacto ambiental que este efluente petrolero tiene, dando como resultado la vulnerabilidad en el suelo, la composición fisicoquímica del subsuelo, de las aguas superficiales, acuíferos de la zona y de todo aquello que entre en contacto con estas aguas.

La materia orgánica e inorgánica presentes en las aguas agrias, coloca en peligro los factores abióticos y bióticos de una zona de posible derrame. La alta concentración de H<sub>2</sub>S disuelto, por encima de los valores permitidos de 5 ppm, son potencialmente mortales para el personal que manipule este desecho. La alta reactividad del H<sub>2</sub>S disuelto almacenado puede socavar la integridad de los envases de almacenamiento a cielo abierto, debido a que se conjugan dos factores el envejecimiento del material bajo las condiciones a la intemperie de los envases con la acción reactiva del H<sub>2</sub>S y del pH en los materiales, siendo una combinación que pudiese permitir un posible derrame que afecte al medioambiente, a la comunidad del instituto y a las comunidades cercanas por la liberación de vapores tóxicos.

## Contribuciones de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Centeno-bordones, G.	Labrador, H.	Lara, G.
Conceptualización			
Análisis formal			
Investigación			
Metodología			
Recursos			
Validación			
Redacción - revisión y edición			

## Conflicto de Interés

Los autores deben declarar que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna en la presente investigación.

## Fuente de financiamiento

Los costos fueron sufragados por el Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (PDVSA-Intevep) y la Universidad de Carabobo.

## Referencias

- Adams, R. H., Zavala-Cruz, J., & García, F. A. M. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia*, 33(7), 483-489. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33933703.pdf>
- Alboudwarej, H., Felix, J., Taylor, S., Badry, R., Bremner, C., Brough, B. & Beshry, M. (2006). La importancia del petróleo pesado. *Oilfield Review*, 18(2), 38-58. Recuperado de: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/heavy-oil-3-spanish>
- Álvarez, J. N., Rodríguez, A. Á., Pompa, N. P., Reyes, A. M., & Franco, E. D. (2007). Impacto ambiental de la industria petrolífera de Santiago de Cuba. Caracterización. *Tecnología Química*, 27(2), 83-91. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543753013.pdf>
- Álvarez, R., & Linares, C. (2015). Uso de precursores catalíticos NiMo/óxidos mixtos Zn-Al para ser empleados en reacciones de hidrotreatmento. *Revista Agrollania*, 12(1), 1-10. Recuperado de: <http://www.postgradovipi.50webs.com/archivos/agrollania/2015/agro11.pdf>
- Amrani, A. (2014). Organosulfur compounds: molecular and isotopic evolution from biota to oil and gas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 733-768. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124126>.
- Argota, G., González, Y., Argota, H., Fimia, R., & Iannacone, J. (2012). Desarrollo y bioacumulación de metales pesados en *Gambusia punctata* (*Poeciliidae*) ante los efectos de la contaminación acuática. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 13(5), 1-12. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/636/63624365020.pdf>
- ASTM D 4658-03 (2002) *Standard Test Method for Sulfide Ion in Water*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pensilvania. USA
- ASTM D5790-95 (2012) *Standard Test Method for Measurement of Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pensilvania. USA

- Ballesteros, D. Y. P., Torres, S. R. P., & Quintero, C. V. (2010). Evaluación de la corrosión del acero AISI-SAE 1020 en un ambiente multifásico de salmuera CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S. *Ingeniería y Desarrollo*, (27), 187-213. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/852/85215207011.pdf>
- Barbosa, A; Vega, A; de Rio, E. (2014) Hidrodesulfuración de crudos de petróleo: base para el mejoramiento de combustibles: Una revisión. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 5 (3), pp. 37-60. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323632128003.pdf>.
- Bellussi, G; Giacomo, R; Landoni, A; Millini, R; Molinari, D; Montanari, E; Moscotti, D & Pollesel, P. (2013). Hydroconversion of heavy residues in slurry reactors: Developments and perspectives. *Journal of Catalysis*, 308, 189-200. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2013.07.002>
- Castro, Y., Sánchez, D & Vilorio, A. (2019). Efecto de composición mineral de arenas sobre generación de gases ácidos en crudos pesados a condiciones de inyección de vapor. *Revista Ingeniería UC*, 26(1), 23-30. Recuperado de: [https://www.redalyc.org/pdf/707/Resumenes/Resumen\\_70758484004\\_1.pdf](https://www.redalyc.org/pdf/707/Resumenes/Resumen_70758484004_1.pdf).
- Coria, I. D. (2008). El estudio de impacto ambiental: características y metodologías. *Invenio*, 11(20), 125-135. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/877/87702010.pdf>.
- Crosara, A. (2012). El suelo y los problemas ambientales. . Montevideo, Uruguay. Recuperado de <http://edafologia.fcien.edu.uy>
- Cuéllar, J. A. G., Sánchez, F. A., Vázquez, S. H., & Cota, D. B. L. (2004). Impacto ecológico de la industria petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad: una revisión. *Interciencia*, 29(6), 311-319. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33909304.pdf>.
- Damsté, J. S. S., Irene, W., Rijpstra, C., de Leeuw, J. W., & Schenck, P. A. (1988). Origin of organic sulphur compounds and sulphur-containing high molecular weight substances in sediments and immature crude oils. *Organic Geochemistry*, 13(4-6), 593-606. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90079-4](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90079-4).
- Gaceta Oficial 5.245-3 (1998). Decreto 2635: *Normas para el Control y Manejo de Materiales y Desechos Peligrosos*. Caracas, Venezuela.
- Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.021 (1995). Decreto N° 883, *Normas para la Clasificación y Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos*. Caracas, Venezuela.
- García, F. O. (2014). *Fertilidad de suelo y fertilización de cultivos*. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- González-Arreaza, J. L., & Núñez-Márquez, C. R. (2008). *Mejoramiento de los crudos extra pesados Carabobo y Ayacucho mediante hidrotreatmento utilizando catalizadores CoMoS<sub>2</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y FeNiNbS máxicos en un reactor por carga*. (Tesis de Licenciatura), Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. Recuperado de: <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/7326>.
- Juez, J. M. (2005). *Análisis y evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria del petróleo y el gas*, Disertación Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Recuperado de: <http://oa.upm.es/278/>
- Lobelles-Sardiñas, G. O., López-Bastida, E. J., Pedraza-Garciga, J., & Peralta Suárez, L. M. (2016). Metodología con enfoque de economía ecológica para la gestión integral de aguas sulfurosas en una refinería de petróleo. *Centro Azúcar*, 43(4), 50-62. Recuperado de: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612016000400006](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612016000400006)
- Machado-Allison, A. (2017). La conservación de ambientes acuáticos: petróleo y otras actividades mineras en Venezuela. Capítulo 9 (pp: 189-201). En: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). *Ríos en riesgo de Venezuela*. Volumen 1. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela. Recuperado de: <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/ecotropicos/article/view/E0008>
- Marcano, Á. E., Rodríguez, J. C., & Mohsin, M. (2003). Efecto del azufre elemental sobre el pH y la solubilidad de algunos nutrientes en fosfocomposts. *Interciencia*, 28(9), 504-511. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33908403.pdf>

- Moronta-Riera, J., & Riverón-Zaldívar, B. (2016). Evaluación de la calidad físico-química de las aguas y sedimentos en la costa oriental del lago de Maracaibo. *Minería y Geología*, 32(2), 102-111. Recuperado de: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1113>
- Negretti, V, Rivas, G, & Funatsu, S. 2009. "Firstcommercial HDHPLUS /SHP plant in Puerto La Cruz refinery, Venezuela.". Recuperado de: [http://www.pdvs.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7070:puerto-la-cruz-refinery-deep-conversion-project-to-receive-new-financing-from-hyundai-engineering-construction&catid=10&Itemid=908&lang=en](http://www.pdvs.com/index.php?option=com_content&view=article&id=7070:puerto-la-cruz-refinery-deep-conversion-project-to-receive-new-financing-from-hyundai-engineering-construction&catid=10&Itemid=908&lang=en)
- Noguera, G., & Lara, M., (2013) Uso de aguas agrias y H<sub>2</sub>S para la preparación de soluciones metálicas de [MoS<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>. [Informe Técnico]. Los Teques, Venezuela: Intevp. Documento técnico n°: INT- 14214,2013.
- Noguera, G., Rivas, A., González, I., &Hernandez, J., (2012) Evaluación del uso de aguas agrias en la preparación de solución de Mo(VI) de catalizador ultradisperso de HDHPLUS®. [Informe Técnico]. Los Teques, Venezuela: Intevp,. Documento técnico n°: INT- 14040, 2012.
- Ochoa, G., Oballos, J., Jaimés, E., & Manrique, J. (2004). Relación entre el material parental y el pH de los suelos en los Andes venezolanos. *Revista Geográfica Venezolana*, 45(2), 281-288. Recuperado de: <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/regeoven/article/view/12330>
- Ordoñez-Díaz, M. M., & Rueda-Quiñónez, L. V. (2017). Evaluación de los impactos socioambientales asociados a la producción de panela en Santander (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(2), 379-396. Recuperado de: [http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num2\\_art:637](http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:637).
- Peralta C & Barrios P. (2012). Proyecto de creación de una fundación para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos reciclables. Tesis de especialización. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/21085>
- Pereira, P., Machin, I., Salerno, G., Cotte, E., Higuerey, L., Andriollo, A., & Rivas, G. (1999). Research and development in heavy and extra heavy oil upgrading in PDVSA-Intevp: aqua conversion. *Acta Científica Venezolana*, 50 (1), 48-53.
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y Política Pública*, 22(2), 283-312. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/gpp/v22n2/v22n2a1.pdf>
- Portillo, R., Bellorín, M., Sirit, Y., & Acero, C. (2008). Perfil de salud de los trabajadores de una planta procesadora de olefinas del Estado Zulia, Venezuela. *Revista de Salud Pública*, 10, 113-125. Recuperado de: <https://scielosp.org/article/rsap/2008.v10n1/113-125/es/>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jiménez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>
- Rivas, Z., Márquez, R., Troncone, F., Sánchez, J., Colina, M., & Hernández, P. (2011). Contribución de principales ríos tributarios a la contaminación y eutrofización del Lago de Maracaibo. *Ciencia*, 13(1). Recuperado de: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/article/view/9241>
- Rodríguez, G. (2001). El Lago de Maracaibo como cuenca anaeróbica natural: Uso de líneas de base históricas en estudios de impacto ambiental. *Interciencia*, 26(10), 450-456. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33906105.pdf>
- Rojas-Florez, M. L. (2013). *Estudio de Envejecimiento Natural a la Intemperie de la Tubería de Polietileno (Pe) y Policloruro de Vinilo (PVC)* (Disertación Doctoral), Universidad Industrial de Santander, Colombia. Recuperado de: <http://noesis.uis.edu.co/handle/123456789/4086>
- Romero-Placeres, M., Diego-Olite, F., & Álvarez-Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 0-0. Recuperado de: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1561-30032006000200008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032006000200008)

- Saval, S., Lara, F., Lesser, J. M., & Nieto, J. M. (2004). *Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: Causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención. El agua en México vista desde la Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. México, DF ISBN 968-7428.
- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 4500-Cl- B. (2017). *Chlorine, Iodometric Method*. Editorial APHA-AWWA-WPCF. EUA.
- U.S. EPA 375.4 (1978) *Sulfate (Turbidimetric). method determines sulfate in drinking and surface waters; domestic and industrial wastes*. Approved for NPDES Manual, Washington, D.C., EUA.
- U.S. EPA Method 8015B. (2000). Total petroleum hydrocarbons (TPH) analysis gasoline and diesel fuel. Manual. Washington, D.C., EUA.
- U.S. EPA. 2014. "Method 6020B (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry," Revision 2. Manual. Washington, D.C., EUA.
- Vairavamurthy, A., & Mopper, K. (1987). Geochemical formation of organosulphur compounds (thiols) by addition of H<sub>2</sub>S to sedimentary organic matter. *Nature*, 329(6140), 623-625. <https://doi.org/10.1038/329623a0>
- Vargas-Guarín, L. D. (2020). *Impactos ambientales de la producción petrolera en Colombia y su relación con la innovación tecnológica en los últimos quince años* (Tesis de Licenciatura), Universidad de América, Colombia. Recuperado de: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7843/1/463974-2020-I-GA.pdf>
- Vílchez-Fernández, O., & Ulloa-Carcasés, M. (2015). Evaluación del impacto ambiental por presencia de hidrocarburos en el fundo Los Clavelitos. *Minería y Geología*, 31(3), 91-108. Recuperado de: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1110>
- Werne, J; Lyons, T; Hollander, D; Formolo, M; Sinninghe, J. (2003). Reduced sulfur in euxinic sediments of the Cariaco Basin: sulfur isotope constraints on organic sulfur formation. *Chemical. Geology*. 195:159-79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00393-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00393-5)
- Zamora, A. C., & Ramos, J. (2010). Las actividades de la industria petrolera y el marco ambiental legal en Venezuela. Una visión crítica de su efectividad. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 115-144. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730384008.pdf>