

**INNOVACIÓN Y DESARROLLO EN EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE
CORTES DE PERFORACION**

HAROLD EDUARDO CASTAÑEDA INFANTE

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2017**

**INNOVACIÓN Y DESARROLLO EN EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE
CORTES DE PERFORACION**

HAROLD EDUARDO CASTAÑEDA INFANTE

**Monografía para optar el título de Especialista en
Gestión Ambiental**

Orientador(a):

**DORA MARÍA CAÑÓN RODRIGUEZ
Ingeniera Química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA
ESPECIALIZACIÓN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Especialización

Firma del calificador

Bogotá D.C., Octubre de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suarez

Director Especialización en Gestión Ambiental

Dr. Francisco Archer Narvaez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Presento la dedicatoria de esta monografía a mis padres y a mis hermanos, que mediante su constante apoyo me han permitido alcanzar lo que alguna vez he deseado.

Harold Eduardo Castañeda Infante

AGRADECIMIENTOS

A la **Ingeniera Dora Maria Cañon Rodriguez** por su constante orientación en el desarrollo de esta monografía.

Universidad de América.

Bogota D.C.

A la **Universidad de América** institución que me brindo una excelente formación academica.

A mi familia por su apoyo constante.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
1. MARCO REFERENCIAL	18
1.1 MARCO TEÓRICO	18
1.1.1 Perforación de pozos	18
1.1.2 Residuo/ deshecho	19
1.1.3 Residuos de Perforación	21
1.1.4 Fluidos de perforación	22
1.1.5 Cortes de perforación	24
1.1.6 Tratamiento de residuos	28
1.1.7 Disposición de residuos	30
1.1.8 Tecnologías de tratamiento	31
1.2 MARCO CONCEPTUAL	32
2. CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE GENERACIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	37
2.1 ESCALA DE GENERACIÓN DE LOS CORTES DE PERORACIÓN	43
2.2 COMPOSICIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	47
2.3 EFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO	51
2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	55
3. CAPITULO II: MECANISMOS TÉCNICOS USADOS ACTUALMENTE EN LA INDUSTRIA PETROLERA INTERNACIONAL PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN	58
3.1 OPERACIONES COSTA ADENTRO (ON-SHORE)	58
3.1.1 Generalidades	58
3.1.2 Tratamientos biológicos	59
3.1.2.1 Biorremediación	59
3.1.2.2 Bioventeo	61
3.1.2.3 Biopilas	63
3.1.3 Tratamientos químicos	64
3.1.3.1 Estabilización de los cortes de perforación con el uso de cal viva	64
3.1.3.2 Oxidación química	65

3.1.3.3 Solidificación/Estabilización (Vitrificación)	66
3.1.4 Tratamientos térmicos	68
3.1.4.1 Incineración	68
3.1.4.2 Co – procesamiento	68
3.2 OPERACIONES COSTA AFUERA (OFF-SHORE)	69
3.2.1 Generalidades	69
3.2.2 Influencia del fluido base usado durante la perforación para la disposición de cortes	70
3.2.3 Métodos usados para la disposición de cortes de perforación	71
3.2.3.1 Skip and ship	71
3.2.3.2 Bulk transfer	73
4. CAPITULO III: NUEVAS TECNOLOGÍAS INVESTIGADAS INTERNACIONALMENTE PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	75
4.1 TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LOS ESTADOS UNIDOS PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS TIPO CORTE DE PERFORACIÓN.	75
4.1.1 Entes regulatorios ambientales	78
4.1.2 Mecanismos técnicos aplicados en la industria norteamericana para la gestión ambiental de los cortes de perforación	81
4.1.2.1 Procedimientos preliminares al tratamiento y disposición de residuos de perforación – Solidificación y estabilización.	81
4.1.2.2 Minimización de residuos	82
4.1.2.3 Reciclaje/ Re uso	87
4.2 DESORCIÓN TÉRMICA	89
4.3 PIROLISIS	90
4.4 GASIFICACIÓN	90
4.5 GASIFICACIÓN ASISTIDA CON PLASMA	91
4.6 TRATAMIENTO DE CORTES CON EL USO DE UNA FUENTE MICROONADAS	94
4.7 TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN ACEITOSOS MEDIANTE EL USO DE UNA NANO EMULSIÓN	94
4.8 DESCONTAMINACIÓN DE CORTES MEDIANTE UN SECADOR MICROONDAS CONTINUO	96
4.9 COMBINACIÓN DE UN AGENTE LIMPIADOR SINTETIZADO CON TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL TRATAMIENTO DE LOS CUTTINGS	99

4.10 REINYECCIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN (CRI)	104
4.10 NUEVAS TECNOLOGÍAS DE INYECCIÓN CRI	107
4.11 REINYECCIÓN CRI MEJORADA	110
4.12 TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN “ALL NATURAL PROCESS”	114
5. CAPITULO IV: COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS TRADICIONALES CON RESPECTO A LAS NUEVAS INVESTIGACIONES PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	118
5.1 TECNOLOGÍAS ENFOCADAS EN EL TRATAMIENTO DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	119
5.1.1 Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cuttings	129
5.2 TECNOLOGÍAS ENFOCADAS AL AISLAMIENTO/ELIMINACIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN	136
5.2.1 Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en la eliminación/aislamiento de los cuttings	145
6. CONCLUSIONES	151
7. RECOMENDACIONES	153
BIBLIOGRAFÍA	154

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Secciones comunes de un pozo.	39
Figura 2. Circuito cerrado de circulación durante la perforación de un pozo.	40
Figura 3. Esquema de generación de cortes de perforación.	41
Figura 4. Circuito de circulación del lodo de perforación.	42
Figura 5. Aplicación de Bioventeo para la remediación de suelos.	62
Figura 6. Aplicación de la técnica “Bioplias”.	63
Figura 7. Etapas del manejo de residuos de perforación.	70
Figura 8. Proceso de disposición mediante la técnica “Skip and Ship”.	72
Figura 9. Proceso de disposición mediante la técnica “Bulk Transfer”.	73
Figura 10. Mapa del DWMIS de los estados donde se adelantan actividades petroleras.	77
Figura 11.A: Recopilación ventajas/desventajas métodos térmicos	92
Figura 11.B: Recopilación ventajas/desventajas métodos térmicos	93
Figura 12. Tratamiento de cortes de perforación mediante una Nano emulsión.	95
Figura 13. Unidad experimental (DCTU).	97
Figura 14. Proceso del tratamiento cortes mediante el uso del agente limpiador.	101
Figura 15. Efecto de la temperatura sobre la tasa de remoción de aceite.	101
Figura 16. Efecto de la fuente de poder ultrasónica en la recuperación de petróleo de los cortes.	102
Figura 17. Cuttings antes y después del tratamiento.	103
Figura 18. Preparación de la lechada de inyección en un proceso CRI.	105
Figura 19. Proceso de inyección de la lechada de cortes.	106
Figura 20. Preparación de la lechada de inyección en un proceso CRI.	107
Figura 21. Localización del campo Shushufindi - Ecuador.	110
Figura 22. Sistema de re inyección de cortes - Campo Shushufindi.	113
Figura 23. Graficos Radiales – Tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cortes de perforación.	131
Figura 24. Graficos Radiales – Tecnologías enfocadas al aislamiento/eliminación de los cortes de perforación.	147

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Efecto de diferentes ROPs con respecto a la tasa de generación de cortes.	45
Tabla 2. Caracterización Cromatográfica de los cortes de perforación.	48
Tabla 3. Caracterización de los cortes de perforación.	49
Tabla 4. Caracterización de los metales pesados contenidos en los cortes de perforación.	50
Tabla 5. Condiciones operacionales de las pruebas efectuadas al DCTU.	98
Tabla 6. Resultados del análisis de componentes en los cortes aceitosos.	100
Tabla 7. Resumen de los diferentes escenarios de aplicación de la tecnología.	103
Tabla 8. Resultados del balance de materia, caso 1: 60 pozos y caso 2: 30 pozos.	112
Tabla 9. Comparación de costos remediación All Natural vs uso de sorbentes para un derrame menor.	115
Tabla 10. Comparación de costos Remediación All Natural vs Excavación y relleno para un derrame mayor	116
Tabla 11. Comparación en costos del tratamiento “All Natural” vs el transporte y disposición tradicional	117
Tabla 12. Recopilación de las tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cortes de perforación.	119
Tabla 13. Rangos Clasificatorios tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cortes de perforación.	129
Tabla 14. Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cortes de perforación.	130
Tabla 15. Recopilación de las tecnologías enfocadas al aislamiento/eliminación de de los cortes de perforación.	136
Tabla 16. Rangos Clasificatorios tecnologías enfocadas al aislamiento/eliminación de los cortes de perforación.	145
Tabla 17. Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en la eliminación/aislamiento de los cortes de perforación.	146

GLOSARIO

BHA (BOTTOM HOLE ASSEMBLY): conjunto de elementos tubulares que se encuentran situados en la parte inferior de la tubería de perforación.

BROCA/ BARRENA: elemento principal de la sarta de perforación cuyo objetivo principal es lograr la apertura del pozo mediante la aplicación de fuerza rotativa.

CORTES DE PERFORACIÓN/ CUTTINGS: fragmentos rocosos, extraídos del subsuelo durante las operaciones de perforación.

FORMACIÓN: sección de rocas cuyas características geológicas son similares.

LODOS DE PERFORACIÓN: fluidos bombeados durante la apertura del pozo perforado.

PERFORACIÓN: proceso de apertura del pozo mediante el uso de sarta de perforación y broca.

RESIDUO/ DESHECHO: material resultante después de cualquier actividad productiva.

ROP: tasa de penetración de la broca a través del subsuelo.

SARTA DE PERFORACIÓN (DRILL PIPE): conjunto de secciones de tuberías que son bajadas a través del pozo, con el fin de realizar la apertura del pozo mediante la aplicación de fuerza rotativa.

TUBERÍA DE REVESTIMIENTO (CASING): tubería instalada una vez se realiza la apertura del foso, cuyo objetivo primordial es dar estabilidad al hueco.

ZARANDAS (SHAKERS): equipo superficial usado para la separación de los elementos sólidos contenidos en los lodos de perforación del flujo de salida del pozo.

RESUMEN

En esta monografía se presenta el estado actual de las tecnologías aplicadas para el tratamiento y disposición de los cortes de perforación, se analiza el nivel de innovación a partir de las nuevas metodologías, tales como la tecnología de tratamiento “All Natural”, la combinación de un agente limpiador sintetizado con una fuente ultrasónica y la reinyección CRI mejorada; resaltando de esta manera sus características, eficiencia de tratamiento, tiempos de aplicación, ventajas y limitaciones. Se comparan las tecnologías convencionales, con respecto a los nuevos avances en investigación para el manejo ambiental de los cortes de perforación. Finalmente, se exhibe un cuadro comparativo basado en la ponderación de factores comunes, a partir del cual se evidencian los beneficios de las nuevas tecnologías.

Palabras clave: Cortes de perforación, Innovación tecnológica, Perforación de pozos, Residuos de perforación, Tratamiento de desperdicios, Tecnología de remediación “All Natural”.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad tal como es bien sabido, la industria petrolera juega un papel de vital importancia en la economía internacional, esto se debe principalmente al aumento exponencial de la demanda de energía de este tipo; a partir de esta necesidad, los procesos de explotación petrolífera han aumentado su escala, aumentando a su vez los posibles impactos ambientales generados. Ahora bien, considerando las etapas involucradas durante la explotación de hidrocarburos, se puede afirmar que dentro de las mismas, uno de los procedimientos más relevantes es la perforación, ya que solo mediante este procedimiento se puede determinar realmente la presencia de petróleo en el yacimiento.

Cabe mencionar, que durante este proceso se hace necesario la extracción de un volumen considerable de fragmentos rocosos del subsuelo, llamados técnicamente cortes de perforación o “cuttings”, los cuales tal como lo menciona los autores Bilatayib. M., Eng. Mufazzal, S. Kabuli, Issa D., Ayyadand N., Ramirez D. ¹ (2016) aproximadamente representan el 50% de los residuos provenientes de este tipo de actividades, aclarando que los mismos pueden llegar a valores que se encuentran en rangos de 1000 a 5000 m³ por pozo, representando de esta manera un gran volumen rocoso extraído del subsuelo que impacta directamente en el ambiente durante su disposición. Teniendo en cuenta este hecho, tal como es mencionado por el autor R Miles² se hace necesario desarrollar una serie de procedimientos que produzcan una mitigación en el potencial contaminante de los cortes de perforación, mediante tecnologías aplicadas para este propósito, a pesar de este hecho se puede afirmar, además, que dentro de estas tecnologías existen una gran variedad de procedimientos, que en la mayoría de casos no eliminan los contaminantes en su totalidad, idea que es compartida por I. Petri Junior.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario evidenciar las técnicas actuales aplicadas en las industrias petroleras internacionales, resaltando su eficiencia y limitaciones en las operaciones tanto On-Shore como Off-Shore, que facilite así la determinación del nivel de tratamiento y mitigación de impacto ambiental alcanzado. Por otro lado, la comparación de las tecnologías innovadoras con respecto a las convencionales permite evidenciar sus ventajas evidentes, representadas tanto en una reducción en costos como en la disminución del porcentaje del contenido orgánico en este tipo de residuos, el cual tal como menciona I. Petri Junior³ fue

¹ BILATAYIB. M., ENG. MUFAZZAL, S. KABULI, ISSA D., AYYADAND N., RAMIRES D. Management of Drilling Cuttings in Term of Volume and Economics in Oil Field. Australian College of Kuwait, 2016, P 1-2.

² R MILES, ANDREW, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017, p. 2.

³ I. PETRI Júnior, CH Ataíde, and CR DUARTE, Federal University of Uberlândia; RN de Toledo and AS Morais, INNOVARE; CM de A. Panisset, CHM de Sá, and AL Martins, Petrobras. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. doi: 10.4043/26335-MS, 2015, p. 1-2.

establecido en el año de 1997 por el gobierno noruego, debe mantenerse por debajo del 1% en peso para operaciones Off-Shore.

Cabe aclarar, que uno de los ejes principales para lograr el análisis de las diferentes tecnologías aplicadas para el tratamiento y disposición de los cuttings, es conocer los escenarios de generación de este tipo de residuos, así como sus características ambientales, con el fin de identificar los requerimientos que son abordados por las tecnologías aplicadas actualmente. Al realizar la identificación y análisis de las tecnologías aplicadas e investigadas para la gestión de este tipo de material de desecho, se hace necesario realizar la comparación de cada una de estas tecnologías, que permita de esta manera determinar objetivamente los beneficios de la aplicación de una con respecto a las demás, facilitando de esta manera la determinación del estado actual en innovación y desarrollo para este campo de la industria.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Examinar las nuevas tecnologías para el tratamiento y disposición de cortes de perforación y las ventajas sobre las metodologías tradicionales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los escenarios de generación de los residuos tipo corte de perforación, así como sus características ambientales.
- Establecer las principales técnicas usadas para el tratamiento de cortes de perforación en la industria petrolera internacional.
- Analizar las nuevas tecnologías que se encuentran en estado de investigación para el tratamiento y disposición de los cortes de perforación.
- Comparar los beneficios de las nuevas tecnologías aplicadas en el tratamiento y disposición de los cortes de perforación con respecto a las tradicionales

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Perforación de pozos

Para el desarrollo objetivo de esta monografía se hace inmediatamente necesario tener una claridad en primera instancia del término perforación en un contexto petrolero; de esta manera se puede afirmar que el concepto relacionado a este procedimiento no posee variación significativa entre los diferentes autores, puesto que hace referencia a una actividad específica en el ámbito petrolero, de tal manera que una definición generalizada se puede encontrar en la obra de los autores Hawker D. y Vogt K.⁴ los cuales consideran que: “la operación de perforación implica bajar la sarta de perforación dentro del pozo y aplicar suficiente peso a la broca para romper y penetrar la formación. Durante la perforación, la sarta de perforación es forzada a girar por la mesa rotaria o por el Top Drive mientras se circula fluido de perforación por entre la tubería, y la broca y de regreso a la superficie arrastrando los cortes de perforación”.

A partir de lo anterior cabe señalar que según Mendez, R., Comez, P., Ledesma, J., Ceniceros, C.⁵ el proceso en general se refiere a la apertura de un foso con dimensiones cilíndricas en el subsuelo, cuya configuración puede ser dada de una manera vertical o inclinada. Ahora bien, el concepto de perforación de pozos tal como se encuentra plasmado en el Glosario de términos “Oilfield Glossary”⁶ de Schlumberger se encuentra generalizado a la técnica de perforación rotativa, en la cual el uso indispensable de una barrena o broca provoca el fracturamiento de la roca a partir del movimiento circular impartido por los sistemas de potencia permitiendo así la apertura del foso, además catalogan a esta técnica como un procedimiento continuo, puesto que a medida que se avanza por el medio rocoso los fragmentos de rocas desprendidos son removidos del pozo mediante los fluidos de perforación que circulan en circuito cerrado por medio de la barrena hasta superficie.

⁴ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 74.

⁵ MENDEZ, R., COMEZ, P., LEDESMA, J., CENICEROS, C. Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013. p. 5.

⁶ SCHLUMBERGER *Oilfield Glossary*. [en línea], sec. Oilfield Glossary. [citado junio 22 2017]. Disponible de World Wide Web: < http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/r/rotary_drilling.aspx>.

Por otro lado, según Varhaug, A⁷ dicho foso que es abierto en la roca necesita ser subdividido en diferentes secciones o tramos con el fin de dar mayor estabilidad al pozo, para esto se hace necesario realizar la instalación de elementos tubulares en cada una de las secciones que han sido perforadas, una vez se ha dado dicha instalación tal como menciona Barberii, Efrain, E.⁸ se procede a perforar la siguiente sección con una broca de menor diámetro; para realizar las conexiones necesarias entre diferentes tubulares se hace uso de los diversos sistemas usados en la perforación rotativa, tal como son: el sistema de izaje, el sistema de rotación y el sistema de potencia o fuerza motriz.

1.1.2 Residuo/ deshecho

Teniendo en cuenta lo anterior, y tal como lo menciona Gomez Romo, J. A., & González Rivera, J. W.⁹ se puede asegurar que la perforación de pozos al tratarse de una actividad industrial a gran escala, genera una gran cantidad de residuos, existiendo además una variedad según su naturaleza abarcando así las categorías de desechos domésticos, especiales y de tipo peligroso. Antes de hablar en profundidad de los diferentes residuos generados en campo, cabe definir en primera instancia el concepto de residuo o desecho, incluyendo así las diferentes definiciones de los autores y fuentes relevantes con respecto a esta temática: por una parte la Real Academia Española¹⁰ define como desecho a “Aquello que queda después de haber escogido lo mejor y más útil de algo, Residuo, basura”, por lo cual maneja el termino desecho y residuo como sinónimos, dando una importancia a su característica inherente de utilidad frente a un proceso de aprovechamiento, por lo cual parte de la definición de un material como desecho está dada por el propietario o aprovechador de la materia.

Por otra parte cabe mencionar, que tal como mencionan Casteblanco, I., Niño, J.¹¹ se han dado diferentes definiciones del término “residuo” con el fin de esclarecer el nivel de incertidumbre que persiste para este concepto, tales como la definición

⁷ VARHAUG, A. Un giro a la derecha: Una Visión general de las operaciones de perforación Oilfield Review, Schlumberger. Volumen 23, n° 3, 2012. p. 61.

⁸ BARBERII, EFRAIN. E. El pozo ilustrado, publicado editado por el Departamento de Relaciones Publicas, Lagoven S.A, cuarta edición, Caracas, Diciembre 1985. p. 92.

⁹ GOMEZ ROMO, J. A., & GONZÁLEZ RIVERA, J. W. Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos del norte. Trabajo de Grado, Bucaramanga, 2009. p. 33-36.

¹⁰ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. [en línea], sec. Inicio. [citado junio 23 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=desecho>>.

¹¹ CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2011. p. 27.

plasmada en el Convenio de Basilea¹², en el cual por el termino desecho se entienden a aquellas: “Sustancias u objetos cuya eliminación se procede, se propone a proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional” dando de esta manera una mayor relevancia a la disposición del material.

Por otra parte, dentro del glosario de términos sobre el medio ambiente, PNUMA¹³ da una definición enfocada en el proceso de producción, para lo cual lo define como: “Todo subproducto de los procesos de producción, valorización o consumo que en un momento del desarrollo social y técnico es rechazado por no considerarlo apto para los mismos”, así mismo el CEPIS¹⁴ da una definición generalizada para el concepto de desecho, refiriéndose al mismo como: “Todo material que no tiene un valor de uso directo y que es descartado por su propietario”, cabe mencionar que esta definición guarda cierto nivel de similitud a la dada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA)¹⁵, la cual además aclara la posibilidad de los diferentes estados en los cuales los desechos se pueden encontrar ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso.

En el caso del ámbito nacional, el termino residuo tiene en cuenta el estado del material considerado como desecho, además de los posibles escenarios de generación, de esta manera dentro de la normatividad colombiana se hace una diferenciación en cuanto a la definición de los residuos sólidos, de tal forma que un residuo es considerado como: “todo objeto, sustancia o elemento en estado sólido, sobrante de las actividad domésticas, recreativas, comerciales, institucionales, de la construcción e industriales y aquellos provenientes del barrido de áreas públicas, independientemente de su utilización anterior”¹⁶.

¹² PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. Convenio de Basilea: Sobre el control de los Movimientos Transfronterizos de los desechos Peligrosos y su Eliminación. 1989. p. 10.

¹³ SANCHEZ V., GUIZA G. UNESCO-PNUMA. Programa Internacional de Educación Ambiental- Glosario de Términos sobre Medio Ambiente. Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe, 1989. 39.

¹⁴ CEPIS/OPS. *Guía para la definición y clasificación de Residuos Peligrosos*. [en línea], sec. Inicio. [citado junio 23 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://www.bvsde.paho.org/cdrom-repi86/fulltexts/eswww/fulltext/gtz/defclarp/guiares.html>>.

¹⁵ AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL. *Manejando sus Residuos Peligrosos – Una guía para empresas pequeñas*. Washington, 2003. p. 4.

¹⁶ ALCADIA DE BOGOTA. *Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos, Analisis sobre la propiedad de los residuos solidos*. [en línea], sec. Inicio. [citado junio 23 2017]. Disponible de World Wide Web < <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37003>>.

1.1.3 Residuos de Perforación

Teniendo en cuenta las definiciones mencionadas con anterioridad, se puede observar que el termino tiene una serie de variaciones en función del contexto en el que se encuentra, variando de esta manera si se da una mayor importancia a los procesos de generación de productos, importancia en la gestión ambiental o las características de utilidad después de un proceso de aprovechamiento.

Ahora bien, con respecto al tema de esta monografía, se puede afirmar que el termino residuo de perforación se puede simplificar a aquel desecho generado durante la actividad de perforar un pozo, de tal manera que aplica las definiciones de residuo tratadas con anterioridad; por lo cual no existe variaciones importantes entre autores, a pesar de este hecho, es relevante evidenciar los tipos de residuos generados durante la perforación de un pozo, para lo cual los autores Gomez Romo, J. A., & González Rivera, J. W.¹⁷; catalogan tres tipos de desechos generados en una operación típica de perforación: en primera instancia se encuentran los residuos domésticos provenientes de las actividades en las locaciones, de tal manera que generalmente son de carácter orgánico e inorgánico provenientes de los campamentos y bases móviles usados en el proceso dentro de este grupo se suele encontrar “residuos de comida, papel, plásticos, textiles, cartón, cuero, madera, vidrio, latas, cerámica, aluminio y de más metales similares”¹⁸.

Por otro lado, según mencionan Gomez Romo, J. A., & González Rivera, J. W.¹⁹ dentro los campos donde se desarrollan operaciones de perforación se generan una gran variedad de residuos de carácter especial, incluyendo de esta manera residuos de jardín, aceites, baterías, llantas, lodos, cauchos y demás desechos impregnados de hidrocarburos. Finalmente, el ultimo subgrupo de materiales de desechos generados en campo según estos mismos autores²⁰ corresponde a aquellos de tipo peligroso, los cuales pueden encontrarse en fases combinadas, tales como gaseoso-liquido o en su defecto en estado sólido, liquido o gaseoso; dentro de este grupo se encuentran materiales que representan una amenaza ya sea por poseer algún nivel de radioactividad, inflamabilidad, explosividad o patogeneidad. Cabe señalar que dentro de esta categoría se encuentran los desechos de mayor impacto ambiental generado durante la perforación, siendo dichos residuos los cortes y lodos

¹⁷ GOMEZ ROMO, J. A., & GONZÁLEZ RIVERA, J. W. Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos del norte. Trabajo de Grado, Bucaramanga, 2009. p. 33-34.

¹⁸ Ibid. p. 33-34.

¹⁹ GOMEZ ROMO, J. A., & GONZÁLEZ RIVERA, J. W. Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos del norte. Trabajo de Grado, Bucaramanga, 2009. p. 35-36.

²⁰ Ibid. p. 36.

de perforación, los cuales como se mencionó con anterioridad son un producto de la perforación rotativa.

1.1.4 Fluidos de perforación

Tal como se indicó, durante el desarrollo de una perforación rotativa se hace necesario hacer uso de una mezcla de fluidos con el fin de lograr la eficiente apertura del pozo a entubar, hecho por el cual se hace necesario tener claridad con respecto al término lodo de perforación; este término al igual que la perforación no posee una variedad importante entre diferentes autores, puesto que el mismo hace referencia a un elemento específico en el proceso, de esta manera en el manual *Drilling Fluids Processing Handbook* lo define como: “Cualquier fluido que es usado en una operación de perforación en la cual dicho fluido es circulado o bombeado desde superficie por medio de la sarta de perforación, dentro de la broca y de vuelta a superficie por medio del anular”²¹.

Por otra parte algunos autores dan una definición específica con respecto a los posibles componentes existentes en esa mezcla, tal como lo hace el autor Pal Skalle, quien considera que: “El fluido de perforación más simple es la mezcla de agua y arcilla, comúnmente referido como lodo”²², además considera²³ y hace una metáfora con respecto al sistema circulatorio humano, de tal manera que el lodo representa la sangre en el cuerpo humano, y a su vez considera que las bombas de lodo trabajan tal como lo hace el corazón transportando los residuos en la sangre, lo cual para el autor representa los cortes de perforación.

Teniendo en cuenta lo referido con anterioridad, se puede generalizar el concepto de fluido de perforación, como la mezcla de sustancias usadas durante la perforación de un pozo, por lo cual gran parte de los autores no dan una definición concreta a este concepto pues en la gran mayoría de los casos se encuentra implícito en el proceso; a pesar de este hecho se puede afirmar que gran variedad de autores, tales como Hawker D., Vogt K., & Robinson A.²⁴ resaltan las funciones que debe desempeñar esta sustancia, concordando en las siguientes:

²¹ ASME, Cap 2 by Growcock F. & Harvey T. *Drilling Fluids Processing Handbook*. Elsevier. United States, 2005, p. 15.

²² SKALLE PAL. *Drilling Fluid Engineering*. Bookboon, 2010. p. 8.

²³ Ibid. p. 8.

²⁴ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. *DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo*, 2001, p. 56-58.

- Transportar los cortes de perforación hacia superficie a medida que se da la apertura del foso.
- Refrigerar y limpiar la broca.
- Reducir la fricción de la sarta de perforación.
- Control de presiones de fondo
- Mantener la estabilidad del hueco.
- Formar una capa de baja permeabilidad en la cara de la formación.
- Servir como un medio para la toma de registros

Cabe mencionar que estas funciones son compartidas por difentes autores tales como Skalle Pal, Growcock F, Harvey T, H. C. H. Darley & George R. Gray. Por otro lado, una de las temáticas que se puede encontrar en una variedad importante de autores es aquella referente a la clasificación o tipos de lodos de perforación, existiendo de esta forma una leve diferencia entre autores, haciendo que la misma este dada en función de la fecha de publicación de los trabajo en los cuales se trata este tema; de esta manera se puede observar que en las primeras fuentes dan una clasificación bastante sencilla, tal como se encuentra plasmado en la obra de H. C. H. Darley & George R. Gray²⁵, quienes considera que los fluidos de perforación deben ser clasificados a partir de su base, existiendo así tres tipos generales: Lodos base agua, lodos base aceite y finalmente los gases; en cada uno de estos se menciona la existencia de un medio continuo (agua, aceite o gas) en el cual se da la suspensión de partículas sólidas.

Esta perspectiva simplificada de clasificación es compartida por diferentes autores, un ejemplo de este hecho es el trabajo de Growcock F. & Harvey T (Cap 2)²⁶, quienes clasifican lo fluidos de perforación según su medio continuo base, existiendo de esta manera: Gaseosos, con la posibilidad de hacer uso de aire o nitrógeno, los fluidos acuosos con contenido de arcilla, polímero y espuma y finalmente los no acuosos con la posibilidad de hacer uso de aceite o sintético como medio base.

Algunos autores por otra parte, hacen una diferenciación con respecto al contenido dentro de estos fluidos, tal como se encuentra estipulado en el Manual de Fluidos de la empresa Baroid, donde se estipula que: “los tipos básicos de sistemas de terminación y reparación son los sistemas de fluidos sin sólidos y los sistemas mejorados por sólidos”²⁷, esta clasificación puede considerarse algo generalizada con respecto a las demás encontradas en la literatura, las cuales hacen una

²⁵ H. C. H. DARLEY, GEORGE R. GRAY. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Quinta Edición. Gulf Professional Publishing, 1988. p. 2.

²⁶ ASME, Cap 2 by Growcock F. & Harvey T. Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier. United States, 2005, p. 15-16.

²⁷ BAROID a Halliburton Company. Manual de Fluidos. Houston, Estados Unidos, 1999-2000. p. (1-2).

categorización de mayor complejidad teniendo en cuenta las composiciones químicas usadas en el desarrollo de los sistema de fluidos.

Dentro de este tipo de clasificación se encuentra la plasmada en el trabajo de Pal Skalle, en el cual según el "Issue of World Oil" existen nueve sistemas de fluidos diferentes, siendo los primeros siete fluidos base agua, el octavo base aceite y finalmente el noveno hace referencia a aquellos que hacen uso de aire o gas como medio continuo, estas categorías son: "1. No dispersos, 2. Dispersos, 3. Tratados con calcio, 4. Base polímero, 5. Sólidos de Baja densidad, 6. Saturados con sal, 7. Fluidos de Workover, 8. Base aceite/Sintético y 9. Aire, neblina, espuma y gas"²⁸. Tal como se puede apreciar, este tipo de clasificación especifica en mayor profundidad las diferencias principalmente químicas que pueden existir entre los diferentes sistemas de fluidos, a pesar de este hecho se puede decir que en aplicación real en campo los grupos principales se pueden generalizar a 5 categorías tal como se plasma en el trabajo de Hawker D., Vogt K., & Robinson A. DATALOG²⁹: "Aire-gas, Espuma/fluidos aireados, lodos en base agua, lodos en emulsión de aceite y lodos en base aceite".

1.1.5 Cortes de perforación

Tal como se mencionó anteriormente, el lodo de perforación cumple una serie de funciones durante la operación, para lo cual se establece de mayor importancia el transporte de los sólidos desprendidos de la roca a medida que se avanza durante la perforación, dichos residuos son generados durante todas las operaciones de este tipo, por lo cual es necesario tener claridad sobre su definición; al igual que se ha tratado con los términos referentes a la perforación, el concepto de cortes de perforación se refiere a un elemento específico durante esta etapa del proceso, por lo cual su definición no varía significativamente entre los diferentes autores, de esta manera una definición generalizada para este tipo de residuo es la que se encuentra plasmada en la Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas³⁰, en la cual el término cortes de perforación hace referencia a la "roca extraída del subsuelo durante la perforación, contaminados con el lodo de perforación, aceite, etc.", por otra parte, algunos autores dan detalles de la posible composición dentro de estos cortes de perforación tal como es el caso de Castebianco, I. & Niño, J.³¹ quienes consideran que estos residuos consiste de la

²⁸ Classifications of fluids systems, World Oil (June, any year), citado por SKALLE PAL. Drilling Fluid Engineering. Bookboon, 2010. p. 8-9.

²⁹ HAWKER D., VOGT K. & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, p. 59.

³⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE; ACP. Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas, 1999. p. PER-6-051.

³¹ CASTEBIANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2011. p. 55.

roca extraída, así como otros posibles materiales provenientes de la formación, tal como lo es el cemento curado usado durante la etapa de cementación de la tubería de revestimiento.

Un caso donde se da mayor especificación de dichos componentes es en el Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco³², en el cual “se entiende por recortes de perforación a cualquier material que es removido durante la perforación de pozos petroleros. Estos incluyen entre otros, fragmentos de roca variable (anhidrita, calcita, yeso, arcilla, arena, dolomita, feldespatos, granito, hematita, hierro, sílice, etcétera)”, esta definición guarda cierta similitud a la norma mexicana *NOM-115-SEMARNAT-2003*, la cual considera cortes de perforación como aquellos “Fragmentos de roca que se obtienen en el proceso de perforación; constituidos por minerales de las formaciones perforadas, entre otros, arcillas, cuarzo, feldespatos, carbonatos y otros compuestos calcáreos y de sílice que están impregnados con fluidos de perforación”³³.

Cabe resaltar, que la composición de los cortes de perforación variara naturalmente con respecto al tipo de formación y suelo perforado, por lo cual no siempre se tendrán las composición mencionadas por los anteriores autores, de esta forma algunas fuentes simplifican el termino, tal como encuentra en el *Drilling Fluid Processing Handbook*³⁴, en el cual la definición se reduce a aquellas partículas de rocas de varios tamaños considerados como Cuttings o cortes de perforación.

Teniendo en cuenta las definiciones mencionadas con anterioridad, se puede observar que el termino no varía significativamente entre los diferentes autores y fuentes, por lo cual se puede decir que hace una referencia generalizada a los desprendimientos de roca que son generados en fondo de pozo y son transportados a su vez por el lodo de perforación, teniendo esta claridad, algunos autores señalan la importancia de la remoción de este tipo de desechos, pues para la compañía Baroid³⁵ los recortes de perforación son percibidos como contaminantes que degradan la eficiencia de los lodos de perforación debido a que al ser molidos serán disminuidos a partículas más finas que dificultaran el proceso general de remoción, dicho proceso depende a su vez de una serie de variables tal como se encuentra referido en el *Manual de Fluidos de Perforación del Instituto Americano del Petróleo*³⁶, tales como el tamaño, forma y densidad de los cortes, la velocidad de

³² MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco, 2012. p. 18-19.

³³ MEXICO. MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. NOM-115-SEMARNAT-2003. Diario Oficial. México, 2004. p. 4.

³⁴ ASME, Cap 1 by ROBINSON L., Cap 2 by GROWCOCK F. & HARVEY T. *Drilling Fluids Processing Handbook*. Elsevier. United States, 2005, p. 5.

³⁵ BAROID a Halliburton Company. *Manual de Fluidos*. Houston, Estados Unidos, 1999-2000. p. (10-2)-(10-3).

³⁶ INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO, ENERGY API. *Manual de Fluidos de Perforación*. Texas, Uited States, p. 2.1.

penetración de la broca (ROP), así como la viscosidad y velocidad del fluido de perforación en el anular del pozo, a partir de estas variables la remoción de los cortes de perforación dentro del pozo según lo mencionado por Skalle Pal³⁷ está determinada por dos tipos de energía: por una parte la energía mecánica es responsable del desprendimiento del fragmento en el fondo del pozo, mientras que la energía hidráulica de los fluidos es utilizada en sí para el proceso de remoción. A partir de lo mostrado por Hawker D., Vogt K. & Robinson A.³⁸ una vez en superficie los cortes son llevados a mecanismos de separación, que se encargan de la remoción de estos residuos sólidos del lodo usado durante la perforación, dichos mecanismos se conocen comúnmente como zarandas.

Tal como menciona el mismo autor³⁹ una vez los cuttings o cortes de perforación son separados en las zarandas, los mismos son recogidos en tanques, para ser transportados a lugares donde pueden ser tratados o limpiados según sea el caso. Tal como se puede apreciar, la escala de generación así como la naturaleza de los cortes de perforación hace imperativo el desarrollo de actividades para su tratamiento y eliminación adecuada.

Por otra parte, retomando lo mencionado con anterioridad, se puede decir que los cortes de perforación al estar en contacto con sustancias altamente contaminantes, adquieren una característica que los hace meritorios de entrar en la subdivisión de los residuos tipo peligroso. De esta manera, para tener una mayor claridad en su clasificación en el contexto colombiano, mediante el decreto 4741 de 2005 se pueden posicionar según el anexo I de este documento, dentro de la subdivisión denotada como “Y9 Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua”⁴⁰. Esto se debe principalmente al contenido orgánico que adquieren al entrar en contacto con los fluidos de la formación.

Cabe añadir que este tipo de residuos, al encontrarse saturado por una serie de sustancias diferentes a hidrocarburos, las cuales provienen principalmente de la interacción que sufren con los lodos de perforación; pueden ser clasificados dentro de otras categorías de este documento, tal como lo es el subgrupo “Y6 Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de disolventes orgánicos”⁴¹. Por otro lado, dentro de este decreto se especifica además la

³⁷ SKALLE PAL. Drilling Fluid Engineering. Bookboon, 2010. p. 55.

³⁸ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 29.

³⁹ Ibid. p. 29.

⁴⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 4741 de 2005 (30, Diciembre, 2005): por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, Bogotá D.C. Diario Oficial 46130, 2005.

⁴¹ COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 4741 (30, Diciembre, 2005): por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, Bogotá D.C. Diario Oficial 46130, 2005.

clasificación de los residuos peligrosos teniendo en cuenta la corriente de residuos (anexo II), para lo cual los cortes de perforación se situarían en los desechos tipo “A4 Desechos que pueden contener constituyentes inorgánicos u orgánicos”⁴², y más específicamente a la sub categoría “A4060 Desechos de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua”⁴³, pues se encuentran en contacto con hidrocarburos.

Finalmente, teniendo en cuenta los posibles componentes que pueden saturar los cortes de perforación, se tiene presente que para Colombia dichos compuestos tienen un valor máximo permisible regido por el decreto 4741 de 2005, en el cual se considera residuo o desecho toxico a “aquel que, al realizársele una prueba de lixiviación para característica de toxicidad (conocida como prueba TCLP), contiene uno o más de las sustancias, elementos o compuestos que se presentan en la Tabla 3 en concentraciones superiores a los niveles máximos permisibles en el lixiviado establecidos en dicha tabla”⁴⁴; ahora bien, la tabla mencionada contiene algunos de los posibles compuestos que están contenidos en los cuttings, así como sus concentraciones (mg/L) correspondientes:

Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP

“CONTAMINANTE NUMERO CAS NIVEL MAXIMO PERMISIBLE EN EL LIXIVIADO (mg/L)”⁴⁵

Arsénico 7440-38-2 5.0
Bario 7440-39-3 100.0
Benceno 71-43-2 0.5
Cadmio 7440-43-9 1.0
Tetracloruro de carbono 56-23-5 0.5
Clordano 57-74-9 0.03
Clorobenceno 108-90-7 100.0
Cloroformo 67-66-3 6.0
Cromo 7440-47-3 5.0
o-Cresol 95-48-7 200.0
m-Cresol 108-39-4 200.0
p-Cresol 106-44-5 200.0
Cresol – 3 200.0
2,4-D 94-75-7 10.0

⁴² Ibid.

⁴³ Ibid.

⁴⁴ Ibid.

⁴⁵ Ibid.

1,4-Diclorobenceno 106-46-7 7.5
 1,2-Dicloroetano 107-06-2 0.5
 1,1-Dicloroetileno 75-35-4 0.7
 2,4-Dinitrotolueno 121-14-2 2 0.13
 Endrin 72-20-8 0.02
 Heptacloro (y sus epóxidos) 76-44-8 0.008
 Hexaclorobenceno 118-74-1 2 0.13
 Hexaclorobutadieno 87-68-3 0.5
 Hexacloroetano 67-72-1 3.0
 Plomo 7439-92-1 5.0
 Lindano 58-89-9 0.4
 Mercurio 7439-97-6 0.2
 Metoxiclor 72-43-5 10.0
 Metil etil cetona 78-93-3 200.0
 Nitrobenceno 98-95-3 2.0
 Pentaclorofenol 87-86-5 100.0
 Piridina 110-86-1 5.0
 Selenio 7782-49-2 1.0
 Plata 7440-22-4 2 5.0
 Tetracloroetileno 127-18-4 0.7
 Toxafeno 8001-35-2 0.5
 Tricloroetileno 79-01-6 0.5
 2,4,5-Triclorofenol 95-95-4 400.0
 2,4,6-Triclorofenol 88-06-2 2.0
 2,4,5-TP (silvex) 93-72-1 1.0
 Cloruro de vinilo 75-01-4 0.2
 1 CAS = Chemical Abstract Service.

1.1.6 Tratamiento de residuos

El término tratamiento de desperdicios ha sido referido por una serie de autores y fuentes; por una parte la organización de las Naciones Unidas plasma este término en su herramienta en línea UN data como aquellos “métodos que son usados para degradar la característica de peligrosidad de un residuo peligroso a uno en forma de gas o más frecuentemente para modificar las propiedades químicas del desecho”⁴⁶, por otro lado la Agencia de Protección Ambiental define al mismo como “Cualquier método, técnica o proceso diseñado para remover sólidos y/o contaminantes de desperdicios sólidos, corrientes de desperdicios, efluentes o emisiones de aire”⁴⁷, por otra parte, en algunas fuentes se puede evidenciar que la definición da una importancia mayor al proceso de aprovechamiento posterior del

⁴⁶ UNdata- Glossary. *Base de información UN*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 01 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://data.un.org/Glossary.aspx?q=treatment>>.

⁴⁷ AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario.[citado julio 01 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-t>>.

material, tal como se encuentra estipulado en el Glosario de Salud Ambiental, en el cual consideran que el termino tratamiento hace referencia a “la transformación física, térmica o biológica de los residuos sólidos para modificar sus características o tomar ventajas de su potencial”⁴⁸, mientras que otros autores simplifican esta definición, tal como se puede apreciar en el trabajo de Fromm C. H, Callahan M. S. quienes en su apartado introductorio consideran al tratamiento como “cualquier actividad o serie de actividades que resultan en la reducción del volumen y/o toxicidad de un residuo peligroso”⁴⁹.

El termino tratamiento es definido por la European Environment Agency como “todos aquellos procesos o combinaciones de los mismos que cambian la composición química, física o biológica de cualquier residuo”⁵⁰ de esta manera existen en general tratamientos de naturaleza “química biológica, física, y termal”⁵¹.

Considerando lo anterior asi como la misma fuente⁵², se puede decir que un tratamiento químico es aquel proceso que altera la estructura del residuo para producir un material de menor nivel de peligrosidad, este se diferencia del tratamiento biológico según la EPA⁵³, en cuanto a que en el mismo se hace uso de bacterias para consumir el posible contenido orgánico existente en el desecho, por otra parte el tratamiento físico es considerado por la European Environment Agency como todos aquellos “procesos que separan los componentes de un flujo de residuos o cambian la forma física del desecho sin alterar la estructura química de los materiales constituyentes”⁵⁴. Finalmente, dentro de las subdivisiones de los tipos

⁴⁸ VIRTUAL LIBRARY IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ENVIRONMENTAL HEATH, WORLD HEALTH ORGANIZATION, PAN AMERICAN HEATH ORGANIZATION. Glossary on Environmental Health. Lima, 2003. p. 253.

⁴⁹ WORLD BANK, citado por FROMM C. H, CALLAHAN M. S. Waste Reduction Audit Procedure A Methodology for Identification, Assessment and Screening of Waste Minimization Options. Hazardous & Toxic Materials Division Jacobs Engineering Group Incorporated. California, Estados unidos. p. 1.

⁵⁰ ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=waste%20treatment>

⁵¹ ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=waste%20treatment>

⁵² ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=chemical%20treatment%20of%20waste >.

⁵³ AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario.[citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-t>>.

⁵⁴ ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=physical%20treatment>

de tratamiento se encuentra el tratamiento térmico, el cual a grandes rasgos consiste en el uso de altas temperaturas para tratar el material de desecho, tal como lo estipula la Agencia de Protección ambiental de Los Estados Unidos, dentro de esta clase se encuentran las técnicas de incineración y pirolisis.

1.1.7 Disposición de residuos

Al igual que todos los residuos que son manejados en actividades industriales, los cortes de perforación deben ser dispuestos correctamente, por lo cual es de utilidad tener claridad sobre el concepto existente para este término, de esta manera una serie de autores lo han definido; por una parte la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos considera como disposición al “depósito final o la destrucción de desperdicio tóxicos radioactivos o de otra naturaleza”⁵⁵, de esta forma aprueba métodos reglamentarios tales “como uso de vertederos aprobados, almacenamiento sobre superficie, cultivo de terreno, inyecciones de pozos profundos, descarga en el océano o incineración”⁵⁶, esta definición y métodos empleados son compartidos en gran medida por la herramienta en línea de las Naciones Unidas UNSata⁵⁷, en la cual considera la disposición de desechos como las técnicas de eliminación entre las cuales se resaltan el enterramiento, el uso de contenedores, la disposición en el subsuelo y la disposición por la borda, por otro lado, algunas fuentes definen este término como un proceso en conjunto, tal como se puede encontrar en el glosario de términos de la European Environment Agency⁵⁸, la cual considera la recolección, clasificación, transporte, tratamiento y eliminación en superficie o en el subsuelo como parte del proceso de disposición.

Cabe mencionar que existen una serie de fuentes en las cuales se hace un listado de las posibles formas de disposición existentes, tal como es el caso de la convención de Basilea, la cual estipula en su apartado escrito como proceso de disposición a todos aquellos “procesos en los cuales no exista la posibilidad de una recuperación de recursos, reciclado, reclamación, re uso directo o alternativas de usos”⁵⁹, de esta manera en dicho documento se enlista en el anexo IV cada uno de los posibles métodos para realizar este procedimiento.

⁵⁵ AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario[citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-e>>.

⁵⁶ AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario[citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-e>>.

⁵⁷ UNdata- *Glossary. Base de información UN*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 04 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://data.un.org/Glossary.aspx?q=disposal>>.

⁵⁸ ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=waste%20disposal>.

⁵⁹ BASEL CONVENTION, UNEP. *Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal – Protocol on Liability and Compensation for Damage Resulting from Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal*. 1999, p. 54.

Por su parte dentro del glosario concerniente del apartado ambiental del Banco Mundial considera como disposición de residuos a la “colocación final o destrucción del contenido toxico radioactivo u otros desechos”⁶⁰, además menciona⁶¹ algunas de las técnicas para la eliminación de este tipo de material, tales como el uso de vertederos seguros (landfills), depósitos de superficie, landfarming, pozos de inyección, eliminación por la borda e incineración ; esta definición es simplificada en el glosario de términos de residuos peligrosos de la CEPIS como la “acción de disponer los residuos peligroso por diversos métodos, por ejemplo sobre el suelo, en el subsuelo, en el mar o en rellenos especialmente diseñados”⁶².

Teniendo en cuenta la naturaleza de desecho que poseen los cortes de perforación, se hace imperativo realizar procesos de tratamiento y disposición final, con el objetivo de disminuir la traza ambiental relacionada este tipo de residuo, para esto existen una serie de tecnologías enfocadas en los residuos tipo corte de perforación, las cuales serán tratadas con profundidad en el desarrollo de los siguientes capítulos.

1.1.8 Tecnologías de tratamiento

Las tecnologías de tratamiento de residuos según el U.S. Department Of Defense se definen como aquellas “técnicas capaces de la destrucción o minimización del contenido contaminante, mediante la alteración de su estructura química, entre las cuales existen los métodos térmicos, biológicos y químicos”⁶³, cabe mencionar que dichas tecnologías “pueden ser aplicadas de manera in-situ o ex-situ”⁶⁴.

Ahora bien, dentro de la herramienta en línea: Federal Remediation Technologies Round Tables⁶⁵, se aglomeran el conjunto de tecnologías usadas para la remediación o minimización del potencial contaminante de un residuo, para lo cual se definen en general tres tipos de estrategias de tratamiento:

- *Tecnologías de tratamiento capaces de la destrucción del contaminante alterando su estructura química.*

⁶⁰ WORLD BANK GROUP. Pollution Prevention and Abatement Handbook. Glossary of Environmental Terms. 1998, p. 446.

⁶¹ Ibid. p. 446.

⁶² BENAVIDES, M. RISSO, W. - VIRTUAL LIBRARY IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ENVIRONMENTAL HEALTH- CEPIS. *Glosario de residuos peligrosos*. [en línea], [citado julio 05 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt046-a.html>>.

⁶³ U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Federal Remediation Technologies Round Tables* [en línea] sec. Inicio [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: <https://frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html>

⁶⁴ U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Federal Remediation Technologies Round Tables* [en línea] sec. Inicio [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: <https://frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html>

⁶⁵ U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Federal Remediation Technologies Round Tables* [en línea] sec. Inicio. [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: https://frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html

- *Tecnologías de tratamiento comúnmente usadas para la extracción y separación de los contaminantes:* dentro de las cuales se encuentran el tratamiento de suelos mediante desorción térmica, el lavado de suelos, la extracción de solventes y la extracción de vapor del suelo, entre otras.
- *Tecnologías de inmovilización:* incluyendo de esta manera técnicas de estabilización, solidificación y tecnologías de contingencia, tales como el uso de landfills o la construcción de paredes para lechada.

Teniendo en cuenta las estrategias referidas anteriormente, se puede decir que el tratamiento de los cortes de perforación, está enfocado a la separación o extracción del material contaminante, así como en su defecto a la inmovilización del mismo.

Ahora bien, en el glosario de términos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, se da la definición para los dos tipos de tecnologías de tratamiento, en función del nivel de aplicabilidad técnica de las mismas; de tal manera que considera como tecnologías de tratamiento establecidas, como aquellas “tecnologías para las cuales los datos de costo y rendimiento están fácilmente disponibles”⁶⁶, y en contraposición establece como tecnologías de tratamiento innovadoras como “los métodos nuevos o inventivos que tratan desperdicios peligrosos efectivamente y reducen riesgos a la salud humana y al medio ambiente”⁶⁷. Teniendo en cuenta estas definiciones, se pretende profundizar en cada una de las tecnologías convencionales implementadas en el tratamiento y disposición de cortes de perforación, así como en las nuevas tecnologías que se encuentran en fase de investigación.

1.2 MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo de esta monografía se hace necesario especificar los conceptos principales tratados a lo largo de este trabajo, por lo cual en este apartado se pretende explicar cada uno de dichos conceptos, teniendo en cuenta el contexto más acorde con el enfoque necesario para esta investigación, de tal forma se ha de tratar los términos afines con los objetivos principales del trabajo y referidos con anterioridad en el Marco Teórico. Este trabajo investigativo se encuentra enfocado en la industria del Petróleo, y más específicamente en la fase de perforación de pozos, en la cual se generan una gran variedad de residuos, teniendo en cuenta lo anterior, se hace imperativo especificar en primer lugar el concepto de perforación de pozos; para el cual no existe una variación importante entre los diferentes

⁶⁶ AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario. [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-t> >.

⁶⁷ AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario. [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-t> >.

autores, puesto que este término hace referencia a una operación en específico, de esta manera el concepto de perforación puede ser considerado tal como se encuentra en la obra de Hawker D. y Vogt K. los cuales consideran que: “la operación de perforación implica bajar la sarta de perforación dentro del pozo y aplicar suficiente peso a la broca para romper y penetrar la formación. Durante la perforación, la sarta de perforación es forzada a girar por la mesa rotaria o por el Top Drive mientras se circula fluido de perforación por entre la tubería, y la broca y de regreso a la superficie arrastrando los cortes de perforación”⁶⁸.

Cabe añadir que durante la operación de perforación de un pozo se da la subdivisión del mismo en diferentes secciones, las cuales una vez perforadas son entubadas con la tubería de revestimiento, y se continua con la perforación del siguiente tramo del pozo tal como lo menciona Varhau; estas operaciones tal como menciona Barberii, Efrain⁶⁹ se hacen mediante el apoyo en los diferentes sistemas usados en la perforación, tal como lo son: el sistema de Izaje, el sistema rotativo y el sistema de fuerza motriz.

Como se mencionó anteriormente, y según lo plasmado por Gomez Romo, J. A., & González Rivera, J. W.⁷⁰ durante el desarrollo de una operación de perforación se generan una variedad importante de residuos, los cuales abarcan diferentes categorías según su naturaleza, tales como domésticos, especiales y de tipo peligroso, de tal forma que teniendo en cuenta el contexto de generación de este material de desecho, se puede asegurar que el concepto general para el termino residuo que más se ajusta a esta investigación es el referido por PNUMA, donde se da una definición enfocada en el proceso, en el cual un material de desecho es “todo subproducto de los procesos de producción, valorización o consumo que en un momento del desarrollo social y técnico es rechazado por no considerarlo apto para los mismos”⁷¹, cabe añadir que este concepto puede ser complementado con el valor de responsabilidad inherente al residuo dada en el Convenio de Basilea, donde los residuos o desechos son aquellas “Sustancias u objetos cuya eliminación se procede, se propone a proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional”⁷².

⁶⁸ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 74.

⁶⁹ BARBERII, EFRAIN. E. El pozo ilustrado, publicado editado por el Departamento de Relaciones Publicas, Lagoven S.A, cuarta edición, Caracas, Diciembre 1985. p. 92.

⁷⁰ GOMEZ ROMO, J. A., & GONZÁLEZ RIVERA, J. W. Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos del norte. Trabajo de Grado, Bucaramanga, 2009. p. 33-36.

⁷¹ SANCHEZ V., GUIZA G. UNESCO-PNUMA. Programa Internacional de Educación Ambiental- Glosario de Términos sobre Medio Ambiente. Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe, 1989. 39.

⁷² PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. Convenio de Basilea: Sobre el control de los Movimientos Transfronterizos de los desechos Peligrosos y su Eliminación. 1989. p. 10.

A partir de la definición del concepto de residuo, se puede simplificar el término residuo de perforación, a aquel material que es generado como un subproducto de la perforación de un pozo, de tal manera que según Gomez Romo, J. A., & González Rivera, J. W.⁷³ dentro de estos pueden existir diferentes tipos, tales como residuos domésticos procedentes de las actividades en las locaciones (campamentos y casinos), residuos especiales tales como aceites, baterías, llantas, lodos, cauchos y desechos impregnados de hidrocarburos, y finalmente residuos peligrosos, dentro de los cuales se destacan los lodos y cortes de perforación, los cuales debido a su naturaleza y escala de generación representan una situación desafiante para su tratamiento y disposición.

Con respecto a lo tratado con anterioridad, durante el proceso de perforación se hace uso de los lodos de perforación, término que no varía significativamente entre los diferentes autores, de tal manera que para el contexto de esta monografía, pueden ser definidos tal como se encuentra referido en el Drilling Fluids Processing Handbook como “cualquier fluido que es usado en una operación de perforación en la cual dicho fluido es circulado o bombeado desde superficie por medio de la sarta de perforación, dentro de la broca y de vuelta a superficie por medio del anular”⁷⁴, cabe añadir que esta sustancia debe cumplir una serie de funciones dentro del proceso, dentro de las cuales se destacan las mencionadas por Hawker D., Vogt K., & Robinson A⁷⁵: Transportar los cortes de perforación por el circuito del pozo hacia superficie, controlar las presión de fondo, lubricar la broca y formar una capa de baja permeabilidad en la cara de la formación, aclarando que las mismas son mencionadas por Skalle Pal., Growcock F. & Harvey T., H. C. H. Darley, George R. Gray.

Finalmente, para el concepto de lodo de perforación cabe añadir que los mismos pueden ser clasificados en general según Growcock F. & Harvey T⁷⁶. como: Gaseosos, con la posibilidad de hacer uso de aire o nitrógeno, los fluidos acuosos con contenido de arcilla, polímero y espuma y finalmente los no acuosos con la posibilidad de hacer uso de aceite o sintético como medio base.

Ahora bien, teniendo en cuenta el transporte de los cortes de perforación efectuado por el movimiento de los lodos a través del circuito cerrado, se ha de tener claridad

⁷³ GOMEZ ROMO, J. A., & GONZÁLEZ RIVERA, J. W. Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos del norte. Trabajo de Grado, Bucaramanga, 2009. p. 33-34.

⁷⁴ ASME, Cap 2 by GROWCOCK F. & HARVEY T. Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier. United States, 2005, p. 15.

⁷⁵ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, p. 56-58.

⁷⁶ ASME, Cap 2 by GROWCOCK F. & HARVEY T. Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier. United States, 2005, p. 15-16.

en el concepto de Cuttings o cortes de perforación, para lo cual al no variar esta definición para la mayoría de los autores, se puede decir que estos hacen referencia los fragmentos de “roca extraída del subsuelo durante la perforación, contaminados con el lodo de perforación, aceite, etc.”⁷⁷, tal como se estipula en la Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas, esta definición posee cierto grado de generalización con respecto a la composición de este tipo de desecho, hecho que es justificable, puesto que la misma variara naturalmente con la formación que es perforada. Para complementar este concepto considerando lo plasmado por Hawker D., Vogt K, & Robinson A.⁷⁸, se puede añadir que estos sólidos son transportados por lodos hasta superficie, donde serán separados mediante mecanismo de remoción de sólidos, conocidos comúnmente como zarandas.

Una vez los cortes son retirados de los lodos de perforación, se hace necesario el desarrollo de actividades de tratamiento, teniendo en cuenta que el concepto que más se ajusta al contexto de esta monografía es el planteado por la Organización de las Naciones Unidas, la cual considera como tratamiento a aquellos “métodos que son usados para degradar la característica de peligrosidad de un residuo peligroso a uno en forma de gas o más frecuentemente para modificar las propiedades químicas del desecho”⁷⁹, este concepto resalta la necesidad de la reducción del nivel de peligrosidad que representa la interacción de los residuos con el ambiente, hecho que se ve reflejado en los residuos tipo corte de perforación, puestos que los mismos al estar en contacto con los fluidos de pozo así como con lodos de perforación, adquieren niveles de contaminación considerables.

De esta manera los cortes de perforación generados y una vez tratados, deben ser dispuestos de la mejor manera, por lo cual para el desarrollo de esta monografía, se entenderá como proceso de disposición, según la UN así como el Banco Mundial⁸⁰ a aquellos procedimientos enfocados en la eliminación de los residuos mediante técnicas como el enterramiento, el uso de contenedores, la disposición en el subsuelo, la disposición por la borda, los depósitos de superficie, landfarming, pozos de inyección e incineración, cabe aclarar que el concepto de disposición referido en este trabajo involucra las técnicas mencionadas con anterioridad, que son una combinación de las sugeridas por la Organización de las Naciones Unidas y el Banco Mundial.

⁷⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE; ACP. Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas, 1999. p. PER-6-051.

⁷⁸ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 29.

⁷⁹ UNdata- Glossary. *Base de información UN*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 01 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://data.un.org/Glossary.aspx?q=treatment>>.

⁸⁰ WORLD BANK GROUP. Pollution Prevention and Abatement Handbook. Glossary of Environmental Terms. 1998, p. 446.

Finalmente, para la implementación de los procesos de tratamiento y disposición de cortes de perforación se hace uso de las tecnologías de tratamiento, las cuales son definidas en este contexto como aquellas “técnicas capaces de la destrucción o minimización del contenido contaminante, mediante la alteración de su estructura química, entra las cuales existen los métodos térmicos, biológicos y químicos”⁸¹. Además, se tienen en cuenta los conceptos de tecnologías de tratamientos establecidas como aquellas “tecnologías para las cuales los datos de costo y rendimiento están fácilmente disponibles”⁸², así como las tecnologías de tratamiento innovadoras definidas como “los métodos nuevos o inventivos que tratan desperdicios peligrosos efectivamente y reducen riesgos a la salud humana y al medio ambiente”⁸³.

⁸¹ U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Federal Remediation Technologies Round Tables* [en línea] sec. Inicio. [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: https://frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html

⁸² AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glossary. [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-t>.

⁸³ AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glossary. [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-t>.

2. CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE GENERACIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

La perforación de un pozo de petróleo según Varhaug, A.⁸⁴ es una de las fases más importantes de la explotación de hidrocarburos, puesto que representa la culminación de los procesos de exploración realizados con anterioridad, de tal manera que únicamente por medio de este procedimiento se puede determinar la prospectividad real de un área o formación.

Basado en lo mencionado por este mismo autor⁸⁵ el primer paso durante un proceso de perforación, consiste en la instalación del equipo de perforación en la localización, actividad que es adelantada por la cuadrilla de perforación; posteriormente este grupo de trabajadores realiza el armado del ensamblaje de fondo o BHA (Bottom Hole Assembly); los cuales constan generalmente de los lastra barrenas, los estabilizadores y los rectificadores, dicho BHA tal como es referido por Hawker D., Vogt K., & Robinson A.⁸⁶ Datalog se encuentra conectado a la sarta de perforación, la cual transmite la energía rotativa necesaria para lograr la apertura del pozo, para que esto sea posible se hace uso naturalmente de una broca o barrena, tal como menciona Barberii, Efrain. E.⁸⁷, la cual se encuentra localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación, haciendo parte de los ensamblajes de fondo y cuya función principal es cortar o triturar la formación en la que se encuentre actuando.

Durante una actividad de perforación, tal como refiere el mismo autor⁸⁸, usualmente posee diferentes tipos de sistemas, entre los cuales se encuentran el sistema rotatorio, el sistema de izaje, el sistema de potencia y el sistema de circulación, siendo este último el encargado de dar el movimiento de los lodos de perforación en circuito cerrado. De esta manera según Hawker D., Vogt K., & Robinson A.⁸⁹ a partir del sistema rotatorio se da el movimiento de la broca mediante la energía transmitida por la tubería de perforación, bajando así el BHA por el cabezal del pozo hacia el interior de la tubería guía superficial o conductor.

⁸⁴ VARHAUG, A. Un giro a la derecha: Una Visión general de las operaciones de perforación Oilfield Review, Schlumberger. Volumen 23, n° 3, 2012. p. 61.

⁸⁵ Ibid. p. 61.

⁸⁶ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 74.

⁸⁷ BARBERII, EFRAIN. E. El pozo ilustrado, publicado editado por el Departamento de Relaciones Publicas, Lagoven S.A, cuarta edición, Caracas, Diciembre 1985. p. 92.

⁸⁸ Ibid. p. 92.

⁸⁹ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 70.

Ahora bien y teniendo en cuenta lo mencionado por Hawker D., Vogt K., & Robinson A.⁹⁰. a medida que se procede con la perforación, se hace necesario aumentar la longitud de la tubería de perforación o drill pipe, por lo cual se realizan las conexiones de diferentes tubulares, los cuales usualmente son conectados en “paradas” correspondientes a tres tubos de drill pipe; durante estos procedimientos de conexión se interrumpe momentáneamente la circulación, de tal manera que la sarta se cuelga en las cuñas destinadas para este propósito, facilitando de esta manera la conexión de dos tubulares

Durante la perforación de un pozo según Varhaug, A.⁹¹, usualmente se realiza la subdivisión del mismo en diferentes secciones, con el objetivo de dar una mayor integridad frente a los posibles derrumbes en superficie, las zonas someras de agua y las fracturas que puede sufrir la formación en las secciones intermedias del pozo (ver figura 1), de tal manera que una vez se ha perforado una sección, la misma es entubada por medio de la instalación o bajada de una tubería de revestimiento; posteriormente se bombea una mezcla de cemento en el espacio formado entre la formación y la pared del casing, finalizando de esta manera el completamiento de esta sección.

Una vez se da el completamiento de una sección, se procede a continuar la perforación del pozo por medio de una broca de menor tamaño; este proceso se repite hasta llegar a la profundidad de la formación objetivo. El uso de tubería de revestimiento según Hawker D., Vogt K & Robinson A.⁹² tiene el objetivo de crear un sistema de circulación cerrado, permitiendo así el flujo de los lodos de perforación.

⁹⁰ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 74.

⁹¹ VARHAUG, A. Un giro a la derecha: Una Visión general de las operaciones de perforación Oilfield Review, Schlumberger. Volumen 23, n° 3, 2012. p. 63.

⁹² HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 70.

Figura 1. Secciones comunes de un pozo.

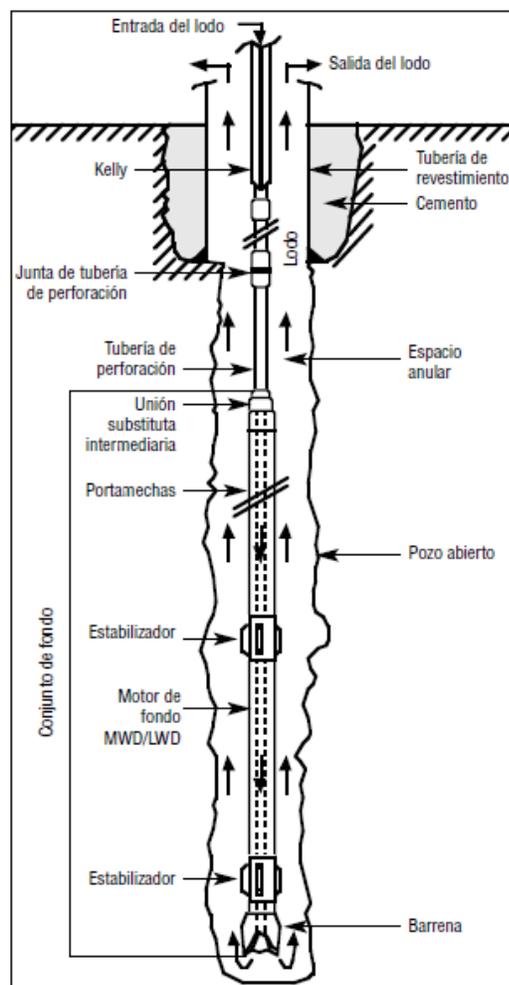


Fuente: VARHAUG, A. Un giro a la derecha: Una Visión general de las operaciones de perforación Oilfield Review, Schlumberger. Volumen 23, n° 3, 2012. p. 63.

Tal como se menciona en la obra de Varhaug⁹³, A. a partir de la energía proporcionada por las bombas de alta presión, se extrae el fluido de perforación de los tanques de superficie y el mismo es circulado por el interior de la sarta de perforación, para ser posteriormente descargado por las boquillas situadas en la broca. Una vez en fondo de pozo la presión de la bomba impulsa el fluido de perforación hacia arriba, haciendo que el mismo se desplace dentro del espacio anular existente entre el drill pipe y la tubería de revestimiento hasta superficie (Ver Figura 2).

⁹³ VARHAUG, A. Un giro a la derecha: Una Visión general de las operaciones de perforación Oilfield Review, Schlumberger. Volumen 23, n° 3, 2012. p. 62.

Figura 2. Circuito cerrado de circulación durante la perforación de un pozo.



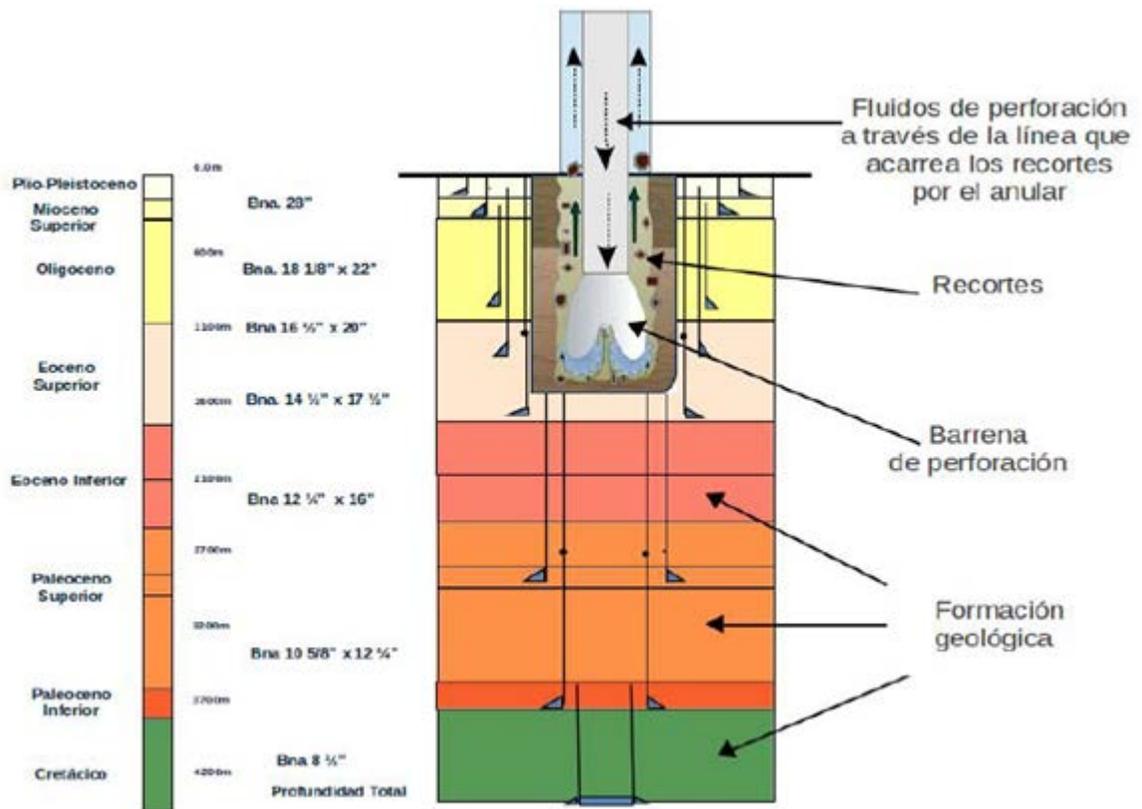
Fuente: INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO, ENERGY API. Manual de Fluidos de Perforación. Texas, United States, p. 1.9.

Tal como se refiere en el plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco⁹⁴, una de las funciones principales que cumple el lodo de perforación mediante su circulación en el pozo, es la de transportar los cortes hasta superficie, los cuales se generan cuando la broca entra en contacto con la formación; el movimiento rotativo de la mismas provoca dichos desprendimientos de roca, que al encontrarse en contacto con los lodos de perforación quedan impregnados con residuos de estos.

⁹⁴ MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES SEMARNAT. Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco, 2012. p. 18-19.

Teniendo en cuenta lo mencionado en esta misma fuente⁹⁵, los cortes de perforación o cuttings se separan de la formación en la parte más profunda del pozo, los cuales debido a su tamaño pueden ser transportados y removidos a través del flujo de los lodos de perforación; este proceso se da de una manera continua a medida que se avanza en la formación (ver figura 3). Tal como se dijo con anterioridad, dichos residuos son llevados hasta superficie, más específicamente a las unidades de control de sólidos.

Figura 3. Esquema de generación de cortes de perforación.

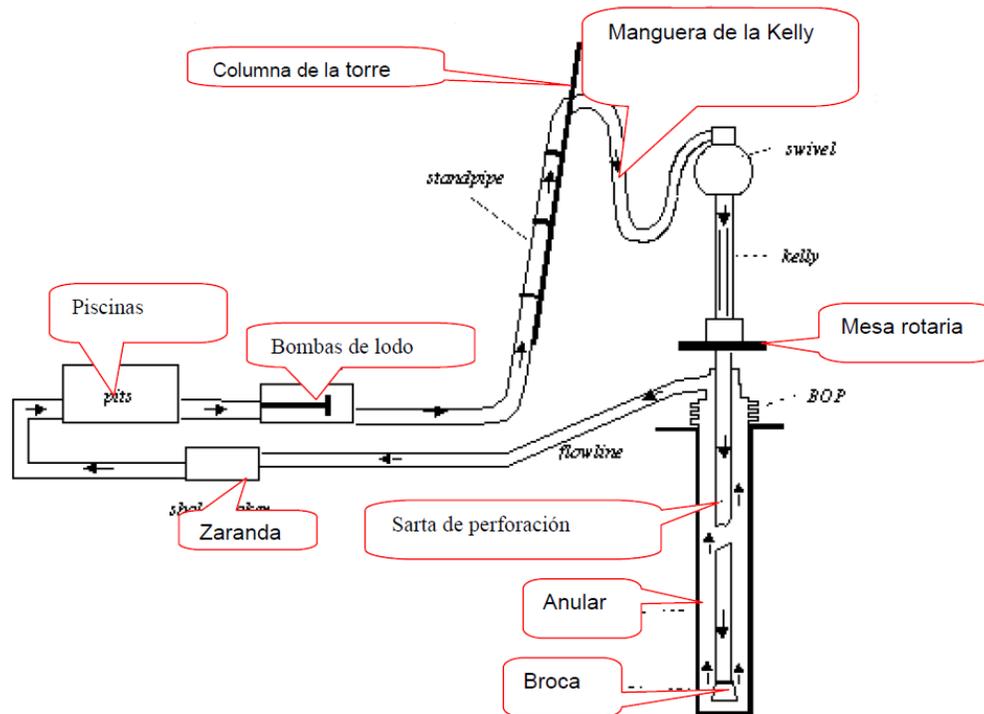


Fuente: MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES SEMARNAT. Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco, 2012. p. 19.

⁹⁵ MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES SEMARNAT. Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco, 2012. p. 18-19.

A partir de lo mencionado en el Manual de Fluidos de Perforación Energy APY⁹⁶, se sabe que en superficie el lodo y su carga de cortes de perforación fluyen fuera del niple campana, pasando por el interior de la línea de flujo (*flow line*) hasta llegar al sistema de control de sólidos, donde son recibidos por una serie de mallas vibratorias, que se encargan en general de la limpieza del lodo, según Hawker D., Vogt K., & Robinson A.⁹⁷ una vez este sale de las zarandas es circulado a las piscinas o tanques de lodos, para ser reutilizado en el proceso, cerrando de esta manera el circuito (ver figura 4).

Figura 4. Circuito de circulación del lodo de perforación.



Fuente: HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 26.

El uso de equipos de control de sólidos es de gran importancia para mantener la eficiencia de la perforación tal como menciona Hawker D., Vogt K. & Robinson A.⁹⁸, puesto que si se da una acumulación de este material se dará un aumento en los costos de tratamiento químico, mala hidráulica y altas presiones de bombeo; lo cual dificultará posteriormente las operaciones de remoción.

⁹⁶ INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO, ENERGY API. Manual de Fluidos de Perforación. Texas, United States, p. 1.12.

⁹⁷ HAWKER D., VOGT K. & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 26.

⁹⁸ Ibid. p. 28.

Como se dijo con anterioridad basado en lo expuesto por Hawker D., Vogt K., & Robinson A.⁹⁹, el lodo que llega a este equipo contiene tanto los cortes de perforación que fueron removidos del pozo, así como arena y otros materiales, los cuales deben ser removidos del sistema de lodos; de esta manera que se hace pasar el lodo mezclado a través de una serie de mallas metálicas inclinadas que se encuentran vibrando, las cuales normalmente poseen diferentes calibres para realizar el tamizaje del material sólido, por lo cual las de mayor tamaño se instalan en la parte superior y las de calibre más fino en la parte inferior; cabe mencionar que el movimiento vibratorio mejora la separación de los cortes de los lodos de perforación.

En el Manual de Fluidos de Perforación Energy API¹⁰⁰ se discute este proceso por lo cual se plantea que después de pasar a través del conjunto de mallas vibratorias, el lodo cae dentro de un tanque de asentamiento, los cuales usualmente poseen gran tamaño y se encuentran conectados por tuberías o canales; dentro de estos no se produce movimiento vibratorio, de tal manera que los sólidos residuales pueden ser separados mediante asentamiento. Posteriormente el lodo pasa dentro de una serie de fosos de lodo agitados, donde se da la separación del gas, arena y limo residual, finalmente el lodo es llevado a los tanques de succión, donde mediante bombas de lodos es extraído y puesto en circulación nuevamente.

2.1 ESCALA DE GENERACIÓN DE LOS CORTES DE PERORACIÓN

Tal como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, durante una etapa de perforación se generan grandes cantidades de residuos tipo cortes de perforación, de tal manera que algunos autores cuantifican las cantidades promedios de generación en escenarios típicos para este procedimiento, tal como se encuentra en plasmado en el trabajo de Mendez, R., Gomez, P., Ledesma, J. & Cenicerros, C.¹⁰¹, quienes suponen que en una situación hipotética de un pozo de 16000 pies de profundidad se generaran alrededor de 4000 barriles de cortes de perforación, además aclaran que el mayor volumen de generación se dará en las etapas iniciales de la perforación, puesto que en las mismas se tiene el diámetro de apertura mayor para todo el proceso.

Otro ejemplo de este escenario de generación de cortes de perforación se da en el documento titulado Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco, en el cual se plantea la situación donde se tiene la perforación de un pozo

⁹⁹ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 29.

¹⁰⁰ INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO, ENERGY API. Manual de Fluidos de Perforación. Texas, United States, p. 1.12 – 1.13.

¹⁰¹ MENDEZ, R., GOMEZ, P., LEDESMA, J., CENICEROS, C. Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013. p. 5.

en configuración vertical, alcanzando una profundidad de 2000 pies. El diseño de perforación para este pozo empieza con un diámetro de 36 pulgadas y termina el mismo en una sección de 7 ¼ pulgadas, de esta manera el arreglo de las tuberías será el siguiente: “36 in X 100 ft; 22 in X 300 ft; 18 in X 500 ft; 9 5/8 in X 500 ft y 7 ¼ in X 100 ft”¹⁰². A partir de la anterior configuración se estima un volumen de 118962 L para un pozo de aproximadamente 610 metros.

Tal como se puede apreciar; el volumen de cortes generados varía naturalmente con el tipo de pozo perforado, así como sus características; puesto que para algunos pozos dicho volumen de generación de residuos por pozo según el trabajo de Bilatayib. M., Eng. Mufazzal, S. Kabuli, Issa D., Ayyadand N., Ramires D.¹⁰³ puede llegar a encontrarse entre los 1000 m³ a los 5000 m³, este valor está determinado por una serie de factores discutidos por este autor¹⁰⁴ entre los cuales se encuentran: el tipo de formación perforada, la profundidad del pozo, el diámetro del pozo, el fluido de perforación aplicado, el sistema de control de sólidos, la tasa de perforación y los posibles escenarios que se pueden presentar durante el proceso.

Ahora bien, según Hawker D., Vogt K., & Robinson A.¹⁰⁵ si se perfora a una tasa constante, el volumen de cortes que llegan a superficie equivaldrá al volumen de un cilindro teniendo en cuenta los diferentes intervalos perforados. De tal manera que, si el volumen es mayor a este, puede existir una condición de poca estabilidad en el pozo, originada por posibles derrumbes de formaciones de baja estabilidad o zonas fracturadas; por el contrario, si el volumen de cortes es menor al calculado, se puede decir que existe una pobre limpieza del hueco, asociada a la capacidad de transporte de los cuttings.

¹⁰² MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES SEMARNAT. Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco, 2012. p. 6.

¹⁰³ BILATAYIB. M., ENG. MUFAZZAL, S. KABULI, ISSA D., AYYADAND N., RAMIRES D. Management of Drilling Cuttings in Term of Volume and Economics in Oil Field. Australian College of Kuwait, 2016, P 1-2.

¹⁰⁴ Ibid. p. 1-2.

¹⁰⁵ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, p. 253.

La cantidad de cortes que se generan dentro de cualquier pozo, puede ser medida en tiempo real tal como es expuesto en el trabajo de Hawker D., Vogt K., & Robinson A.¹⁰⁶, para lo cual simplemente se requiere de una bandeja situada en las zarandas que permita registrar el volumen de este tipo de desechos en un intervalo de tiempo, usualmente este parámetro se mide en Barriles/hora; cabe aclarar que este valor es considerado como el volumen real o actual de cortes producidos en un pozo, mientras que el calculado por medio de sus dimensiones es considerado como el volumen teórico de cortes (ver ecuación 1).

Ecuación 1. Volumen teórico de cortes generados en una sección

$$\text{Volumen de cortes generados por seccion} = \pi r^2 X h$$

$$\text{Volumen (BBS)} = \frac{(\text{Diametro de la broca})^2}{1029.46} X \text{ Longitud de la sección}$$

Fuente: HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 257.

Según este mismo autor¹⁰⁷; uno de los factores que afecta el volumen de cortes generados durante una operación es la tasa de penetración de la broca o ROP; de tal forma que este parámetro variará para los diferentes pozos, así como para las diferentes secciones del mismo (Ver Tabla 1). Como se puede observar el aumento en las ROP de una broca produce un aumento considerable en los residuos tipo corte de perforación cuyas unidades se encuentran dadas en *Bbl/Hr*.

Tabla 1. Efecto de diferentes ROPs con respecto a la tasa de generación de cortes.

	20 Ft/Hr	50Ft/Hr	100 Ft/Hr	200 Ft/Hr
Hueco de 16"	4.97	12.43	24.87	49.73
Hueco de 12 1/4"	2.92	7.29	14.58	29.15
Hueco de 8 1/2"	1.4	3.51	7.02	14.04
Hueco de 6"	0.7	1.75	3.5	7

Fuente: Adaptado de HAWKER D., VOGT K. & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, P. 257.

¹⁰⁶ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, p. 253-254.

¹⁰⁷ Ibid. p. 257.

La diferencia entre los valores correspondientes a volumen de cortes generados actuales y teóricos, según Hawker D., Vogt K., & Robinson A.¹⁰⁸ se pueden explicar debido a:

- Posibles errores cuando se extrapola el volumen de la bandeja en las zarandas.
- La existencia de sólidos finos que pasan por las mallas y no caen en las bandejas.
- La presencia de una capa de lodo sobre el volumen de cortes que llegan a la zaranda; haciendo que el mismo se vea incrementado con respecto al real.

A pesar de estas diferencias, este mismo autor¹⁰⁹. señala que la comparación de la medida actual tomadas por las zarandas con respecto a la teórica calculada, tiene la utilidad de mostrar los cambios en la condición, estabilidad y limpieza del pozo

Las ecuaciones descritas con anterioridad, pueden ser complementadas con el objetivo de tener en cuenta la eficiencia del sistema de control de sólido, para lo cual se puede hacer uso de la siguiente ecuación (ver ecuación 2):

Ecuación 2. Volumen teórico de cortes generados en una sección

$$S = \varepsilon X HV / F_s$$

Fuente: ASME, Cap 16 by Piper W.; Harvey T.; Mehta H. Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier. United States, 2005, p. 367.

Dónde:

S equivale al volumen de los sólidos perforados húmedos (Cortes de perforación) (bbl).

ε es la eficiencia del sistema de control de sólidos (Fracción).

HV es el volumen del pozo (bbl).

F_s equivale a la fracción de sólidos en el flujo de desecho (Fracción).

¹⁰⁸ HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001, p. 257-258.

¹⁰⁹ Ibid. p. 257-258.

2.2 COMPOSICIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

Tal como se ha referido con anterioridad, durante el proceso de perforación de un pozo se generan los cortes de perforación, que son básicamente los fragmentos o desprendimientos de roca generados por la acción de la broca con la formación, estos son extraídos del fondo del pozo mediante el flujo de los lodos de perforación. De esta manera se encuentran en contacto con los fluidos propios de la formación, así como los fluidos usados durante el proceso; por lo cual serán estos dos componentes los que saturaran en mayor medida este tipo de residuo. Ahora bien, durante las operaciones convencionales de perforación, usualmente se hace uso de lodos de perforación ya sea base aceite o base agua; hecho que diferenciará en gran medida el nivel y composición de la materia orgánica existente en los cuttings.

Por otra parte, cabe dejar en claro que el nivel y composición de los cortes variara naturalmente en cada operación de perforación; puesto que los lodos de perforación implementados así como la formación en la que actúa la broca serán diferentes; teniendo en cuenta lo anterior se han realizado estudios enfocados en la caracterización de la composición de los cortes de perforación en pozos específicos; tal como es el caso del trabajo de Sergio A. Vardaro; José A. Gálvez; José A. Cantero; A. Cecilia López; Guillermo Tettamanti; Ivanna Pineda titulado Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina¹¹⁰: caracterización y alternativas de tratamiento, este trabajo da a conocer la composición de los cortes de perforación en una operación típica, haciendo uso tanto de lodos base agua como base aceite. De esta manera los análisis químicos realizados a las muestras puntuales dentro de esta investigación fueron las siguientes:

Hidrocarburos totales de petróleo: EPA 418.1 modificada; Arsénico: EPA SW 846 7062; Bario, Cadmio, Cinc, Cobre, Cromo, Níquel, Plata, Plomo; Selenio: EPA SW 846 7000 B; Mercurio: EPA SW 846 7471 B; Caracterización cromatográfica: TNRCC 1006; Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno: EPA 8260; Naftaleno, Fenantreno, Pireno, Benzo antraceno (a), Benzo fluoranteno (b), Benzo fluoranteno (k), Benzo (a) pireno, Indeno pireno (1,2,3,dc), Dibenzo antraceno (a,h): EPA 8270 C. Humedad: ASTM D2216-71; Cloruros: Método de Mohr; Poder calorífico: ASTM D240; Cenizas: Método gravimétrico; Densidad: Método gravimétrico con picnómetro¹¹¹.

¹¹⁰ SERGIO A. VARDARO; JOSÉ A. GÁLVEZ; JOSÉ A. CANTERO; A. CECILIA LÓPEZ; GUILLERMO TETTAMANTI; IVANNA PINEDA. Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento. Universidad Nacional de Cuyo; Facultad de Ingeniería; Bioprocesos, 2013. p. 1-6.

¹¹¹ Ibid. p. 2.

En una primera instancia dichos autores¹¹² presentan los componentes orgánicos mediante la caracterización cromatográfica de los cortes de perforación (ver tabla 2) tanto para el escenario de aplicación de lodos base aceite como el uso de lodos base agua. Además se presenta la caracterización del contenido de hidrocarburos en estos dos escenarios (ver tabla 3).

Tabla 2. Caracterización Cromatográfica de los cortes de perforación.

Rango		Recorte base gasoil (ppm)		Recorte base agua (ppm)	
		Fracción alifática	Fracción aromática	Fracción alifática	Fracción aromática
GR O	C6	9	<5	<5	No detectable
	C6-C8	209	190	50	<5
	C8-C10	2593	429	86	24
	C10-C12	10375	537	1342	21
DR O	C12-C16	39000	697	1111	10
	C16-C21	50233	584	No detectable	No detectable
RO	C21-C35	2142	487	No detectable	No detectable

Fuente: Adaptado de SERGIO A. VARDARO; JOSÉ A. GÁLVEZ; JOSÉ A. CANTERO; A. CECILIA LÓPEZ; GUILLERMO TETTAMANTI; IVANNA PINEDA. Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento. Universidad Nacional de Cuyo; Facultad de Ingeniería; Bioprocesos, 2013. p. 4.

¹¹² SERGIO A. VARDARO; JOSÉ A. GÁLVEZ; JOSÉ A. CANTERO; A. CECILIA LÓPEZ; GUILLERMO TETTAMANTI; IVANNA PINEDA. Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento. Universidad Nacional de Cuyo; Facultad de Ingeniería; Bioprocesos, 2013. p. 4.

Tabla 3. Caracterización de los cortes de perforación.

Parámetro	Recorte base gasoil (mg/kg)	Recorte base agua (mg/kg)
Hidrocarburos totales de petróleo	275000	5500
Benceno	2	No detectable
Tolueno	26	No detectable
Etilbenceno	19	No detectable
Xileno	145	3
Naftaleno	493	No detectable
Fenantreno	140	No detectable
Pireno	No detectable	No detectable
Benzo antraceno (a)	No detectable	No detectable
Benzo fluoranteno (b)	No detectable	No detectable
Benzo fluoranteno (k)	No detectable	No detectable
Benzo (a) pireno	No detectable	No detectable
Indeno pireno (1,2,3,dc)	No detectable	No detectable
Dibenzo antraceno (a,h)	No detectable	No detectable
Arsénico	No detectable	No detectable
Bario	No detectable	No detectable
Cadmio	No detectable	No detectable
Cinc	12	38
Cobre	<10	1+
Cromo	<20	<20
Mercurio	No detectable	No detectable
Níquel	No detectable	No detectable
Plata	No detectable	No detectable
Plomo	No detectable	No detectable
Selenio	No detectable	No detectable

Fuente: Adaptado de SERGIO A. VARDARO; JOSÉ A. GÁLVEZ; JOSÉ A. CANTERO; A. CECILIA LÓPEZ; GUILLERMO TETTAMANTI; IVANNA PINEDA. Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento. Universidad Nacional de Cuyo; Facultad de Ingeniería; Bioprocesos, 2013. p. 4.

Con base en dicha fuente¹¹³, se puede notar que el contenido de material orgánico se encuentran en mayor medida en los cortes que fueron perforados con lodos base aceite, esto se debe principalmente a la naturaleza de los mismos; cabe resaltar que el tipo de hidrocarburos que representa una mayor proporción tanto los cortes base agua como los cortes base aceite, son aquellos con cadenas relativamente

¹¹³ SERGIO A. VARDARO; JOSÉ A. GÁLVEZ; JOSÉ A. CANTERO; A. CECILIA LÓPEZ; GUILLERMO TETTAMANTI; IVANNA PINEDA. Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento. Universidad Nacional de Cuyo; Facultad de Ingeniería; Bioprocesos, 2013. p. 1-6.

largas, teniendo de esta manera de “12 a 16 carbonos en su estructura química”¹¹⁴. Por otro lado, para ambas muestras se puede resaltar que su contenido de elementos no orgánicos varía, hecho que puede ser explicado debido a que al tratarse de tomas en diferentes localizaciones, las mismas variaran de la formación de la cual fueron extraídas. Por otro lado, cuando se generan cortes de perforación, además de la composición de los hidrocarburos que saturan el material, se ha de considerar el contenido de metales pesados que pueden contener, por lo cual una visión de esta composición se encuentra en el paper SPE-61249-MS de los autores R. Priatna, A. Sjahroezah & R. I. Bledoegl¹¹⁵; en el cual se plasman los resultados de la prueba de determinación de metales pesados haciendo uso de la técnica TCLP para los elementos: AS, Ba, Bo, Cd, Cr, Cu, Pb , Hg, Se, Ag y Zn (ver tabla 4).

Tabla 4. Caracterización de los metales pesados contenidos en los cortes de perforación.

No.	Elemento químico	Símbolo	Estándar, mg/L
1	Arsénico	As	5.0
2	Bario	Ba	100.0
3	Boro	Bo	500.0
4	Cadmio	Cd	1.0
5	Cromo	Cr	5.0
6	Cobre	Cu	10.0
7	Plomo	Pb	5.0
8	Mercurio	Hg	0.2
9	Selenio	Se	1.0
10	Plata	Ag	5.0
11	Cinc	Zn	50.0

Fuente: Adaptado de R. PRIATNA, A. SJAHROEZAH & R. I. BLEDOEGL. Waste Management: An Approach to the Management of Drilling Waste. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/61249-MS, 2000. p. 2.

La tabla 4 refiere la composición inorgánica típica de los cuttings en una operación de perforación, cabe aclarar que la misma hace referencia a una prueba en una formación específica, por lo cual estos valores pueden variar tanto en valor, así como en el tipo de elementos que se pueden encontrar en los mismos.

¹¹⁴ SERGIO A. VARDARO; JOSÉ A. GÁLVEZ; JOSÉ A. CANTERO; A. CECILIA LÓPEZ; GUILLERMO TETTAMANTI; IVANNA PINEDA. Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento. Universidad Nacional de Cuyo; Facultad de Ingeniería; Bioprocesos, 2013. p. 1-6.

¹¹⁵ R. PRIATNA, A. SJAHROEZAH & R. I. BLEDOEGL. Waste Management: An Approach to the Management of Drilling Waste. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/61249-MS, 2000. p. 1-2.

2.3 EFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

El efecto que causan los hidrocarburos ha sido discutido ampliamente entre los diferentes autores, por lo cual se puede considerar como un fenómeno altamente variable dependiendo de las condiciones en las que se dé, así como su escala. De esta manera, en la mayoría de los casos se hace necesario realizar una remediación o tratamiento para llegar a niveles aceptables, para lo cual se hace inherentemente necesario, tener en cuenta cada uno de los efectos que este tipo de sustancias pueden tener al interactuar con el suelo.

Teniendo en cuenta lo anterior, existen investigaciones encaminadas a evidenciar los posibles efectos que puede causar la presencia de hidrocarburos en el suelo, tal como es el trabajo de Victor E. Martinez M y Feipe Lopez S.¹¹⁶, quienes en su trabajo discuten las posibles afectaciones del suelo bajo la saturación de diferentes concentraciones de hidrocarburos. De esta manera se realizaron pruebas con un suelo arcilloso saturado con gasolina, diésel y combustóleo, teniendo como testigo a una porción de suelo arcilloso sin una concentración de este tipo de compuestos. A partir de estas muestras, se procedió a determinar los parámetros principales de las mismas, entre los cuales se encuentran: la textura, el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica, la densidad real y aparente, el intercambio catiónico y finalmente la porosidad.

Ahora bien, a partir de diferentes pruebas realizadas en este trabajo investigativo¹¹⁷, se encontraron una serie de efectos que causa la presencia de hidrocarburos en el suelo, entre los cuales se destacan los siguientes:

- El suelo saturado con gasolina y diésel presento un incremento en los valores de arenas y arcillas, disminuyendo además en contenido de limo.
- La muestra con contenido de combustóleo mostro un aumento importante en el contenido de arena, con una disminución marcada en el contenido de material arcilloso; lo que provoco además un cambio en la característica textural del suelo, siendo de tipo migajón-arcilloso.
- El contenido de materia orgánico aumentó de manera proporcional al incremento de saturación de hidrocarburos.

¹¹⁶ VICTOR E. MARTINEZ M Y FEIPE LOPEEZ S. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. Terra Volumen 19, Numero 1, 2001. p. 1.

¹¹⁷ Ibid. p. 1-2.

- Se produjo una disminución ligera en la capacidad de intercambio catiónica, con respecto al aumento en la saturación de gasolina o diésel en las muestras.
- La densidad real presento una ligera disminución en presencia de diésel o gasolina, mientras que para el combustóleo dicha disminución fue más marcada.
- La porosidad para las muestras saturadas, mostró una disminución considerable en presencia de una saturación de combustóleo a partir de los 30000 mg Kg⁻¹.

Por otro lado, han existido investigaciones encaminadas a determinar los efectos que genera la contaminación por hidrocarburos tanto en las propiedades químicas del suelo, así como en las comunidades microbiológicas del mismo, tal como se puede apreciar en el trabajo de Alejandra Zamora, Jesús Ramos y Marianela Arias¹¹⁸; quienes a partir de un análisis comparativo de una muestra testigo de suelo de sabana con respecto a otra saturada con hidrocarburos, presentan una serie de posibles efectos de estos compuestos en el suelo.

Teniendo en cuenta lo mencionado por estos autores¹¹⁹, se encontró que para las características químicas del suelo, se dio una disminución en el pH, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico. Por otra parte, para las muestras saturadas con hidrocarburos, se presentó una modificación de la comunidad microbiana, existiendo de esta manera una disminución de su diversidad por selectividad de grupos funcionales.

Tal como se puede apreciar, la presencia de hidrocarburos en el suelo genera una serie de afectaciones en las propiedades físicas y químicas del mismo, de tal manera que al realizar los procedimientos convencionales de disposición de cortes se generaría dichas afectaciones. Ahora bien, tal como fue tratado con anterioridad, dentro de los residuos tipo cutting existe la saturación de una variedad de hidrocarburos con diferentes composiciones, dependiendo las mismas naturalmente de los tipos de yacimientos perforados, así como el fluido de perforación aplicado.

En los siguientes apartados se pretende dar a conocer las características ambientales de dos de los compuestos más representativos que pueden saturar los cortes de perforación, de esta forma se desea presentar los principales sub efectos que pueden tener dichos compuestos en el aire, agua y suelo. Cabe aclarar, que se tomaron estos compuestos como muestras, ya que representan en gran medida las posibles afectaciones que generan la mayoría de compuestos de tipo hidrocarburo en el suelo.

¹¹⁸ ALEJANDRA ZAMORA, JESÚS RAMOS Y MARIANELA ARIAS. Efecto de la contaminación por hidrocarburos sobre algunas propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de la sabana. Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Gerencia de Ambiente e Higiene Ocupacional. Caracas, Venezuela, 2012. P. 1-5.

¹¹⁹ Ibid. p. 1-5.

Benceno

Según la Guía para Manejo seguro y Gestión Ambiental de 25 sustancias químicas del Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial¹²⁰ el benceno se encuentra naturalmente en el ambiente, a pesar de este hecho los principales aumentos en los niveles de esta sustancia se deben por las actividades de combustión de hidrocarburos y carbón, las operaciones de desecho y almacenamiento y finalmente por las emisiones de los vehículos motorizados. Cabe aclarar que las principales fuentes de benceno para el agua y el suelo están representadas por la disposición de productos que contienen dicha sustancia, así como posibles derrames durante actividades industriales. En este mismo documento¹²¹ se menciona que el benceno se libera a la atmosfera a partir de fuentes naturales, tales como las emanaciones de petróleo e incendios forestales; por otro lado el aumento en la concentración de esta sustancia se da principalmente por actividades industriales, como lo son el abastecimiento de combustibles para automotores, tubos de escape y principalmente emisiones provenientes de hornos operados con coque. Además se añade¹²² que el benceno al entrar en contacto con el aire reacciona con otras sustancias que saturan el mismo, siendo degradado dentro de pocos días relativamente; a través de estudios realizados por el Ministerio de Ambiente se determinó que esta sustancia no juega un papel importante en la formación fotoquímica de polución.

Con respecto al apartado de fuentes hídricas, se menciona¹²³ que el benceno es emitido a partir de aguas de desecho industrial, el lixiviado de rellenos de seguridad y otros suelos contaminados. Sin embargo, cabe resaltar que la mayoría de contenido de benceno sufre una biodegradación durante las actividades de tratamiento, mientras que otra porción es volatilizada. Además según esta misma fuente¹²⁴ se aclara que dicha sustancia posee una característica de biodegradabilidad en el agua ya sea superficial o subterránea, siendo este proceso influenciado por factores como la población microbiana, el oxígeno disuelto, los nutrientes disponibles, el pH y la temperatura.

¹²⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guías para Manejo seguro y Gestión Ambiental de 25 sustancias químicas, 2003. p. 138.

¹²¹ Ibid. p. 138.

¹²² Ibid. p. 139.

¹²³ Ibid. p. 138-140

¹²⁴ Ibid. p. 138-140.

El benceno según el Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial¹²⁵, al ser uno de los subproductos generados durante las actividades industriales más comunes, puede sufrir filtraciones a través de los suelos hasta las posibles fuentes de aguas subterráneas cuando es dispuesto en el suelo mediante rellenos de seguridad. Teniendo en cuenta lo anterior, para la disposición del material con contenido de esta sustancia se recomienda la eliminación mediante la incineración de mezclas de solventes, asegurando de esta manera una combustión completa (650-1600°C) con tiempos de residencia de 0.1-2 segundos.

Tolueno

Las fuentes más significativas de Tolueno emitido a la atmosfera según esta guía de manejo¹²⁶, son de tipo industrial, representadas de esta manera por perdidas en los procesos de producción (2%), uso de solventes en la fabricación de pinturas, lacas y pegantes (33%) y finalmente la evaporación de gasolina y otros combustibles mediante la emisión de combustiones incompletas (65%). Ahora bien tal como se menciona a lo largo de este documento¹²⁷, el tolueno en el aire se degrada por acción de radicales libres hidroxilo, llevándolo así hasta cresol y benzaldehído, sufriendo en el proceso el rompimiento del anillo aromático y generando además hidrocarburos simples; este proceso toma alrededor de 13 y 104 horas dependiendo de las condiciones atmosféricas.

Según la Guía para Manejo seguro y Gestión Ambiental de 25 sustancias químicas¹²⁸, el tolueno puede llegar a entrar en contacto con fuentes hídricas a través de descargas industriales, así como por derrames de mezclas de gasolinas u otros solventes, a pesar de esto dichas cantidades son relativamente bajas con respecto al contenido en el aire, oscilando de esta manera alrededor de 3 ppb. Los factores que afectan la concentración en las fuentes hídricas incluyen la solubilidad, la degradación, la absorción y la volatilización del tolueno. Teniendo en cuenta lo plasmado en este mismo documento¹²⁹, se considera al tolueno como una sustancia no persistente, por lo cual no hay una acumulación importante en los ecosistemas marinos, puesto que sufre una serie de procesos de volatilización y/o degradación a velocidades relativamente altas, teniendo de esta manera un tiempo de eliminación de entre 5 horas a 16 días, dependiendo de las características del entorno.

¹²⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guías para Manejo seguro y Gestión Ambiental de 25 sustancias químicas, 2003 .p. 138-140.

¹²⁶ Ibid. p. 384.

¹²⁷ Ibid. p. 384.

¹²⁸ Ibid. p. 384-385.

¹²⁹ Ibid. p. 384-385.

Por otro lado el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial¹³⁰ añade que la presencia de tolueno en el suelo se debe principalmente a procesos de disposición de materiales de la industria petrolera así como los lodos municipales; ahora bien, este compuesto al tener una alta volatilidad en este medio, hace que su permanencia en el mismo sea baja, este proceso además depende de condiciones como tipo de suelo, humedad y temperatura. De esta manera se considera que aproximadamente el 90% del tolueno dispuesto en el suelo sufre volatilización en alrededor de 24 horas, mientras el 10% restante es absorbido por acción de bacterias y químicos oxidantes. El proceso de degradación se da principalmente por dos bacterias conocidas como Pseudomonas y Acromobacterias, ocurriendo de esta manera en dos etapas: la generación de ácido benzoico y la siguiente consiste en el rompimiento del anillo bencénico, lo cual lo transforma en dióxido de carbono. Cabe añadir que la vida media del tolueno en el suelo, bajo condiciones de acción bacteriana se encuentra aproximadamente entre 4 y 22 días.

2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

Los residuos tipo corte de perforación son inherentemente variables, por lo cual la información relacionada a las características físicas de los cuttings se encuentra limitada; a pesar de esto existe información recolectada de muestras que han sido tomadas principalmente de pozos en costa afuera dentro del mar de Norte; tal como se aprecia en el paper SPE-80583-MS de los autores Paul W. Page, Chris Greaves, Rosey Lawson, Sean Hayes, Fergus Boyle, Mott Macdonald¹³¹. Dentro de las características de los cuttings de este estudio se encontraron las referidas a continuación.

¹³⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Guías para Manejo seguro y Gestión Ambiental de 25 sustancias químicas, 2003 p. 385.

¹³¹ PAUL W. PAGE, CHRIS GREAVES, ROSEY LAWSON, SEAN HAYES, FERGUS BOYLE, MOTT MACDONALD. Options for Recycling of Drill Cuttings. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/80583-MS, 2003. p. 1-4.

Tamaño de partícula

Los cortes de perforación provenientes de estas perforaciones comprenden usualmente Areniscas y Shale, con un tamaño de partícula dentro de “un rango de 10 – 20 mm”¹³².

Densidad

La densidad típica de los cortes de perforación sin tratar se encuentra alrededor de 1.65 t/m³, mientras que una vez se realiza los procesos de tratamiento, dicho rango se maximiza a “2.2 – 2.7 t/m³”¹³³ dependiendo de la cantidad de lodos que se encuentre saturando la roca.

Fuerza de cizallamiento

Usualmente este valor se encuentra entre un rango de “10kPa a 40kPa”¹³⁴, similar al valor para sedimento suave

Contenido de agua

Dentro de los lodos base aceite la fase orgánica se encuentra emulsionada en el agua, alcanzando valores de saturación superiores al 10% en volumen, mientras que en salmueras dicho valor se encuentra entre el 10 %- 50%; de esta manera los cuttings extraídos de una perforación con este tipo de fluidos pueden presentar un porcentaje de contenido de agua del “14% al 70%”, presentando la mayoría un valor que se encuentra entre el 14%-35%”¹³⁵

Características para su manejo

Los cuttings que no han sido tratados son tixotrópicos, teniendo a su vez propiedades abrasivas; de tal manera que durante su transporte tienden a asentarse; haciendo que este tipo de desechos sean difíciles de manejar. Usualmente son transportados por buques (durante las operaciones costa afuera), de cuatro toneladas aproximadamente. Por otra parte cabe mencionar que en

¹³² PAUL W. PAGE, CHRIS GREAVES, ROSEY LAWSON, SEAN HAYES, FERGUS BOYLE, MOTT MACDONALD. Options for Recycling of Drill Cuttings. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/80583-MS, 2003. p. 3.

¹³³ Ibid. p. 3.

¹³⁴ Ibid. p. 4.

¹³⁵ Ibid. p. 1-4.

algunos casos los cortes son mezclados con agua, “para mejorar de esta manera la eficiencia de bombeo de los mismos”¹³⁶.

Mineralogía

Los cortes al hacer parte de la formación que se está siendo perforada, se encuentran compuestos principalmente de limolita, arenisca, caliza, lodolitas y Shale, dependiendo naturalmente del tipo de litología perforada, siendo las “limolitas más comunes”¹³⁷.

¹³⁶ PAUL W. PAGE, CHRIS GREAVES, ROSEY LAWSON, SEAN HAYES, FERGUS BOYLE, MOTT MACDONALD. Options for Recycling of Drill Cuttings. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/80583-MS, 2003. p. 1-4.

¹³⁷ Ibid. p. 4.

3. CAPITULO II: MECANISMOS TÉCNICOS USADOS ACTUALMENTE EN LA INDUSTRIA PETROLERA INTERNACIONAL PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN

3.1 OPERACIONES COSTA ADENTRO (ON-SHORE)

3.1.1 Generalidades

Cuando se habla de manejo de sólidos de perforación se puede asegurar que comprenden el conjunto de todos los proyectos de tratamiento, los cuales se dan por terminados cuando los cortes se disponen totalmente limpios y se da la separación de los fluidos contenidos en ellos, de esta manera el proceso de tratamiento se puede considerar como un procedimiento de gran aplicabilidad alrededor del mundo.

Ahora bien, las técnicas más ampliamente aplicadas para el tratamiento y disposición de los sólidos provenientes de las operaciones de perforación han estado ampliamente marcadas por aquellas tecnologías desarrolladas en la década de los noventa, teniendo de esta manera un carácter disposicional, en el cual la mayoría de técnicas usadas estaban enfocadas en la descarga directa del material al ambiente; cabe aclarar que a pesar de que en la actualidad el uso de algunas de estas técnicas se mantienen vigentes, las mismas poseen un mayor control, así como la asignación de normas más rígidas durante su disposición; dentro de dichas técnicas “clásicas” se encuentran según Veil, J. A.¹³⁸ las siguientes para el uso en On-Shore.

- Landspreading: Consiste en la dispersión de los residuos en un área determinada, en la cual ocurre una degradación orgánica natural; en este método se debe asegurar el contenido de hidrocarburos a tratar, las tasas de aplicación y las características del material fertilizante a utilizar.
- Roadspreading: la aplicación y dispersamiento de cortes perforación aceitosos pueden mejorar la resistencia al clima de los caminos y vías, a pesar de esto, dichos contaminantes pueden penetrar el suelo causando una seria afectación al mismo.

¹³⁸ VEIL, J. A. Drilling waste management: Past, present, and future Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/77388-MS, 2002 p. 2.

3.1.2 Tratamientos biológicos

Tal como es referido por Mendez, R., Comez, P., Ledesma, J., Cenicerros, C.¹³⁹. se considera tratamiento biológico a cada uno de los procesos que hagan uso de la degradación natural de los hidrocarburos, esto se logra gracias a la degeneración lograda por los microorganismos existentes en el suelo En este tipo de mecanismos, se pueden encontrar una variedad de técnicas que se diferencian en función de su naturaleza técnica, entre estas se encuentran las siguientes:

3.1.2.1 Biorremediación

Según Calao, J.¹⁴⁰, la biorremediación es una de las técnicas convencionales usadas para el tratamiento de los cortes de perforación, que consiste en el uso de microorganismos como hongos o bacterias para degradar las cadenas de hidrocarburos complejas contenidas en los cortes de perforación, transformándolas de esta manera en unidades químicas más simples y por tanto menos contaminantes, tales como el agua, el gas carbónico y en general compuestos orgánicos más simples. Por otra parte Ladousse, A., Tallec, C., Chaineau, C., & Vidalie, J. F.¹⁴¹ mencionan que para que este tratamiento tenga una mayor eficiencia, se procede a la maximización de las condiciones necesarias, lo cual se hace posible sometiendo a las muestra a un proceso de esparcimiento en tierra.

Durante este proceso de degradación ocurren los fenómenos físicos como el intercambio catiónico y anionico del material, la descomposición y en general la degradación del material, cabe mencionar que dichos fenómenos ocurren tanto en la parte sólida, como líquida de los residuos, de tal manera que para esta última, una vez finalizado el proceso, se dispone en unos estanques, mientras que la fase sólida es dispuesta en sacos de arenas, que eventualmente se pueden dirigir a un foso o pueden ser usados en el “Landspreading”.

Cabe señalar que este método puede ser efectuado de una manera espontánea, dándose con el contacto natural de los residuos con el ambiente, o de una manera forzada mediante la aplicación de sistemas biológicos, con el fin de acelerar el proceso. Según lo planteado por Paton, W., & Fletcher, P.¹⁴², dentro de los beneficios del uso de la biorremediación se encuentra:

¹³⁹ MENDEZ, R., COMEZ, P., LEDESMA, J., CENICEROS, C. Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013 p. 14.

¹⁴⁰ CALAO, J. Caracterización Ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías Disponibles para la Prevención y Mitigación de Impactos Ambientales Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2007. p.5.

¹⁴¹ LADOUSSE, A., TALLEC, C., CHAINEAU, C., & VIDALIE, J. F. Landfarming of drill cuttings Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/35879-MS, 1996. p. 33.

¹⁴² PATON, W., & FLETCHER, P. Challenges of waste management in environmentally developing countries Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111679-MS, 2008. p. 3.

- Relación Costo-efectividad.
- Ambientalmente Benigno.
- Genera pocas emisiones.
- Requiere poco transporte de los residuos.
- Los residuos son convertidos en productos.

Existen diferentes métodos de aplicación de esta técnica, entre los cuales se encuentran los mostrados por Castebianco, I., Niño, J.¹⁴³:

- *Biorremediación in-situ*: según este autor¹⁴⁴ el objetivo de esta modalidad es la aceleración del proceso a escala ambiental, modificando de esta manera las condiciones a las cuales se somete el corte, tal como lo es el uso de la inoculación microbiana; este hace referencia pues al suministro de oxígeno y nutrientes extra durante cada cierto periodo.
- *Biorremediación ex-situ*: esta técnica consiste según Castebianco, I., Niño, J.¹⁴⁵ en extraer una porción de los cortes a tratar y realizar el procedimiento de degradación en otra locación, a condiciones estándar de laboratorio; teniendo evidentemente un mayor costo.
- *Biorremediación Mejorada*: El proceso es acelerado mediante la circulación de soluciones base agua, las cuales generan una mayor actividad de los microorganismos presentes, esto mejora a su vez la degradación biológica de los contaminantes orgánicos. En este mismo documento¹⁴⁶ se añade que dentro del proceso de circulación se puede hacer uso de nutrientes, oxígeno y otras modificaciones posibles. Este proceso puede realizarse tanto en un ambiente aerobio como anaerobio; en este ultimo los contaminantes orgánicos se metabolizan en metano, dióxido de carbono y algunas trazas de hidrogeno.

¹⁴³ CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 76.

¹⁴⁴ Ibid. p. 76.

¹⁴⁵ Ibid. p. 76.

¹⁴⁶ Ibid. 76-78.

Limitaciones de la biorremediación

Este proceso posee una serie de factores que limitan su aplicabilidad y eficacia, entre los cuales se encuentran los referidos por Casteblanco, I., Niño, J. en su trabajo¹⁴⁷:

- A bajas temperaturas la biorremediación es lenta.
- La limpieza en general no pueden ser lograda si la matriz de la roca limita el contacto microorganismo – corte de perforación.
- Altas concentraciones de peróxido de hidrogeno (>100 ppm) pueden inhibir la actividad microbiana.
- La circulación de los fluidos a través del medio puede generar la movilidad de los contaminantes presentes.
- El tiempo requerido para el tratamiento está entre 6 meses a 5 años.

3.1.2.2 Bioventeo

Esta técnica según Casteblanco, I., Niño, J.¹⁴⁸ consiste en la aceleración del proceso de biodegradación de los contaminantes de los cortes de perforación, mediante la inyección de oxígeno por medio del movimiento de aire, lo cual estimula dicha degradación, esto se da gracias a la existencia de microorganismos aerobios en los fragmentos de roca. El oxígeno es el elemento más ampliamente utilizado, pues es capaz de degradar los compuestos volátiles en forma de vapores, que se transportan lentamente a través del sistema rocoso.

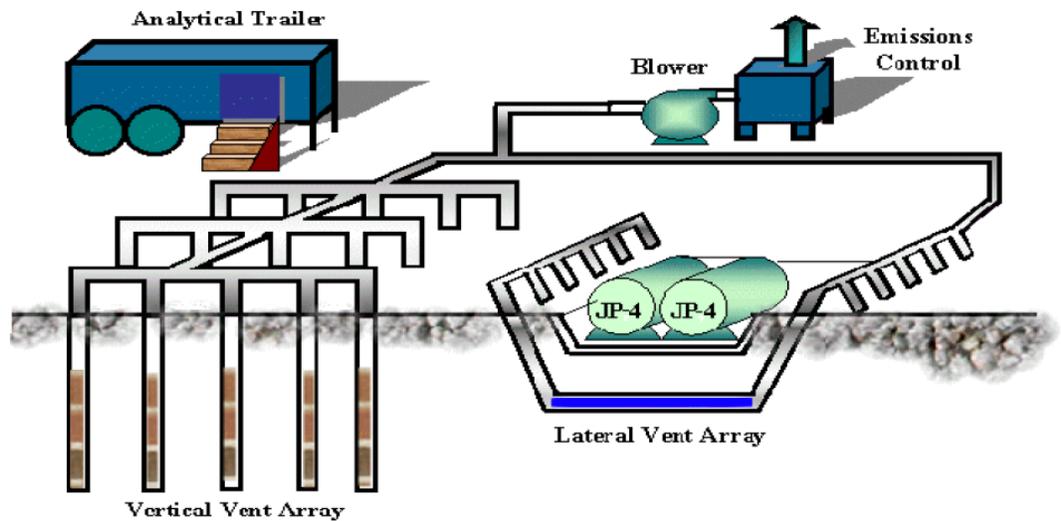
Esta técnica tal como refiere esta misma fuente¹⁴⁹ ha sido aplicada además para el tratamiento de suelos contaminados por petróleo, solventes no clorados, algunos pesticidas, conservantes de madera y en general productos químicos inorgánicos. Una de las grandes ventajas que se menciona en el documento referido es la capacidad de cambiar el estado de valencia de las sustancias inorgánicas y por tanto lograr la adsorción, captación y acumulación de dichos compuestos.

¹⁴⁷ CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 79.

¹⁴⁸ Ibid. p. 72.

¹⁴⁹ Ibid. p. 71 -72.

Figura 5. Aplicación de Bioventeo para la remediación de suelos.



Fuente: CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 72.

Limitaciones del bio venteo

Entre las limitantes de este procedimiento según Casteblanco, I., Niño, J.¹⁵⁰ se encuentran:

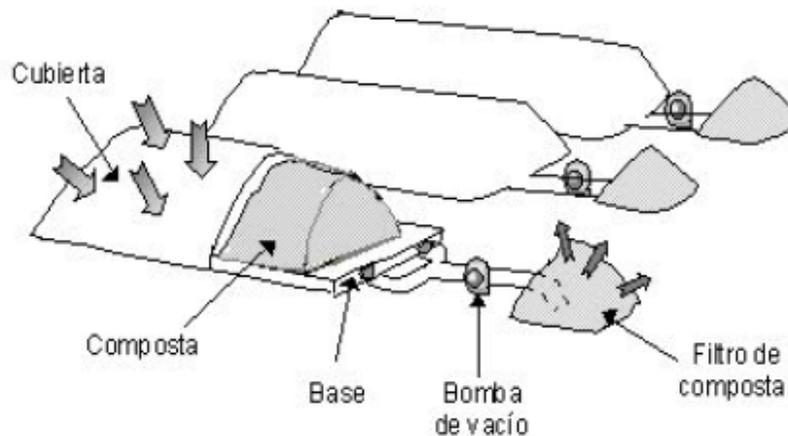
- Un bajo contenido de humedad de los cortes puede limitar el proceso de degradación, y por tanto su eficacia.
- Una baja temperatura puede retardar en general el proceso.
- El monitoreo de gases en facilidades de superficie añade cierta complejidad al procedimiento.

¹⁵⁰ CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 72-73.

3.1.2.3 Biopilas

Puede categorizarse como un método tanto de tratamiento como de disposición de residuos sólidos, pues consiste en la disposición de los cortes en un área determinada o piscina previamente excavada, para de esta manera lograr su biorremediación. Según Castebianco, I. & Niño, J¹⁵¹. este procedimiento es utilizado cuando el elemento de desecho está saturado con residuos aceitosos demasiado volátiles para ser tratados con “Landfarming”, ya que en esta situación las emisiones gaseosas, son de gran índole, limitando de esta manera el proceso.

Figura 6. Aplicación de la técnica “Biopilas”.



Fuente: CASTELBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 86.

Dichos autores¹⁵² señalan además que dentro de la zona de tratamiento se encuentra un sistema de recolección de lixiviados y un sistema de aireación que cuenta con un arreglo de tuberías que fuerzan al oxígeno presente en la atmósfera a pasar a través de la pila del suelo. En este proceso existen parámetros controlables tales como el pH, los nutrientes, la temperatura y evidentemente la humedad. El uso de este mecanismo de tratamiento según Castebianco, I. & Niño, J. puede considerarse una solución a corto plazo, y su disposición no debe superar los 3 metros de espesor, puesto que las pilas deben estar recubiertas por materiales impermeables, para controlar de esta manera la volatilización de los compuestos orgánicos.

Limitaciones del uso de biopilas

¹⁵¹ CASTELBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 86.

¹⁵² Ibid. p. 88-89.

Las limitaciones de este tratamiento según lo expuesto por Castebianco, I. & Niño, J. son¹⁵³:

- Se requiere la excavación de una porción de suelos considerable.
- Los procedimientos en general causan un desajuste estético en los terrenos en los cuales son practicados.
- Se deben realizar una serie de pruebas de trazabilidad, con el fin de determinar las tasas de degradación óptimas.

3.1.3 Tratamientos químicos

Dentro del grupo de los tratamientos químicos, se encuentran cada uno de los procedimientos para el manejo de cortes de perforación, en los cuales se involucra el uso de alguna sustancia química que permita la disminución del impacto ambiental producido; de esta manera en esta agrupación se encuentran una variedad de técnicas que se diferencian según la naturaleza técnica de su aplicación.

3.1.3.1 Estabilización de los cortes de perforación con el uso de cal viva

Esta técnica consiste según la Norma Técnica Colombiana NTC 4343¹⁵⁴, en la disminución de la movilidad del contenido contaminante de los cortes de perforación mediante la aplicación de cal viva, que químicamente se define como el Óxido de calcio (CaO) con una pureza mayor al 80%, esto generara pues una disminución del potencial contaminante del aceite. Ahora bien, tal como se encuentra mencionado en el trabajo de Munevar, L., Rubio, M. & Toro, M.¹⁵⁵, el uso de la cal viva permite además de estabilizar los contaminantes de los fragmentos rocosos, retirar la humedad y que el material estabilizado quede encapsulado en carbonato de calcio; cabe aclarar que este proceso es especialmente útil en cortes base agua con contenidos bajos de hidrocarburos.

¹⁵³ CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 88-89.

¹⁵⁴ COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 4343: Gestión Ambiental. Tratamiento de los Cortes producidos durante la perforación de pozos de petróleo con lodo base aceite. Fijación con Cal Viva. p. 1.

¹⁵⁵ MUNEVAR, L., RUBIO, M., TORO, M. Manual de procedimientos para el Manejo de Cortes y Fluidos de Perforación Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, 2006. p. 43.

Para efectuar este tratamiento tal como se encuentra estipulado en la norma técnica colombiana NTC 4343¹⁵⁶ se deben seguir una serie de pasos, siendo el primero la mezcla continua de los cortes de perforación con la cal (1 ton/100 bls aprox) hasta que el CaO reaccione hasta llegar a carbonato de calcio en presencia de CO₂ atmosférico; cabe mencionar que durante el proceso se debe asegurar la continuidad de la operación mediante el uso de sistemas de mezclado continuo, como lo son el tanque de doble tornillo sin fin o el carro mezclador. A partir de esta mezcla tal como es referido por Munevar, L., Rubio, M. & Toro, M¹⁵⁷ se obtiene el carbonato de calcio que permitirá el encapsulamiento del material contaminante. Finalmente se debe aclarar que en el proceso de fijación de los cortes base aceite con cal viva, los hidrocarburos no son retirados del contenido de este residuo sólido, pues el objetivo de este procedimiento es la estabilización de dichos compuestos, de esta manera los cortes deben estar fijados hasta el punto en que se encuentren estabilizados por la reacción de la cal viva y del agua para formar cal hidratada:



3.1.3.2 Oxidación química

Tal como mencionan Castebianco, I. & Niño, J.¹⁵⁸ esta técnica consiste en la reducción química de los contaminantes contenidos en los cortes, lo que permite convertirlos en compuestos estables con una menor toxicidad, además de una menor movilidad; y en algunos casos inertes, cabe mencionar que este procedimiento es aplicado usualmente como mecanismo de tratamiento de los suelos contaminados, a pesar de este hecho, existe la posibilidad de ser usado como un medio indirecto para el tratamiento de los terrenos en los cuales fueron esparcidos o dispuestos previamente los cortes de perforación. Según este autor entre los agentes oxidantes más utilizados se encuentran:

- El ozono.
- El peróxido de hidrogeno.
- El cloro.
- El hipoclorito.
- Dióxido de cloro.

¹⁵⁶ COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 4343: Gestión Ambiental. Tratamiento de los Cortes producidos durante la perforación de pozos de petróleo con lodo base aceite. Fijación con Cal Viva. p. 1-5.

¹⁵⁷ MUNEVAR, L., RUBIO, M., TORO, M. Manual de procedimientos para el Manejo de Cortes y Fluidos de Perforación Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, 2006. p. 43.

¹⁵⁸ CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2011. p. 94-95.

Según Castebianco, I. & Niño, J.¹⁵⁹ en la actualidad los oxidantes químicos más utilizados son el ozono, el peróxido de hidrogeno y el permanganato, pues estas sustancias son capaces de realizar la reacción necesaria de una manera rápida y eficaz en los compuestos inorgánicos tóxicos. Las eficiencias de este proceso han logrado alcanzar valores considerables, tal como el 90% para alifáticos insaturados y compuestos aromáticos (Benceno), con velocidades de reacción muy altas, del orden del 90% en unos cuantos minutos.

Limitaciones del uso de la oxidación química

Dentro de las limitantes del tratamiento con el uso de un sistema de oxidación, según Castebianco, I. & Niño, J.¹⁶⁰ se encuentran:

- Condiciones del suelo a tratar: Temperatura, pH y grado de penetración del contaminante.
- La cantidad de contaminante saturando los cortes de perforación.
- El alto riesgo asociado a la manipulación de grandes cantidades de agentes implementados en el tratamiento.
- Alto factor económicos, procedente de la naturaleza de los agentes químicos utilizados.

3.1.3.3 Solidificación/Estabilización (Vitrificación)

Estos procedimientos comprenden los procesos físicos y químicos que tiene como objetivo la reducción de la movilidad de los contaminantes contenidos en los cortes de perforación tal como lo son la encapsulación y la vitrificación; pueden considerarse de bajo costo y por lo tanto de alto uso en países en vía de desarrollo, tal como lo es Colombia, pues representan una solución inmediata y eficaz para cumplir con los criterios ambientales requeridos para la disposición de los residuos.

Tal como menciona Paton, W., & Fletcher, P.¹⁶¹ una de las aplicaciones más útiles de este mecanismo de tratamiento, es la estabilización eficiente de los metales pesados presentes en los fragmentos de roca, los cuales representan un riesgo

¹⁵⁹ CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 95-96.

¹⁶⁰ Ibid. p. 95-96.

¹⁶¹ PATON, W., & FLETCHER, P. Challenges of waste management in environmentally developing countries Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111679-MS, 2008. p.3.

ambiental considerable, aun así esta tecnología no es eficiente para la inmovilización del cloruro o las fracciones de petróleos más livianas.

El objetivo de esta técnica según Casteblanco, I. & Niño, J¹⁶² es lograr la reducción de la reactividad, solubilidad o movilidad de los compuestos contaminantes de los cortes de perforación, esto se logra ya sea gracias a la modificación de su estructura química o la modificación de sus propiedades físicas, como su movilización; de esta manera se logra convertir un contaminante peligroso, en un producto de más fácil manejo, evitando así riesgos de volatilización, lixiviación o fugas. Cabe aclarar que este método, no generará la destrucción del elemento contaminante, pues está enfocada a impedir o mitigar su desprendimiento o movilidad hacia el medio ambiente, por procesos de lixiviación, reacciones químicas o en general por el contacto con suelos, durante la disposición de los cortes de perforación.

La vitrificación según Casteblanco, I. & Niño, J¹⁶³ es el proceso de estabilización/solidificación, que consiste en el uso de una corriente eléctrica, para la aplicación de calor a los elementos contaminados (Cortes de perforación), llegando de esta manera a temperaturas considerablemente altas (1600 a 2000 °C), esto genera en una primera instancia la inmovilización de la mayoría de los compuestos inorgánicos, así como la desintegración de los componentes orgánicos (hidrocarburos) mediante la pirolisis. Durante el proceso, los componentes inorgánicos son incorporados a la masa cristalina (Vítrea), el vapor de agua y compuestos orgánicos procedentes de la pirolisis, son conducidos a un sistema de tratamiento de gases, en el cual se les es extraído los componentes contaminantes.

Para Casteblanco, I. & Niño, J¹⁶⁴ los factores que afectan la aplicabilidad de este procedimiento son:

- La solidificación de los cortes disminuir el potencial del uso del área.
- La profundidad y penetración de los contaminantes.
- Algunos residuos no pueden ser tratados por esta técnica.
- El muestreo puede volverse más complejo que el proceso en sí.

¹⁶² CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011. p. 105.

¹⁶³ Ibid. p. 106.

¹⁶⁴ Ibid. p. 106.

3.1.4 Tratamientos térmicos

Los métodos térmicos consisten en la aplicación de altas temperaturas, con el fin principal de lograr la degradación y/o desintegración de los materiales contaminantes existentes en los cortes de perforación, esto permite la separación de dichos elementos, logrando de esta manera la descontaminación y posterior disposición de este material de desecho.

3.1.4.1 Incineración

La incineración de residuos de perforación, puede ser catalogada como una combustión controlada, de tal manera que se basa en la reacción entre el oxígeno y los componentes volátiles existentes en los cortes de perforación, tales como el carbono, hidrógeno y el sulfuro. Tal como es referido por Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R.¹⁶⁵, esta técnica se da a temperaturas cercanas a los 800 °C; al tratarse de una combustión, se hace resaltable la generación de subproductos, entre los cuales se encuentran naturalmente el CO₂ y el vapor de agua, además de HCl, HF y NO₂. Por otra parte se pueden generar otros subproductos provenientes de aquellos elementos inorgánicos que no reaccionan durante el proceso.

Para la ejecución de este tratamiento, se requiere el uso de facilidades capaces de soportar altas temperaturas, y con la posibilidad de monitorear tanto el avance de la reacción, como las emisiones de gases existentes. Finalmente, según Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R.¹⁶⁶, esta técnica es considerada como uno de los procedimientos térmicos más contaminantes, debido a los subproductos generados, de tal manera que su aplicación se ve limitada a circunstancias bastante específicas.

3.1.4.2 Co – procesamiento

El objetivo principal de esta técnica es recuperar la energía contenida en los residuos con contenidos volátiles, con el fin de usar dicha energía de combustión para generar un producto nuevo, el co-procesamiento puede ser visto como la integración de dos procesos: la producción de Klinker y la disposición de los desechos en hornos, para su posterior aprovechamiento energético. Basado en lo postulado por Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R.¹⁶⁷, se puede afirmar que esta técnica no solo es usada para el tratamiento de los cortes de perforación, pues

¹⁶⁵ SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015. p. 6-7.

¹⁶⁶ Ibid. p 6-7.

¹⁶⁷ SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015. p. 6.

posee un alto rango de aplicabilidad en la industria de plásticos, solventes, papel, tinta, madera y grasa.

El co-procesamiento como método de manejo de residuos de perforación, para Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R.¹⁶⁸ posee una serie de ventajas, entre las cuales se encuentran:

- La existencia de altas temperaturas y altos periodos de exposición, garantizan la desintegración de las partículas orgánicas existentes en los cortes.
- Alta eficiencia para el control de contaminación.
- El ambiente alcalino generado de la combustión de los materiales en bruto, puede neutralizar los gases ácidos producidos.

3.2 OPERACIONES COSTA AFUERA (OFF-SHORE)

3.2.1 Generalidades

Los métodos usados en la actualidad para la disposición de cortes en Off-Shore son muy estrictos, de tal manera que en la mayoría de operaciones de descarga al océano tal como es mencionado por I. Petri Júnior¹⁶⁹ se debe garantizar un contenido menor a 1% de contaminantes en los cortes de perforación; esto se logra con la aplicación de técnicas de tratamiento en plataforma.

Cabe añadir que en aquellas circunstancias en las cuales no se facilite alguno de los métodos tratados con anterioridad, la disposición de cortes se ha de realizar mediante la técnica conocida como “Skip and Ship”, la cual según Svensen, T., & Taugbol, K.¹⁷⁰ consiste en transportar los residuos desde plataforma hasta tierra firme, con el fin de ejecutar su debido tratamiento y disposición. A partir de lo anterior y teniendo en cuenta la gran variedad de procedimientos existentes para realizar la disposición de los cortes de perforación. Teniendo en cuenta lo anterior durante la fase de manejo de residuos, sin importar el tratamiento a usar, se siguen una serie de metodologías, con el fin de lograr una gestión óptima de los residuos; de esta

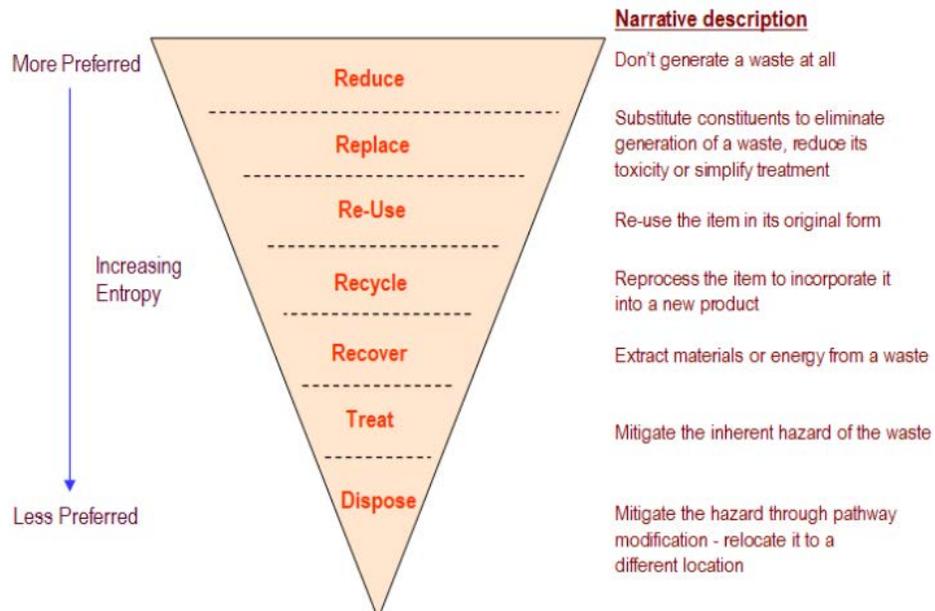
¹⁶⁸ SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015.. p. 6.

¹⁶⁹ I. PETRI Júnior, CH Ataíde, and CR DUARTE, Federal University of Uberlândia; RN de Toledo and AS Morais, INNOVARE; CM de A. Panisset, CHM de Sá, and AL Martins, Petrobras. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. doi: 10.4043/26335-MS, 2015, p. 1-2.

¹⁷⁰ SVENSEN, T., & TAUGBOL, K.. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011. p. 4.

manera McHugh, S., Hoffmann, R. E., & Conrad, D. L plasman y sintetizan las etapas comprendidas para lograr este fin (Ver figura 7).

Figura 7. Etapas del manejo de residuos de perforación.



Fuente: MCHUGH, S., HOFFMANN, R. E., & CONRAD, D. L. Waste management standards enhance environmental performance Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111750-MS, 2008. p. 5

3.2.2 Influencia del fluido base usado durante la perforación para la disposición de cortes

Tal como mencionan Walker, J., Miller, J. J., Burrows, K., Mander, T., & Hovan, J.¹⁷¹ el manejo realizado a los cortes de perforación puede variar dependiendo de la naturaleza de generación del residuo, es decir el origen que posee según el fluido de perforación utilizado en la operación. Teniendo en cuenta lo tratado por H. C. H. Darley, George R. Gray¹⁷², durante el diseño de un lodo de perforación, existe la posibilidad del uso de fluidos acuosos o no acuosos como sustancias básicas del sistema, de tal manera que se hace evidente que aquellos fluidos base agua, generaran un impacto ambiental mucho menor a aquellos con una composición no acuosa; este hecho se extrapola pues a la disposición de los cortes generados para cada una de estas posibilidades.

¹⁷¹ WALKER, J., MILLER, J. J., BURROWS, K., MANDER, T., & HOVAN, J. Nonaqueous, salt-free drilling fluid delivers excellent drilling performance with a smaller environmental footprint Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/178804-MS, 2016. p. 1.

¹⁷² H. C. H. DARLEY, GEORGE R. GRAY. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Quinta Edición. Gulf Professional Publishing, 1988. p. 2.

Según H. C. H. Darley, George R. Gray¹⁷³ la disposición de cortes provenientes de los fluidos de perforación no acuosos (NAF por sus siglas en ingles), pueden ser considerada costosa y logísticamente compleja, pues los mismos usualmente contienen una alta concentración de sales, tales como cloruro de calcio y cloruro de sodio; lo cual representa uno de los factores que afectan en mayor medida la disposición de los cortes, pues dichas sales no se degradan, llegando a acumularse en grandes cantidades en el suelo.

A partir de lo anterior una de las líneas de investigación más recientes está enfocada al desarrollo de fluidos de perforación que permitan la generación de cortes con una menor huella ambiental, abordando pues la problemática del contenido salino existente en los cortes de perforación no acuosos, con el fin de conservar sus propiedades y mitigar sus impactos ambientales.

3.2.3 Métodos usados para la disposición de cortes de perforación

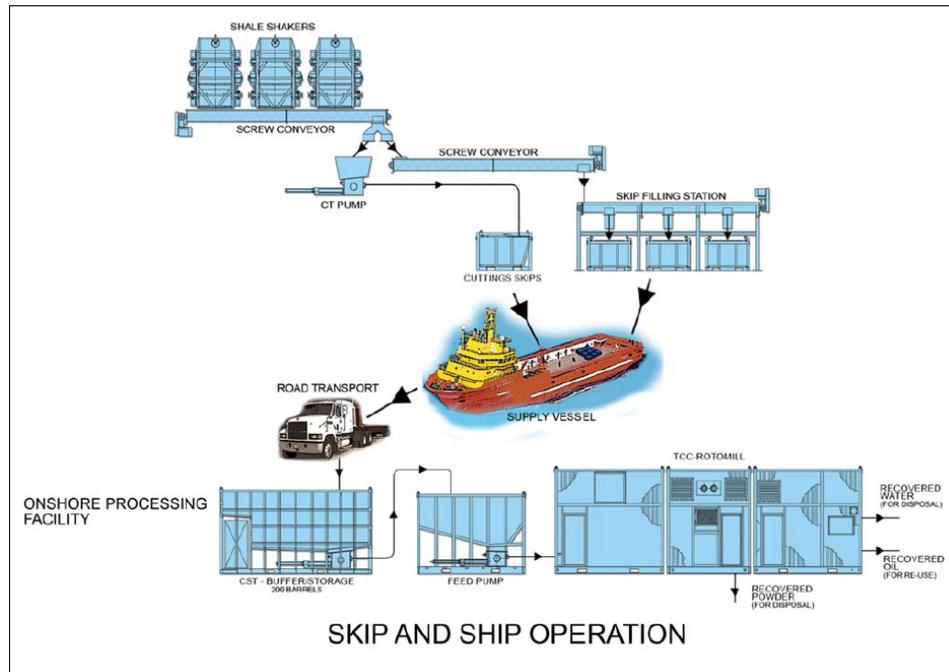
3.2.3.1 Skip and ship

Esta técnica según lo referido por Svensen, T., & Taugbol, K.¹⁷⁴ consiste básicamente en el transporte de los residuos de perforación o “cuttings” desde plataforma, para eventualmente hacer su disposición en tierra firme, para esto dichos desechos son evacuados desde las tolvas hacia los contenedores, que finalmente son transportados en los buques de carga. Cada uno de estos “Skips” posee una capacidad que varía entre 3.6 m³ a 4 m³, de tal manera que se deben realizar una serie de repeticiones de la operación en general, dependiendo pues de la cantidad de cortes generados (ver figura 8).

¹⁷³ H. C. H. DARLEY, GEORGE R. GRAY. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Quinta Edición. Gulf Professional Publishing, 1988. p. 2. p. 3-6.

¹⁷⁴ SVENSEN, T., & TAUGBOL, K.. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011. p. 4.

Figura 8. Proceso de disposición mediante la técnica “Skip and Ship”.



Fuente: KIRKNESS, A. J. Treatment of nonaqueous-fluid-contaminated drill Cuttings—Raising environmental and safety standards Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/112727-MS, 2008. p. 6.

Limitaciones del uso de la técnica Skip and Ship

Este tipo de metodología posee un riesgo considerable, pues requiere el transporte de varias toneladas de cortes por grandes distancias, en un proceso que puede ser repetido un gran número de veces; además según el autor Kirkness, A. J.¹⁷⁵ dicha tecnología posee una serie de condiciones que limitan su aplicación, entre las cuales las más importantes son:

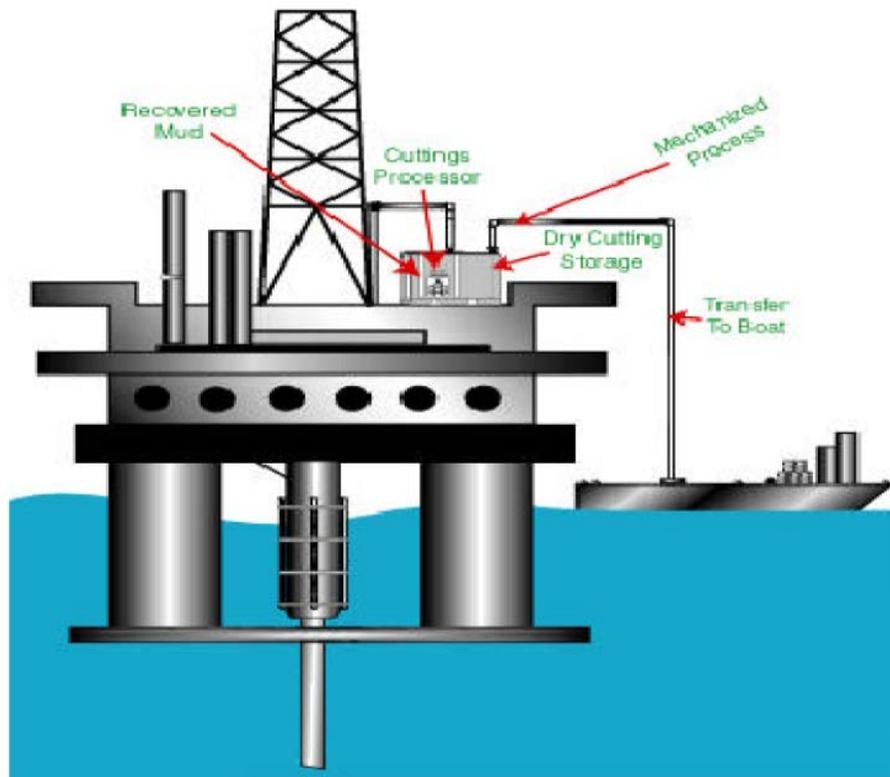
- Conlleva un costo económico y logístico considerable, en función del número de viajes a realizar.
- El transporte de grandes cantidades de residuos contaminantes por medio de buques, puede conllevar a la generación de impactos serios en el ambiente si no es realizado cuidadosamente.
- El tiempo de transporte de los cortes puede llegar a ser substancial, retardando de esta manera el proceso en general.
- Requiere en gran medida el uso de grúas de levantamiento de alta potencia

¹⁷⁵ KIRKNESS, A. J. Treatment of nonaqueous-fluid-contaminated drill Cuttings—Raising environmental and safety standards Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/112727-MS, 2008. p. 1-3.

3.2.3.2 Bulk transfer

Según Torgrim Svensen & Knut Taugbol¹⁷⁶ este método consiste en la instalación de un sistema de circuito cerrado para el tratamiento de cortes, mediante el uso de tanques de retención y un sistema neumático que permita el flujo de los residuos. Los tanques de retención son utilizados como un medio intermedio entre el taladro y el sistema de transporte marítimo, y suelen tener capacidades aproximadas de 23 toneladas. Uno de los puntos clave del uso de este procedimiento es el aseguramiento de la integridad de la manguera o línea de transporte, pues para la misma se debe garantizar su lubricidad y resistencia, de tal manera que se eviten posibles derrames de material. Un sistema de operación de esta índole requiere normalmente de dos a tres operarios por turno.

Figura 9. Proceso de disposición mediante la técnica "Bulk Transfer".



Fuente: AGWA, A., SADIQ, R., & LEHETA, H. Offshore drilling waste discharge: Egyptian environmental regulations Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/161446-MS, 2012. p.13.

¹⁷⁶ TORGRIM SVENSEN; KNUT TAUGBOL. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011. p. 5.

Ventajas de la técnica Bulk Transfer

Según Torgrim Svensen & Knut Taugbol¹⁷⁷ la naturaleza de circuito cerrado utilizada en esta técnica, trae consigo una serie de ventajas que contrastan con la aplicación de la técnica “Skip and Ship”, entre las cuales las más resaltables son:

- Este método no genera volúmenes extra de residuos.
- No requiere el uso de grúas de levantamiento para el manejo de cortes desde el taladro hasta el buque de transporte.
- El sistema de circuito cerrado disminuye el riesgo de derrames y filtraciones.
- El tiempo de operación se encuentra optimizado, pues los tanques de retención poseen grandes volúmenes.
- El proceso se realiza en conjunto y simultáneamente con la perforación, lo cual disminuye los costos generales.

¹⁷⁷ TORGRIM SVENSEN; KNUT TAUGBOL. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011. p. 5

4. CAPITULO III: NUEVAS TECNOLOGÍAS INVESTIGADAS INTERNACIONALMENTE PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

Tal como se puede apreciar, el manejo de los residuos generados durante las operaciones petroleras ha tomado una gran relevancia a nivel internacional, por lo cual existen en la actualidad una serie de líneas de investigación enfocadas en la determinación y aplicación de nuevas tecnologías que permitan tratar más adecuadamente este tipo de desechos; entre estas investigaciones se encuentran tanto mejoras importantes de los métodos aplicados hoy en día, como mecanismos revolucionarios para el tratamiento y disposición de cortes; con el fin último de realizar una mitigación de los impactos generados.

4.1 TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LOS ESTADOS UNIDOS PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS TIPO CORTE DE PERFORACIÓN.

El manejo de los residuos de perforación en el territorio Norte Americano está sujeto al cumplimiento de una serie de requerimientos regulatorios estatales, variando de esta manera en cada uno de los estados donde se adelantan actividades de explotación petrolera, de esta manera y en función de esta necesidad se implementó el módulo de regulación de residuos de perforación DWMIS (Drilling Waste Management Information System)¹⁷⁸, diseñado para proporcionar un acceso fácil a las principales técnicas reglamentarias aplicadas para la gestión de estos residuos, cumpliendo las siguientes funciones:

- ✓ Proveer la información de contacto de las agencias federales de regulación para cada uno de los estados, incluyendo nombres, direcciones y números telefónicos.
- ✓ Ofrecer resúmenes de las principales regulaciones estatales aplicables.
- ✓ Dirigir al lector a las páginas web de cada uno de los estados mediante hyperlinks.
- ✓ Sintetizar los mecanismos técnicos usados para el tratamiento y disposición de los residuos generados (sólidos y líquidos) durante la perforación.

La gestión de los residuos provenientes de la perforación en Norteamérica así como el módulo DWMIS, están regulados por las principales agencias de protección medioambiental de Estados unidos siendo estas:

¹⁷⁸ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Inicio. [citado abril 26, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/index.cfm> >.

➤ *Environmental Protection Agency (EPA)*: según se describe en su página web¹⁷⁹ es la agencia encargada de proteger la salud humana y del medio ambiente; posee 10 oficinas regionales y 17 laboratorios repartidos por todo el territorio Norte Americano; sus inicios datan al 2 diciembre de 1970, cuando fue establecida en el gobierno de Richard Nixon y su actual administrador es Scott Pruitt.

➤ *The Department of the Interior's Bureau of Land Management (BLM)*: tal como se encuentra en su página web, es la oficina encargada de la administración de las tierras Norteamericanas, hace parte del departamento del interior, y administra alrededor de 247,3 millones de acres de tierras públicas. La BLM fue creada por el presidente Harry S. Truman en 1946 a partir de la fusión de la oficina general de tierras y el servicio de pastoreo, su misión es el "*mantenimiento de la salud, la diversidad y la productividad de las tierras públicas para el uso y disfrute de las generaciones presentes y futuras*"¹⁸⁰.

➤ *The Bureau of Ocean Energy Management (BOEM)*: tal como lo dice su página web¹⁸¹ es una agencia perteneciente al departamento del interior de los Estados Unidos establecida en el 2010; encargada junto a la BSEE de ejercer la regulación en temas energéticos, tales como la administración de actividades de producción de petróleo y gas, así como las funciones de gestión relacionadas con las energías renovables; incluyendo de esta manera la administración de las actividades energéticas desarrolladas en Off-Shore, tanto convencionales como renovables. Su actual director es el Dr Walter Cruickshank, nombrado por el secretario del interior.

➤ *The Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE)*: al igual que la BOEM, es una agencia bajo la supervisión del departamento del interior de los Estados Unidos, cuya principal responsabilidad es el mejoramiento y protección del medio ambiente involucrado con la explotación de hidrocarburos en Off-Shore. Posee la autoridad de vigilar, investigar, imponer sanciones, suspender o cancelar actividades y en general hacer cumplir el apartado reglamentario en altamar. Esta agencia fue fundada en el 2011, y su actual director es Scott Mabry; ejerciendo las principales responsabilidades administrativas, entre las cuales se encuentran la adquisición y gestión de la tecnología de la información, capital humano, finanzas, seguridad y gestión de emergencias.

Tal como se mencionó con anterioridad, el manejo regulatorio de cuestiones ambientales en el territorio estadounidense varía para cada estado, de tal manera que para la reglamentación de la gestión de los residuos de perforación, el DWMIS

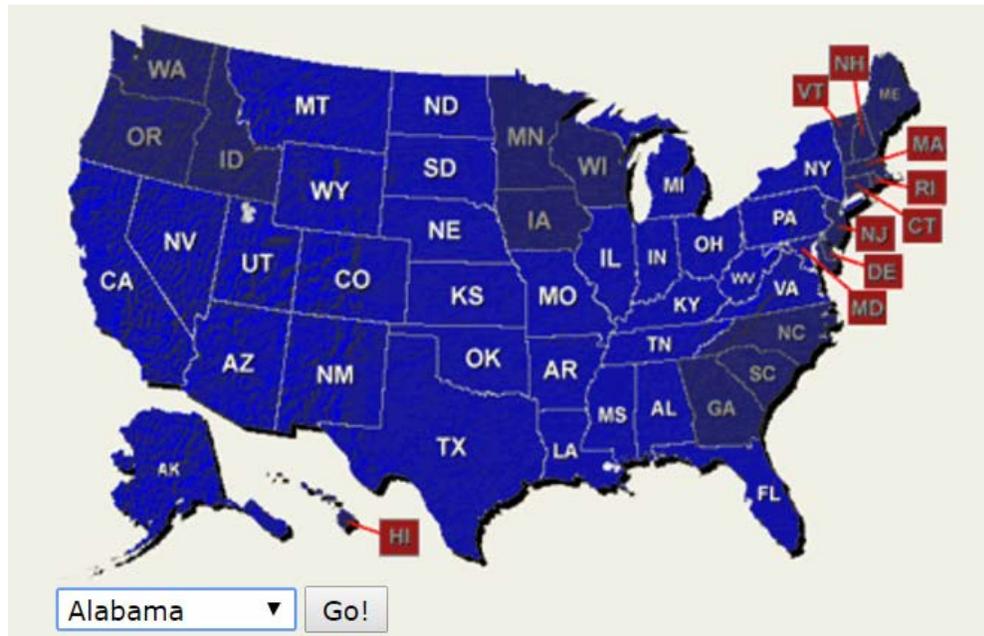
¹⁷⁹ UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *EPA* [en línea], sec. Inicio [citado abril 26, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://www.epa.gov/aboutepa/our-mission-and-what-we-do>>.

¹⁸⁰ U. S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. *Bureau of Land Management* [en línea], sec. About Us. [citado abril 26, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://www.blm.gov/about/our-mission> >.

¹⁸¹ BUREAU OF OCEAN ENERGY MANAGEMENT. *BOEM* [en línea], sec. About Us. [citado abril 27, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://www.boem.gov/Leadership/>>.

plantea un módulo donde compila las principales regulaciones federales para cada uno de los 31 estados donde se adelantan actividades petroleras, de esta manera existe un mapa interactivo para acceder a esta información individual (Figura 10).

Figura 10. Mapa del DWMIS de los estados donde se adelantan actividades petroleras.



Fuente: ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado mayo 01, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/regs/index.cfm> >.

En la página web del DWMIS¹⁸² al acceder a uno de los estados se da la siguiente información para cada uno de los mismos:

- El ente regulatorio estatal encargado de las labores de regulación ambiental.
- Datos de contacto de las oficinas estatales.
- Prácticas en general para la disposición de residuos.
- Generalidades regulatorias aplicables.

¹⁸² ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Federal & State Regulations. [citado mayo 01, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/regs/index.cfm> >.

4.1.1 Entes regulatorios ambientales

Basado en la información encontrada en la página web del DWMIS¹⁸³, se pueden encontrar los entes regulatorios para cada uno de los estados en los cuales se adelantan operaciones petroleras, tal como se refiere a continuación:

Alabama: La Junta Estatal de Petróleo y Gas de Alabama (The State Oil and Gas Board of Alabama), bajo la dirección del Geólogo Estatal y Supervisora de Petróleo y Gas.

Alaska: La Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Alaska (Alaska Oil and Gas Conservation Commission(AOGCC)) junto al Departamento de Recursos Naturales de Alaska (ADNR), División de Petróleo y Gas (The Alaska Department of Natural Resources (ADNR), Oil and Gas Division).

Arizona: La Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Arizona (The Arizona Geological Survey (AZGS) Oil and Gas Conservation Commission (OGCC)) en conjunto con el Departamento de Calidad Ambiental de Arizona (The Arizona Department of Environmental Quality (ADEQ)).

Arkansas: La Comisión de Control de la Contaminación y Ecología de Arkansas (The Arkansas Pollution Control and Ecology Commission (APC&E Commission) bajo la regulación de la Comisión de Petróleo y Gas de Arkansas (The Arkansas Oil and Gas Commission (AOGC)).

California: La División de Petróleo, Gas y Recursos Geotérmicos del Departamento de Conservación de California (The California Department of Conservation's Division of Oil, Gas, and Geothermal Resources).

Colorado: La Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Colorado (The Colorado Oil and Gas Conservation Commission (COGCC)).

Florida: La oficina de inspección geológica de Florida (The Florida Geological Survey (FGS)), dentro del Departamento de Protección Ambiental de Florida (Department of Environmental Protection (FDEP)).

Illinois: La División de Petróleo y Gas de la Oficina de Minas y Metales del Departamento de Recursos Naturales de Illinois (The Division of Oil and Gas (DOG)). junto al Agencia de Protección Ambiental de Illinois (Illinois Environmental Protection Agency).

¹⁸³ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Federal & State Regulations. [citado mayo 01, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/regs/index.cfm> >.

Indiana: La División de Petróleo y Gas del Departamento de Recursos Naturales bajo la supervisión del Departamento de Administración Ambiental de Indiana (IDEM).

Kansas: La División de Conservación de la Comisión de Corporaciones de Kansas (The Kansas Corporation Commission (KCC) Conservation Division) bajo la supervisión del Departamento de Salud y Medio Ambiente de Kansas (KDHE).

Kentucky: La División de Petróleo y Gas del Departamento de Recursos Naturales (The Division of Oil and Gas (DOG) in the Department of Natural Resources (DNR)).

Louisiana: El Departamento de Recursos Naturales (DNR) de Louisiana, la Oficina de Conservación (OC) (The Louisiana Department of Natural Resources (DNR)), bajo la supervisión del Departamento de Calidad Ambiental de Louisiana (DEQ).

Michigan: El Departamento de Calidad Ambiental de Michigan (The Michigan Department of Environmental Quality (DEQ)).

Mississippi: La Junta de Petróleo y Gas del Estado de Mississippi (The Mississippi State Oil and Gas Board (MSOGB)) junto al Departamento de Calidad Ambiental de Mississippi (The Mississippi Department of Environmental Quality (MDEQ)).

Missouri: El departamento de Missouri de los recursos naturales (DNR) División de geología y reconocimiento de tierras (The Missouri Department of Natural Resources (DNR) Division of Geology and Land Survey).

Montana: La junta de conservación de petróleo y gas de Montana (The Montana Board of Oil and Gas Conservation (MBOGC)) unido al departamento de recursos naturales y conservación.

North Dakota: La Comisión Industrial de Dakota del Norte (The North Dakota Industrial Commission (NDIC)).

Nebraska: La Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Nebraska (NOGCC) (The Nebraska Oil and Gas Conservation Commission (NOGCC)), bajo la supervisión del Departamento de Calidad Ambiental de Nebraska (The Nebraska Department of Environmental Quality (NDEQ)).

Nevada: La División de Minerales de Nevada (Comisión de Recursos Minerales de Nevada) (The Nevada Division of Minerals (Nevada Commission of Mineral Resources)), junto a la División de Protección Ambiental de Nevada (Departamento de Conservación y Recursos Minerales de Nevada).

New Mexico: La División de Conservación de Petróleo (OCD) en el Departamento de Energía, Minerales y Recursos Naturales de Nuevo México (The Oil

Conservation Division (OCD) in the New Mexico Energy, Minerals and Natural Resources Department), bajo la supervisión del Departamento de Medio Ambiente de Nuevo México (The New Mexico Environment Department (NMED)).

New York: la Oficina de Regulación de Petróleo y Gas de la División de Recursos Minerales del Departamento de Conservación Ambiental del Estado de Nueva York (the Bureau of Oil and Gas Regulation in the Division of Mineral Resources (Office of Natural Resources) of the New York State Department of Environmental Conservation (NYSDEC)).

Ohio: La División de Gestión de Recursos Minerales (DMRM) en el Departamento de Recursos Naturales de Ohio (DNR) (The Division of Mineral Resources Management (DMRM) in the Ohio Department of Natural Resources (DNR)), bajo la supervisión de la Agencia de Protección Ambiental de Ohio (Ohio EPA).

Oklahoma: La Comisión de la Corporación de Oklahoma (OCC), a través de la División de Petróleo y Gas (The Oklahoma Corporation Commission (OCC)), bajo la supervisión del Departamento de Calidad Ambiental de Oklahoma (DEQ).

Pennsylvania: La Oficina de Administración de Petróleo y Gas (Oficina de Administración de Recursos Minerales) del Departamento de Protección Ambiental de Pennsylvania (PADEP) (The Pennsylvania Department of Environmental Protection (PADEP) Office of Oil and Gas Management (Office of Mineral Resource Management)).

South Dakota: El Departamento de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Dakota del Sur, sección de petróleo y gas (The South Dakota Department of Environment and Natural Resources (SD DENR)).

Tennessee: El Departamento de Medio Ambiente y Conservación de Tennessee, Consejo de Calidad de Agua, Petróleo y Gas de Tennessee (The Tennessee Department of Environment and Conservation (TDEC)).

Texas: La Comisión de Ferrocarriles de Texas, a través de la División de Petróleo y Gas (The Railroad Commission of Texas (RCC)) junto a la Comisión de Conservación de los Recursos Naturales de Texas (the Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ)).

Utah: La División de Petróleo, Gas y Minería de Utah en el Departamento de Recursos Naturales (The Utah Division of Oil, Gas and Mining in the Utah Department of Natural Resources) junto al Departamento de Calidad Ambiental de Utah (the Utah Department of Environmental Quality (DEQ)).

Virginia: La División de Gas y Petróleo en el Departamento de Minas, Metales y Energía de Virginia (DMME) (The Division of Gas and Oil in the Virginia Department of Mines, Minerals and Energy (DMME)).

West Virginia: La Oficina de Petróleo y Gas (OOG) del Departamento de Protección Ambiental de Virginia Occidental (The Office of Oil and Gas (OOG) in the West Virginia Department of Environmental Protection (DEP)).

Wyoming: La Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Wyoming (The Wyoming Oil and Gas Conservation Commission (WOGCC)), junto al Departamento de Calidad Ambiental de Wyoming (The Wyoming Department of Environmental Quality (DEQ)).

4.1.2 Mecanismos técnicos aplicados en la industria norteamericana para la gestión ambiental de los cortes de perforación

Tal como se ha tratado con anterioridad, los métodos técnicos usados en Norteamérica para el tratamiento y disposición de los cortes de perforación, se encuentran disponibles en el módulo en línea DWMIS¹⁸⁴, donde se plantean cada uno de los procedimientos reglamentados para la estructura federal de este país. Teniendo en cuenta esto, en esta herramienta se concibe como primer paso la separación de los cuttings (cortes de perforación) de los residuos líquidos; en algunas ocasiones se hace el uso de técnicas para realizar la estabilización o solidificación del material como una medida opcional, una vez realizada dicha separación existen una variedad de tecnologías y prácticas para su gestión, estos procedimientos son agrupados por el DWMIS en tres categorías:

- Minimización de residuos.
- Reciclaje/Reutilización.
- Disposición.

4.1.2.1 Procedimientos preliminares al tratamiento y disposición de residuos de perforación – Solidificación y estabilización.

Tal como se menciona en el DWMIS¹⁸⁵, los cuttings separados del fluido de perforación usualmente mantienen un volumen remanente considerable de este fluido, el cual puede filtrarse y dificultar operaciones posteriores de enterramiento

¹⁸⁴ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Waste Management Technology Descriptions. [citado mayo 02, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/index.cfm>>.

¹⁸⁵ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], Drilling Waste Management Technology Descriptions. [citado mayo 02, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/solid/index.cfm>>.

o aplicación en el suelo, de tal manera que en ciertas operaciones se hace uso de procedimientos de solidificación y estabilización.

Solidificación: tal como es referido por Fleming, C.¹⁸⁶ este procedimiento hace alusión a las técnicas que encapsulan los residuos en un sólido de alta integridad estructural, este procedimiento puede ser utilizado tanto para partículas pequeñas de residuos (micro encapsulamiento) como para desechos de gran tamaño (macro encapsulamiento).

Estabilización: según el DWMIS¹⁸⁷ son aquellas técnicas que disminuyen el potencial contaminante de un residuo convirtiéndolo en su forma de menor solubilidad, movilidad y toxicidad.

Tal como lo estipula el Drilling Waste Management Information System, para el caso de los procedimientos de solidificación y estabilización de los cortes de perforación se hace uso de materiales como cemento, ceniza, cal y el óxido de calcio como aditivos (materiales con un pH alto). Por otra parte, los residuos resultantes, suelen poseer características de sólidos parcialmente saturados con agua, que están compuestos por una o más fases sólidas, así como aire atrapado en forma de burbujas y una fase líquida, existiendo todas en equilibrio. Ahora bien, en esta página web¹⁸⁸ se establece además que este tipo de materiales finales han sido utilizados como elementos base para el cimiento de carreteras, material de relleno durante el movimiento de tierra y como materiales de construcción.

4.1.2.2 Minimización de residuos

Prácticas de perforación que minimiza la generación de residuos

Basado en lo referido en el DWMIS¹⁸⁹, se hace notable que durante el desarrollo de las prácticas de perforación convencionales, ha existido la tendencia de perforar pozos relativamente verticales con completamientos diseñados a interceptar una única formación objetivo, este hecho supone la generación de una gran cantidad de

¹⁸⁶ FLEMING, C. A Discussion of: Chemical Fixation and Solidification (CFS), Solidification/Stabilization, Microencapsulation, and Macroencapsulation. Prepared for the API/NOIA Synthetic Based Fluids Research Group, 2000.

¹⁸⁷ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Solidification and Stabilization. [citado mayo 02, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/solid/index.cfm>>.

¹⁸⁸ MORILLON, A., J.F. VIDALIE, U. SYAHNUDI, S. SURIPNO, AND E.K. HADINOTO. Drilling and Waste Management-SPE 73931, presented at the SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Kuala Lumpur, Malaysia. doi: 10.2118/73931-MS, 2002. p. 1-9.

¹⁸⁹ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado mayo 03, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

residuos tan solo para llegar a una producción de petróleo determinada por una capa. En este orden de ideas, según lo planteado por el Department of Energy, Office of Fossil Energy (DOE)¹⁹⁰ se afirma que las técnicas modernas permiten pues, modificaciones en aspectos técnicos que resulten en la producción de una mayor tasa de hidrocarburo y gas con una menor generación de residuos; dichas modificaciones apuntan a la intersección de múltiples objetivos en un mismo pozo, así como técnicas de perforación de huecos de menor diámetro, haciendo uso de una menor cantidad de lodo de perforación.

- *Perforación direccional*

Según la información del DWMIS¹⁹¹, desde su introducción en la década de 1970, las nuevas tecnologías de ensamblajes de motores de fondo orientables, así como herramientas MWD (medición durante la perforación), han permitido la perforación de pozos capaces de alcanzar múltiples formaciones objetivo, esto ha posibilitado el aumento de la producción de hidrocarburos; de esta manera existen tres variaciones para la perforación direccional que minimizan la generación de residuos:

Perforación de alcance extendido: Consiste en realizar una perforación cuya formación objetivo no se encuentra por debajo de la locación en superficie, sino por el contrario se ubica a unas millas del sitio; esto puede ser beneficioso desde el punto de vista práctico y económico en algunas circunstancias.

Según el DWMIS¹⁹², esta técnica permite además llegar a múltiples zonas con el uso de una sola plataforma de perforación, así como a diferentes profundidades y orientaciones, un ejemplo de este tipo de aplicación se encuentra en Long Beach California, con las operaciones THUMS las cuales consisten en el uso de cuatro islas artificiales, en donde se han perforado más de 1200 pozos a diferentes profundidades y orientaciones. El uso de esta técnica de perforación, supone una reducción de impactos ambientales relacionados a las instalaciones de superficie requeridas.

¹⁹⁰ DOE. Environmental Benefits of Advanced Oil and Gas Production Technology, DOE-FE-0385, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, Washington, DC (Available at: http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=771125), 1999. p. 34-41.

¹⁹¹ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado mayo 03, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

¹⁹² ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado mayo 03, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

Perforación horizontal: tal como se encuentra plasmado en el Drilling Waste Management Information System¹⁹³ esta técnica hace referencia al tipo de perforación usada cuando la formación productora no posee un gran grosor, pero si se extiende por un área considerable, de esta manera un pozo horizontal posee una mayor área de contacto que la aplicación de múltiples pozos tradicionales.

Múltiples laterales: según el DWMIS¹⁹⁴ esta técnica consiste en realizar la perforación de diferentes pozos laterales, haciendo uso de la perforación direccional con el objetivo de llegar a las diferentes zonas objetivos que pueden existir a diferentes profundidades o estratos, en esta técnica se hace uso de un pozo vertical principal, del cual se da la ramificación de los múltiples laterales

- *Perforación de pozos de menor diámetro*

Tal como se ha visto, la escala de generación de cortes de perforación se encuentra relacionada directamente con el diámetro del pozo, por lo cual existen métodos enfocados a minimizar este parámetro con el objetivo de disminuir la producción de este tipo de material de desecho.

Perforación de hueco esbelto (Slimhole drilling): según lo planteado en el DWMIS, consiste en la perforación de pozos en los cuales “al menos el 90% del agujero es perforado con una broca de seis pulgadas o menos”¹⁹⁵.

Perforación con tubería flexible (Coiled tubing drilling): tal como se encuentra referido en el Drilling Waste Management Information System¹⁹⁶, este tipo de equipo permite realizar la bajada de la tubería de perforación de una manera continua sin la necesidad de realizar la conexión de las diferentes secciones, pues dicha tubería se encuentra enroscada en un carrete. Cabe mencionar que la perforación mediante esta técnica permite realizar pozos de menor diámetro, lo cual generara un menor volumen de cortes.

¹⁹³ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado mayo 03, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

¹⁹⁴ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado mayo 03, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

¹⁹⁵ DOE. Environmental Benefits of Advanced Oil and Gas Production Technology, 1999 citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

¹⁹⁶ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

Espaciamientos cercano entre casing sucesivos: basado en el DWMIS¹⁹⁷ consiste en el uso de casing adyacentes que puedan ser instalados a una menor distancia, haciendo que la distancia entre el interior y exterior sea menor; lo cual provocara una disminución en el volumen de cortes generados.

- Técnicas que minimizan el uso de fluidos de perforación
Perforación neumática: según la DOE¹⁹⁸, bajo ciertas condiciones algunas formaciones pueden ser perforadas haciendo uso de aire, espuma o lodo aireado, lo cual produce naturalmente una menor traza ambiental así como una disminución de impactos en áreas sensibles.

Uso de lodos y aditivos que minimizan los impactos ambientales

Tal como es conocido, durante el desarrollo de una perforación se pueden hacer uso de lodos base agua o base aceite, considerando que los primeros poseen un menor costo, así como una menor traza ambiental, a pesar de esto, dicho tipo de lodos bajo ciertas circunstancias no cumplen con los requerimientos operacionales necesarios, por lo cual se recurre al uso de los fluidos de perforación base aceite, los cuales generan impactos ambientales de mayor índole. En este orden de ideas, se han diseñado sistemas de fluidos alternativos, que satisfagan las principales necesidades durante la perforación de un pozo, teniendo en cuenta de esta manera el apartado técnico como ambiental.

- Implementación de lodos sintéticos (SBMs)

Basado en lo dispuesto en la herramienta DWMIS¹⁹⁹, los lodos sintéticos son considerados como nuevos fluidos de perforación no acuosos, los cuales pueden incluir olefinas, esterres, alfa – olefinas lineares, poli alfa-olefinas y parafinas lineares; de tal forma que conservan las propiedades deseables de los lodos bases aceite, sin la necesidad de contener hidrocarburos aromáticos polinucleares, además de poseer una menor toxicidad y una mayor biodegradabilidad.

¹⁹⁷ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

¹⁹⁸ DOE. Environmental Benefits of Advanced Oil and Gas Production Technology, 1999 citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

¹⁹⁹ ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/lower/index.cfm>>.

- Nuevos sistemas de fluidos de perforación

Segun Growcock, F.B., G.W. Curtis, B. Hoxha, W.S. Brooks, And J.E. Candler²⁰⁰, en la actualidad existen variaciones de los sistemas de fluidos tradicionales, que tienen características que los hacen de menor traza ambiental, un ejemplo de este hecho es la tendencia al uso de fluidos de perforación basados en salmuera, los cuales han demostrado generar menores impactos que los tradicionales; dichos fluidos están formados mediante la reacción de ácido fórmico con hidróxidos metálicos.

- Agentes de peso alternativos

Tal como mencionan Growcock, F.B., G.W. Curtis, B. Hoxha, W.S. Brooks, And J.E. Candler²⁰¹, se sabe que durante la preparación de los lodos de perforación se hace uso de una serie de aditivos, los cuales poseen características que los hacen de un potencial contaminante importante, tal como lo es la barita, que es aplicada como agente de peso para los lodos de perforación, además de este compuesto usualmente se hace uso de hematita o el carbonato de calcio; en contraste han existido pozos desarrollados con un tipo de aditivo llamado ilmetita en lugar de la barita convencional.

²⁰⁰ GROWCOCK, F.B., G.W. CURTIS, B. HOXHA, W.S. BROOKS, AND J.E. CANDLER. Designing Invert Drilling Fluids to Yield Environmentally Friendly Drilled Cuttings. IADC/SPE 74474, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, 2002, February 26-28. Citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. Drilling Waste Management Information System [en línea], [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/lower/index.cfm>>.

²⁰¹ GROWCOCK, F.B., G.W. CURTIS, B. HOXHA, W.S. BROOKS, AND J.E. CANDLER. Designing Invert Drilling Fluids to Yield Environmentally Friendly Drilled Cuttings. IADC/SPE 74474, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, 2002, February 26-28. Citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. Drilling Waste Management Information System [en línea], [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/lower/index.cfm>>.

4.1.2.3 Reciclaje/ Re uso

Re uso de los cortes de perforación

Esparcimiento en carretera (Road spreading): este mecanismo tal como se estipula en el DWMIS²⁰² consiste en aplicar los cortes de perforación sobrantes, como un medio para dar mayor estabilidad a superficies sujetas a procesos de erosión, tal como es el caso de los caminos, cabe aclarar que esta práctica se encuentra sujeta a la jurisdicción de las agencias regulatorias pertinentes a cada estado, por lo cual su uso en caminos públicos se encuentra limitado. Cuando se hace uso de cortes con contenido de lodos base aceite, se debe tener en consideración la tasa de asentamiento, de tal manera que no exista una filtración de aceite libre en la superficie del camino.

Re uso de los cuttings como material de construcción: tal como se conoce y menciona el autor Cordah²⁰³, después de la separación que sufren los cortes de perforación en las zarandas, los mismo pueden mantener un contenido considerable de lodo, lo cual puede dificultar su re uso; de esta manera algunos desechos de este tipo son tratados térmicamente, con el objetivo de producir un material relativamente seco, una vez se tiene dicho material, el mismo puede ser utilizado como material de relleno, material de cubierta diaria en los landfills y agregado o relleno en la fabricación de concreto, ladrillo o bloques.

Otras posibles aplicaciones que puede tener este tipo de material incluyen las mencionadas por Cordah²⁰⁴, tales como el uso en pavimentos de carretera, bitumen y asfalto, además de uso en la producción de cemento. Por otra parte, han existido aplicaciones de los cortes de perforación, como material de relleno durante las operaciones de abandono de pozo.

²⁰² CORDAH. Research on the Re-use of Drill Cuttings Onshore. Prepared by Cordah Limited, Aberdeen, Scotland, for Talisman Energy (UK) Limited, 2001 September 11 citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

²⁰³ CORDAH. Research on the Re-use of Drill Cuttings Onshore. Prepared by Cordah Limited, Aberdeen, Scotland, for Talisman Energy (UK) Limited, 2001 September 11 citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

²⁰⁴ CORDAH. Research on the Re-use of Drill Cuttings Onshore. Prepared by Cordah Limited, Aberdeen, Scotland, for Talisman Energy (UK) Limited, 2001 September 11 citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

Restauración de los humedales utilizando los cortes de perforación: una de las más nuevas aplicaciones de los cortes de perforación es la mencionada en el trabajo de Veil, J.A.²⁰⁵, la cual consiste en usarlos como sustrato para restaurar los humedales costeros (Estados Unidos). Teniendo en cuenta lo anterior, la DOE financió una serie de proyectos, enfocados a probar la factibilidad del uso de cuttings tratados como medio para restaurar la afectaciones que han sufrido los humedales de Louisiana; de esta manera una de las fases incluyó experimentos enfocados al cultivo de una serie de plantas de tipo humedal, en cortes de perforación previamente tratados; de tal forma que los resultados de esta experiencia demostraron un crecimiento vegetal normal en este tipo de material. Cabe añadir, que a pesar de estas investigaciones, ni el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos ni la EPA emitieron un permiso para conducir una demostración a escala de campo.

Uso de los cortes de perforación como combustible: Basado en el trabajo de Page, P.W., C. Greaves, R. Lawson, S. Hayes, And F. Boyle²⁰⁶, se conoce que se han adelantado una serie de experimentos en el Reino Unido haciendo uso de cuttings aceitosos como combustible en una planta de generación de energía; durante los ensayos el material fue mezclado a baja velocidad con el carbón, que es usado como la fuente primaria de energía, de esta manera el resultado de la combustión mostró características similares a las cenizas de carbón. Una de las consideraciones de esta tecnología hace referencia a la necesidad de ubicar las estaciones de generación cerca de un punto de producción de cortes de perforación, con el objetivo de minimizar el requerimiento de transporte del material, cabe mencionar además que esta aplicación es mencionada por Veil, J.A..

²⁰⁵ VEIL, J.A.. Drilling Waste Management: Past, Present, and Future. SPE 77388, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, 2002, p. 5. 2, citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

²⁰⁶ PAGE, P.W., C. GREAVES, R. LAWSON, S. HAYES, AND F. BOYLE. Options for the Recycling of Drill Cuttings. SPE 80583, SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, TX, 2003 March 10-12, citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

4.2 DESORCIÓN TÉRMICA

Según Pierce, D. A., Wood, B., & Gaddis, C²⁰⁷, el proceso de desorción térmica consiste en el uso de la temperatura para eliminar los componentes indeseables que están saturando los cortes de perforación; para esto se realiza un aumento considerable de temperatura, de tal manera que se dé la vaporización tanto del agua como de la porción de hidrocarburos existentes; la temperatura se mantiene constante hasta que se da la remoción completa de los fluidos. Una vez vaporizados los fluidos, se procede a la separación de las fases (agua e hidrocarburo) existentes.

Teniendo lo mencionado por, D. A., Wood, B., & Gaddis, C²⁰⁸; el uso de esta técnica ha generado buenos resultados desde 1999, con la instalación de la primera unidad THOR por BP en Colombia, esta unidad a tratado alrededor de 1000000 de barriles de cortes de perforación; en 2002 se instaló la segunda unidad de este tipo en el proyecto Egipto; de esta manera este tipo de unidades ha mostrado resultados eficientes durante el proceso de tratamiento.

Cabe mencionar que tal como refieren estos mismos autores²⁰⁹; la eficiencia de esta técnica ha demostrado estar en función de una serie de factores entre los cuales se encuentran la alimentación del proceso, la cual a partir de la experiencia de campo ha mostrado que para la el correcto funcionamiento de la unidad se requiere un caudal de alimentación constante, con un contenido tanto de cortes como de agua continuo, además se ha podido establecer que se puede lograr una optimización del proceso mediante la mezcla de los cortes en la entrada de la unidad.

Ahora bien dentro de los factores que afectan en menor medida la eficiencia de este método, según D. A., Wood, B., & Gaddis, C²¹⁰ se encuentran:

- *El contenido de oxígeno:* para que se den las condiciones para realizar la desorción el porcentaje de oxígeno presente tiene que ser <8% en volumen, además durante el proceso no se debe permitir la intrusión de aire a la unidad, puesto esto generaría una afectación del caudal de alimentación
- *Remoción de polvo.*
- *Desecado de la unidad.*
- *Calentamiento directo o indirecto.*

²⁰⁷ PIERCE, D. A., WOOD, B., & GADDIS, C. Lessons learned from treating 500,000 tons of oil-based drill cuttings on five continents Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/99027-MS, 2006. p 2.

²⁰⁸ Ibid. p. 2.

²⁰⁹ Ibid. p. 2.

²¹⁰ Ibid. p 2.

4.3 PIROLISIS

Tal como es referido por Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R.²¹¹ este proceso puede ser considerado como un tratamiento termal, que implica la combustión de los cortes de perforación en ausencia de oxígeno mediante la aplicación de una fuente externa de calor, lo cual permite a la materia orgánica saturada en la roca convertirse en una serie de bio productos. El fraccionamiento del material orgánico ocurre de una manera gradual, a travessando pues por una serie de áreas de calentamiento: de esta manera la primera área existente es la de secado, seguida del área de la pirolisis (300 a 1600°C), en la cual se dan los procesos de volatilización, oxidación y fusión del material contaminante. Una vez ejecutado el proceso de pirolisis, se generan los siguientes compuestos:

❖ *Gases no condensables, compuestos principalmente de nitrógeno y gas sintético.* Los productos de esta naturaleza pueden ser utilizados para la producción de vapor a través de los intercambiadores de calor y calderas, además pueden ser usados para la generación de electricidad en centrales termoeléctricas.

❖ *Líquido piroleñoso, obtenido de la condensación de los gases provenientes del proceso.* En este estado las sustancias de esta índole, son consideradas altamente corrosivas y contaminantes, de tal manera que pueden ser tratadas mediante aireación, con el fin de hacerlas aprovechables para la obtención de energía, por otra parte, pueden ser utilizadas en algunas actividades agrícolas, dependiendo de su nivel de contaminación.

❖ *Residuo sólido:* integrado en gran proporción de carbón, alambique, vidrio y metales no reactivos. El carbón obtenido puede ser procesado y utilizado para el uso en hornos y otras actividades domésticas.

4.4 GASIFICACIÓN

El término gasificación, según Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R.²¹², hace alusión al proceso termoquímico de descomposición de la materia orgánica; de tal manera que puede considerarse como una técnica de oxidación parcial que hace uso de un agente de gasificación, usualmente oxígeno, aire o vapor caliente, en concentraciones menores a las estequiometrias, para producir Syngas. Los componentes principales de este proceso son el carbono, el monóxido y el hidrógeno. Una vez finalizado el proceso el gas producido, puede ser utilizado en

²¹¹ SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015. p. 7.

²¹² Ibid. p. 7-8.

una gran variedad de aplicaciones, tales como la generación de energía eléctrica o la producción directa de calor.

Las reacciones existentes durante un proceso de gasificación, consisten de cuatro etapas:

- Secado
- Pirolisis
- Reducción
- Combustión

Las condiciones de operación de esta técnica son considerables, puesto que tal como mencionan Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R²¹³, se realizan a una temperatura cercana a los 850 °C, y a presiones que pueden variar desde la presión atmosférica hasta presiones barométricas superiores, este hecho limita pues la aplicación de esta técnica, ya que requiere además de las condiciones anteriormente mencionadas, el uso de productos químicos de alto costo económico.

4.5 GASIFICACIÓN ASISTIDA CON PLASMA

La técnica de gasificación asistida con plasma, es considerada según Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R²¹⁴, como una metodología avanzada para el manejo de residuos, puesto que involucra la descomposición termoquímica del material de desecho, a partir del uso de un arco eléctrico, en un ambiente carente de oxígeno, generando de esta manera temperaturas extremadamente altas. Este método se diferencia de la de la incineración, en cuanto al rango de materiales a tratar, puesto que su aplicación no está condicionada al tipo de residuo a manejar, por otra parte se puede afirmar que su diferencia básica con los métodos convencionales de gasificación radica en el nivel de temperatura utilizado, ya que este tipo de tecnología, puede alcanzar niveles de hasta 3000 °C. Dentro del proceso se da la conversión de los compuestos contenidos por los cortes de perforación, (N₂, H₂, CO₂, e hidrocarburos pesados) en Syngas, que puede utilizarse posteriormente como combustible similar al gas natural.

²¹³ SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015. p. 7-8.

²¹⁴ Ibid. p. 7-8.

Productos generados

Los subproductos provenientes de la gasificación asistida con plasma son:

- Sulfuro y cloruro recuperables.
- Residuos metálicos reutilizables.
- Syngas, compuesto principalmente de CO e hidrogeno, que posee el potencial de producir calor a partir del vapor, además de ser utilizable para la generación de energía eléctrica.

Cabe añadir que dentro de las investigaciones Scorzelli, I. B., Costa, C. L. P., & Furio, P. R, presentan una recopilación de las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos térmicos existentes (figura 11 A, B).

Figura 11.A: Recopilación ventajas/desventajas métodos térmicos

Technology		Advantages	Disadvantage
Conventional	Co-procesing	<ul style="list-style-type: none"> • High Thermal Efficiency recovery • Reduce consumption of fossil fuels • Does not produces slag 	<ul style="list-style-type: none"> • Can not dispose toxic chlorine waste • Can only dispose waste with significant calorific value • Requires a rigid control of atmospheric emissions
	Incineration	<ul style="list-style-type: none"> • Significant reduction in the volume of waste (~95%) • Detoxification - destroys bacteria, viruses, and organic compounds (CCl₄, oil askarel) 	<ul style="list-style-type: none"> • High operational and maintenance costs • Rigid control of dioxins and furans • High cost for the treatment of gaseous and liquid effluents (cooling water from slag and washing of smoke) • Low Energy Recovery • High cost to produce electricity
High Technology	Pyrolysis	<ul style="list-style-type: none"> • Dioxins and furans are not formed during the process due to the absence of O₂. • There is no requirement for a high control over the temperature of the reactor. • The atmospheric emissions are lower than in incineration • The volume of waste treated is significantly reduced (até 90%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Use of fuel (coal, fuel oil or gas) or electricity to feed the source of heat • The pyrolygneous liquid generated is corrosive, harmful and highly polluting. • Required treatment of gaseous emissions and liquid effluents generated in process.

Fuente: SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015. p.10.

Figura 11.B: Recopilación ventajas/desventajas métodos térmicos

high Technology	Gasification	<ul style="list-style-type: none"> • The ashes and residual carbon remain in gasifier, reducing particulate emissions. • High thermal efficiency, ranging from 60 to 90 %, depending on the implemented system. • Associated with catalysts, such as aluminum and zinc, the gasification increases the production of H₂ and CO and decreases the production of CO₂. • The rate of gasification can be easily monitored and controlled. • Process is less polluting than incineration 	<ul style="list-style-type: none"> • The waste must be cleaned (free of impurities). • The corrosion on equipment can be increased with the potential of fusion of ash at temperatures above 900°C. • Presence of tar formed during the gasification process, may limit the applications of syngas. • Energy Potential is less than incineration. • Avoid dispose of inorganic matter
	Plasma Assisted Gasification	<ul style="list-style-type: none"> • Plasma gasification plants can be designed for a small-medium scale. • Feedstocks can be mixed, such as municipal solid waste, biomass, tires, hazardous waste, and auto shredder waste • It is not incineration and therefore doesn't produce leachable bottom ash or fly ash • Clean destruction of hazardous waste, preventing it from reaching landfills • Production of clean alloyed slag which could be used as construction material • Processing of organic waste into combustible syngas for electric power and thermal energy • Production of value-added products (metals) from slag • Reduced volume of waste (more than 99%) 	<ul style="list-style-type: none"> • To achieve a favorable energy balance the volume of inorganics in the waste stream should be minimized. • Although it is possible to recover metals following plasma arc treatment it may not be economical to collect and separate small volumes. • facilities are expensive to construct • require a large amount of electrical energy input

Fuente: SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015. p.10.

4.6 TRATAMIENTO DE CORTES CON EL USO DE UNA FUENTE MICROONADAS

En 2008 Robinson, J., Kingman, S., Snape, C. E., Bradley, M., Bradshaw, S., Thomas, D. J. M.²¹⁵, realizaron una serie de experimentos enfocados en determinar la aplicabilidad del tratamiento de residuos sólidos por medio de microondas. Cabe mencionar que este método de manejo de desechos tiene la misma naturaleza técnica de los tratamientos térmicos, pues busca la desintegración de los fluidos contaminantes saturando la roca; para lo cual se hace necesario la transferencia de calor por medios mecánicos (Conducción, convección o radiación); en contraste la utilización de la técnica de microondas supondría la transferencia directa de energía al material a tratar, por medio del componente de campo eléctrico de las microondas.

Por otra parte durante los procesos térmicos convencionales, la distribución de temperatura está fuertemente afectada por el potencial de conductividad del material, hecho que es solucionado mediante la aplicación de microondas, las cuales calientan individual e instantáneamente cada uno de los elementos; esto se traduce naturalmente en tiempos de tratamiento más cortos.

4.7 TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN ACEITOSOS MEDIANTE EL USO DE UNA NANO EMULSIÓN

De acuerdo a lo menciona por Saphanuchart, W., Loke, Y. S., & See, C. H.²¹⁶, este mecanismo de tratamiento de sólidos de perforación, tiene como objetivo mejorar la eficiencia de remoción del aceite de los cortes mediante la reducción substancial de la tensión interfacial existente en los fluidos que saturan la roca; alcanzando de esta manera contenidos de aceite menores al 1%. En la misma se hace uso de un nano fluido, el cual es básicamente una mezcla de nano partículas suspendidas en un medio base. Las nano partículas que componen este tipo de sustancia tienen un tamaño que oscila entre 10 – 100 nm, de tal manera que posee propiedades únicas debido a su escala; una de estas es la reducción de la tensión interfacial (IFT) entre fases, teniendo la posibilidad de llegar hasta 0,0001 mN/m; este cambio en las propiedades de los fluidos altera en gran medida la movilización de las sustancias contaminantes dentro de los cortes de perforación.

²¹⁵ ROBINSON, J., KINGMAN, S., SNAPE, C. E., BRADLEY, M., BRADSHAW, S., THOMAS, D. J. M., & PAGE, P. W. Microwave treatment of oil-contaminated drill cuttings at pilot scale Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111637-MS, 2008. p. 1-2.

²¹⁶ SAPHANUCHART, W., LOKE, Y. S., & SEE, C. H. Nanoemulsion-enhanced treatment of oil-contaminated oil-based drill solids Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/162401-MS, 2013. p.125.

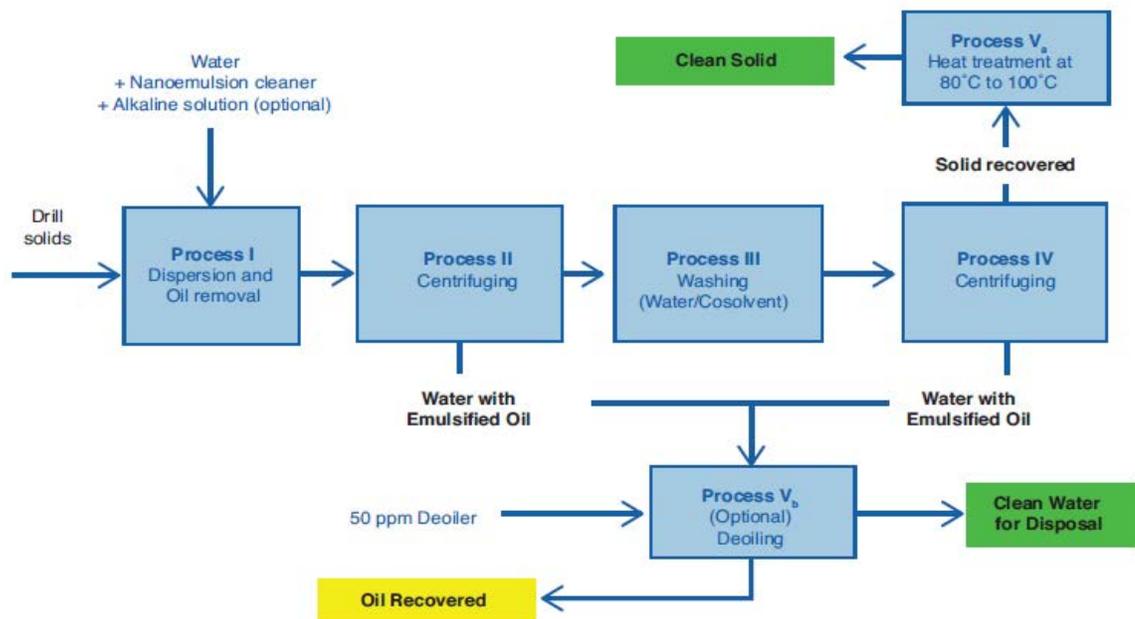
Procedimiento

Saphanuchart, W., Loke, Y. S., & See, C. H.²¹⁷ establecen cada una de las etapas del proceso de tratamiento de cortes de perforación mediante una nano emulsión de aceite en agua (también puede ser una emulsión de agua en aceite); a una temperatura de proceso de alrededor de 25°C. (Figura 12).

Las etapas de este proceso de acuerdo a Saphanuchart, W., Loke, Y. S., & See, C. H son las siguientes:

- Proceso I: Dispersión y remoción de aceite.
- Proceso II: Centrifugación de los materiales sólidos.
- Proceso III: Lavamiento del material con agua o solvente.
- Proceso IV: Segundo Centrifugado.
- Proceso V: Disposición del material resultante.

Figura 12. Tratamiento de cortes de perforación mediante una Nano emulsión.



Fuente: SAPHANUCHART, W., LOKE, Y. S., & SEE, C. H. Nanoemulsion-enhanced treatment of oil-contaminated oil-based drill solids Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/162401-MS, 2013. p. 126.

²¹⁷ SAPHANUCHART, W., LOKE, Y. S., & SEE, C. H. Nanoemulsion-enhanced treatment of oil-contaminated oil-based drill solids Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/162401-MS, 2013. p.125.

Durante la parte práctica Saphanuchart, W., Loke, Y. S., & See, C. H.²¹⁸, realizaron la comparación entre la aplicación de una mezcla de surfactantes y la aplicación de la nano emulsión (Agua en aceite), encontrando de esta manera que el uso de surfactantes en este proceso posee un límite marcado, pues se llega al punto en el cual el aumento de concentración de surfactante no produce un cambio significativo en la tensión interfacial (20%), en contraste durante la aplicación de la nano emulsión, con una tamaño de partícula alrededor de 50 nm, demostró ser sorprendentemente eficiente durante la remoción del aceite de los cortes de perforación, del tal manera que una concentración de 10% genera la disminución del contenido orgánico a un valor menor a 1%. A pesar de estos potenciales resultandos, se concluye que el uso de esta técnica está limitado por el factor económico, puesto que debido a su naturaleza las nano partículas base utilizadas poseen un precio considerable.

4.8 DESCONTAMINACIÓN DE CORTES MEDIANTE UN SECADOR MICROONDAS CONTINUÚO

Esta técnica consiste en el uso de una herramienta de secado de cortes mediante una mecanismo de microondas como fuente de calentamiento (escala semi-industrial); la cual durante la investigación desarrollada por los autores I. Petri Júnior, CH Ataíde, and CR Duarte, Federal University of Uberlândia; RN de Toledo and AS Morais, INNOVARE; CM de A. Panisset, CHM de Sá, and AL Martins, Petrobras en su trabajo Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer ²¹⁹ fue construida para procesar cuttings humectados con una fase orgánica a una tasa de 0.5 ton/hr; en este trabajo se evaluó pues el porcentaje de contenido contaminante antes y después del tratamiento efectuado por el mecanismo.

Procedimiento

Durante el desarrollo del estudio investigativo de I. Petri Júnior, Ch Ataíde, Cr Duarte, Rn De Toledo, As Morais, Cm De A. Panisset, Chm De Sá, And Al Martins²²⁰ se hizo uso de un mecanismo de tratamiento de cortes humectados con lodo sintético, el cual se basa en un calentamiento por microondas (Drilling Cutting Treatment Unit) (Figura 13). En primera instancia se establecen las características

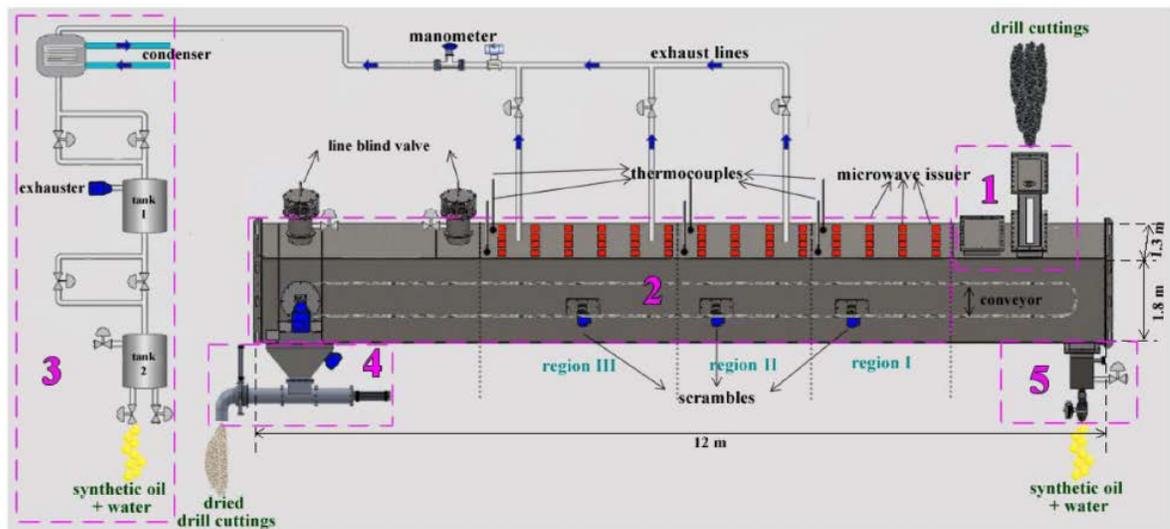
²¹⁸ SAPHANUCHART, W., LOKE, Y. S., & SEE, C. H. Nanoemulsion-enhanced treatment of oil-contaminated oil-based drill solids Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/162401-MS, 2013. p. 125-127.

²¹⁹ I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras doi: 10.4043/26335-MS, 2015. p.1.

²²⁰ I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras. doi: 10.4043/26335-MS, 2015. p.3.

de los cuttings a tratar, los cuales provienen del centro de tratamiento de residuos de Petrobras S.A (200 kg de cuttings secos mezclados con un volumen calculado de fluido de perforación sintético) en Campolis, sePIPE, Brazil; dichos residuos fueron contaminados inicialmente con una base sintética n- parafina, para posteriormente ser tratados con el uso de un secador centrifugo convencional y almacenados en bolsas con el fin de simular los procedimientos tradicionales realizados en campo.

Figura 13. Unidad experimental (DCTU).



Fuente: I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras. doi: 10.4043/26335-MS, 2015. p.3.

De acuerdo a I. Petri Júnior, Ch Ataíde, Cr Duarte, Rn De Toledo, As Morais, Cm De A. Panisset, Chm De Sá, And Al Martins²²¹, los cortes contaminados son alimentados a la tolva situada en la unidad de alimentación, siendo transportados en forma de capa homogénea. El mecanismo de transporte traslada el lecho de sólidos humectados a través de las fuentes de microondas para que se dé el proceso de secado, cabe mencionar que para lograr una homogenización existen tres mezcladores dentro del horno, de tal manera que el secado se dé uniformemente, ahora bien los vapores son retirados mediante la unidad de condensación, así como la unidad de purga, los cortes secos son raspados del transportador y descargados en la unidad de almacenamiento, cabe mencionar que la unidad DCTU trabaja con una alimentación continua de cortes que puede variar

²²¹ I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras. doi: 10.4043/26335-MS, 2015. p.3.

según las necesidades operacionales. Finalmente los cortes resultantes son analizados para determinar el contenido residual de lodo sintético mediante tecnología NMR (tecnología de resonancia magnética nuclear).

Durante el desarrollo de la unidad se tuvieron en cuenta condiciones operacionales tales como: número de líneas, temperatura de operación, presión de operación y grosor de la capa de cortes. Por otra parte, se realizó esta operación variando la tasa de alimentación de cortes hacia la unidad (Tabla 5).

Tabla 5. Condiciones operacionales de las pruebas efectuadas al DCTU.

Prueba	Flujo másico en la entrada [Kg/h]	Contenido inicial de base sintética [%]
1	250	7.5
2	500	7.5
3	750	7.5
4	250	10
5	500	10
6	750	10
7	250	12.5
8	500	12.5
9	750	12.5

Fuente: Adaptado de I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras. doi: 10.4043/26335-MS, 2015. p.4.

De esta manera I. Petri Júnior, Ch Ataíde, Cr Duarte, Rn De Toledo, As Morais, Cm De A. Panisset, Chm De Sá, And Al Martins²²² determinaron las condiciones optimas para el uso de esta unidad, las cuales disminuyen el contenido de lodo sintético residual (72%), el agua (57%), y la energía específica necesaria, la cual decreció en un 17% con respecto a las condiciones iniciales, dichas condiciones óptimas de operación fueron: presión de operación de -50 mm H₂O, espesor del lecho de cortes de 90 mm y temperaturas de las regiones I, II y III de 200°C, 220°C y 250°C respectivamente. A partir de las diferentes pruebas, también se determinó que la tasa de alimentación aceptable se encuentra entre los 250 – 500 Kg/hr, manteniendo una reducción promedio del lodo sintético residual debajo de 2.7% (mucho menor al 6.9% requerido para la disposición marítima en Brasil), alcanzando en ciertas ocasiones reducciones hasta el punto de 0.1%, mostrando así que esta tecnología posee un gran potencial para su aplicación en campo.

²²² I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras. doi: 10.4043/26335-MS, 2015. p.7.

4.9 COMBINACIÓN DE UN AGENTE LIMPIADOR SINTETIZADO CON TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL TRATAMIENTO DE LOS CUTTINGS

Esta tecnología según Guanghuan Li, Hong Ma, Tao Long, Daquan Huang, Zengyan Tian, Aishun Zhang, Weizhong Wang, Shili Hou, And Chunwu Gong.²²³ consiste a grandes rasgos en la aplicación de un volumen de agente limpiador a los cortes de perforación, haciendo uso de una combinación con tecnología ultrasónica, que disminuye la cantidad necesaria de esta sustancia, así como mejorar la eficiencia del limpiador. Esta sustancia es fácilmente disuelta en agua, y produce la emulsificación del agua y el aceite, lo cual mejora la eficiencia de separación de los cortes; una vez terminado el proceso, dicha emulsión puede ser destruida mediante un cambio en el pH. Cabe mencionar, que esta técnica posee un balance costo – eficiencia resaltante, debido a la naturaleza técnica de su aplicación.

Procedimiento

El “agente limpiador” de acuerdo a Guanghuan Li, Hong Ma, Tao Long, Daquan Huang, Zengyan Tian, Aishun Zhang, Weizhong Wang, Shili Hou, And Chunwu Gong²²⁴ es básicamente un surfactante novedoso sintetizado específicamente para el tratamiento de cortes de perforación aceitosos; el cual junto a la tecnología ultrasónica puede llegar alcanzar niveles de reducción menores al 1%; de esta manera en el paper se exponen los materiales usados durante el la sintetización del agente BZ-CYJ:

- *Etilendiamina sódica Tetraacetato (EDTA-2Na),*
- *Dodecilsulfato sódico,*
- *Alcohol graso-éter polioxietilénico*
- *Alcohol propílico,*
- *Sales de amonio cuaternario de polioxietileno*
- *Sales inorgánicas*
- *Éter de petróleo*
- *Etracloruro de carbono*

²²³ GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.2.

²²⁴ Ibid. p.2.

En primer lugar, para determinar el contenido de petróleo en los cortes, según dichos autores²²⁵ se mezclaron 1.0 – 1.5 g de cortes aceitosos con 10 ml de tetraclorometano (CCU) en un embudo de separación, posteriormente se filtró el líquido de la capa inferior mediante un embudo de 10 ml de anhídrido de sulfato de sodio; llevándolo de esta manera a un matraz de 50 ml; una vez se repitió este procedimiento tres veces se pudieron encontrar los diferentes porcentajes de sólidos, petróleo y agua contenidos en los cortes mediante el uso de un espectrómetro (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados del análisis de componentes en los cortes aceitosos.

Muestra	Contenido Sólido (%)	Contenido de aceite (%)	Contenido de agua (%)
1	86.0	12.0	2.0
2	89.5	9.5	1.0
3	79.0	18.0	3.0
4	81.5	16.5	2.0

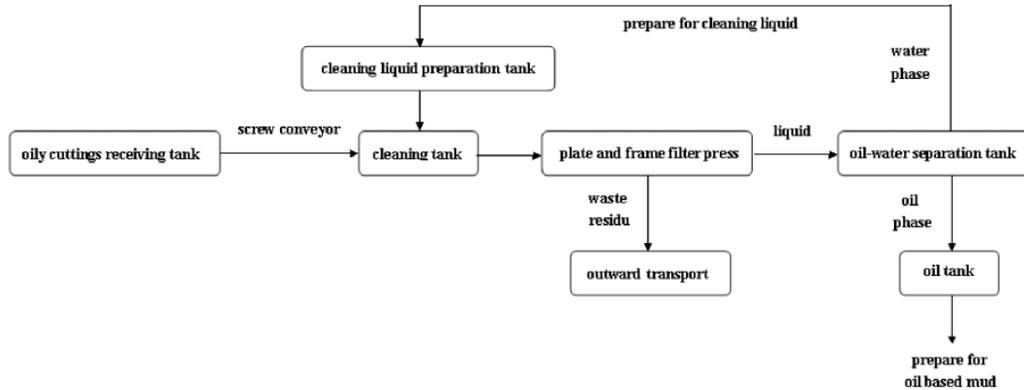
Fuente: Adaptado de GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.3.

Una vez determinada la necesidad de extraer el porcentaje de petróleo, según el trabajo de Guanghuan Li, Hong Ma, Tao Long, Daquan Huang, Zengyan Tian, Aishun Zhang, Weizhong Wang, Shili Hou, And Chunwu Gong²²⁶, se procedió a dar el mezclado del agente BZ-CYJ con el agua y los cortes aceitosos durante 10 minutos, después se dejó en reposo la mezcla, dándose una división en tres capas: la inferior mostraba la precipitación de la parte sólida, la capa intermedia fue la mezcla del agente BZ-CYJ con el agua y finalmente en la capa superior se encontraba el aceite removido. Posteriormente, el aceite es filtrado y la parte sólida removida; cabe mencionar que la calidad del aceite separado por este mecanismo, posee la calidad suficiente para ser utilizado nuevamente como fluido base para lodos de perforación (Figura 14).

²²⁵ GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.2.

²²⁶ Ibid. p. 2.

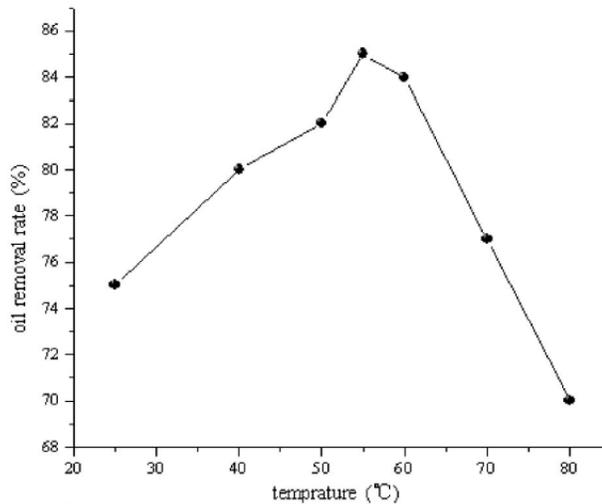
Figura 14. Proceso del tratamiento cortes mediante el uso del agente limpiador.



Fuente: GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.6.

Cabe mencionar que uno de los factores que determina en gran importancia la eficiencia de esta tecnología es la temperatura, tal como se puede apreciar en el paper referido, pues se realizaron variaciones en el experimento cambiando este parámetro (Figura 15). De esta manera se puede observar, que la tasa de remoción de aceite aumenta con el aumento de la temperatura, no obstante existe un punto (55°C) en el cual dicho aumento generara una disminución en la eficiencia, esto se debe a la afectación del agente a muy altas temperaturas.

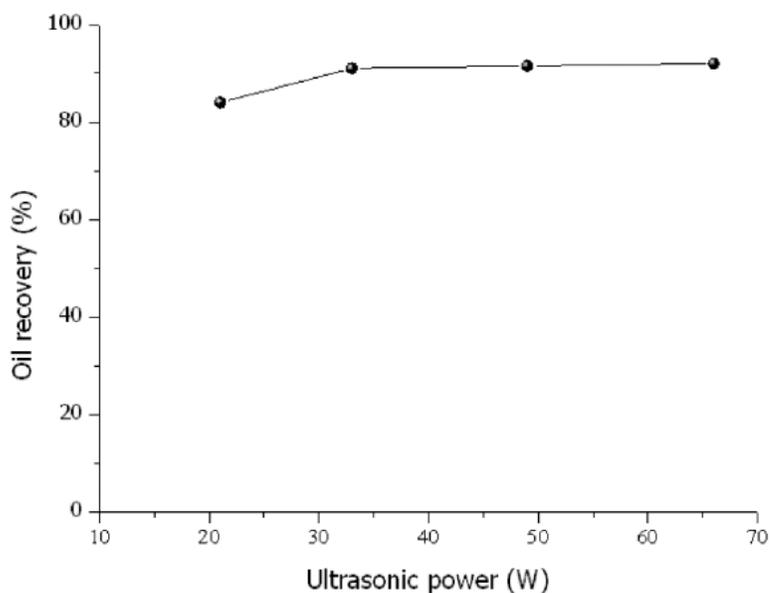
Figura 15. Variación de la tasa de remoción de aceite.



Fuente: GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.4.

Con el fin de aumentar la eficiencia de este método, de acuerdo a lo expuesto en el trabajo de Guanghuan Li, Hong Ma, Tao Long, Daquan Huang, Zengyan Tian, Aishun Zhang, Weizhong Wang, Shili Hou, And Chunwu Gong²²⁷, se hace uso de una fuente ultrasónica, la cual envía una vibración de alta frecuencia que promueve la desorción de los componentes orgánicos en los cortes; el nivel de compuestos separados es función de la intensidad o poder de la fuente; este hecho puede observarse en la investigación; pues se realiza un estudio para encontrar el nivel óptimo de este mecanismo (Figura 16), de tal manera que se concluye que la intensidad optima se encuentra en el aumento de 21 W a 33 W, punto en el cual un aumento no genera una mayor recuperación de petróleo de los cortes.

Figura 16. Efecto de la fuente de poder ultrasónica en la recuperación de petróleo de los cortes.



Fuente: GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.5.

²²⁷ GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.4.

De esta manera, para el desarrollo de esta investigación se resumen varias situaciones, a diferentes condiciones de temperatura, intensidad de la fuente ultrasónica y el uso del agente limpiador (Tabla 7); tal como se puede apreciar la combinación del agente limpiador y la fuente ultrasónica por 10 minutos obtuvo un valor de recuperación de 95.2 %, lo cual se acentúa con el 56% logrado tan solo con el uso de la fuente ultrasónica.

Tabla 7. Resumen de los diferentes escenarios de aplicación de la tecnología.

Método	Contenido de aceite	Recuperación de aceite
Cortes aceitosos originales	16.5	-
Aceite recuperado a 33W por 10 minutos a 55°C	9.24	56.0
Aceite recuperado con 7.5 g/L de agente limpiador	3.92	76.2
Aceite recuperado con 7.5 g/L de agente limpiador a 55 °C	2.41	85.4
Aceite recuperado a 33W por 10 minutos con 7.5 g/L de agente limpiador	0.79	95.2

Fuente: Adaptado de GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.6.

Finalmente se demuestra que el uso correcto de esta tecnología combinada resulta en una remoción eficiente de los componentes orgánicos, pues se alcanzan contenidos de aceite de tan solo el 0.79% (Figura 17), bajo las condiciones de aplicación del agente BZ-CYJ en una porción de 7.5 g/L, a una temperatura de 55 °C, bajo una fuente ultrasónica de 33W por 10 minutos.

Figura 17. Cuttings antes y después del tratamiento.



Fuente: GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016. p.6.

4.10 REINYECCIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN (CRI)

Teniendo en cuenta lo referido por Svensen, T., & Taugbol, K.²²⁸, esta técnica consiste en disponer los cortes de perforación en el subsuelo mediante la inyección de los mismos a través de un pozo con esta finalidad; cabe señalar que esta técnica ha sido considerada como el procedimiento preferido por las compañías operadoras, debido al equilibrio que posee tanto en cuestiones económicas como ambientales.

Procedimiento

De acuerdo al trabajo de Geehan, T., Gilmour, A., Guo, Q.²²⁹ se sabe que para lograr la inyección requerida, se hace inmediatamente necesario adecuar los fragmentos de roca o “Cuttings”, cambiando sus propiedades con el fin de darles esta característica inyectable; de esta manera se procede a realizar una mezcla de los mismos con una porción de agua de mar, seguida de un proceso de trituración de los cortes a través de una unidad mecánica; además en algunos casos se suele añadir viscosificantes a la mezcla, obteniendo una “lechada viscosa” inyectable.

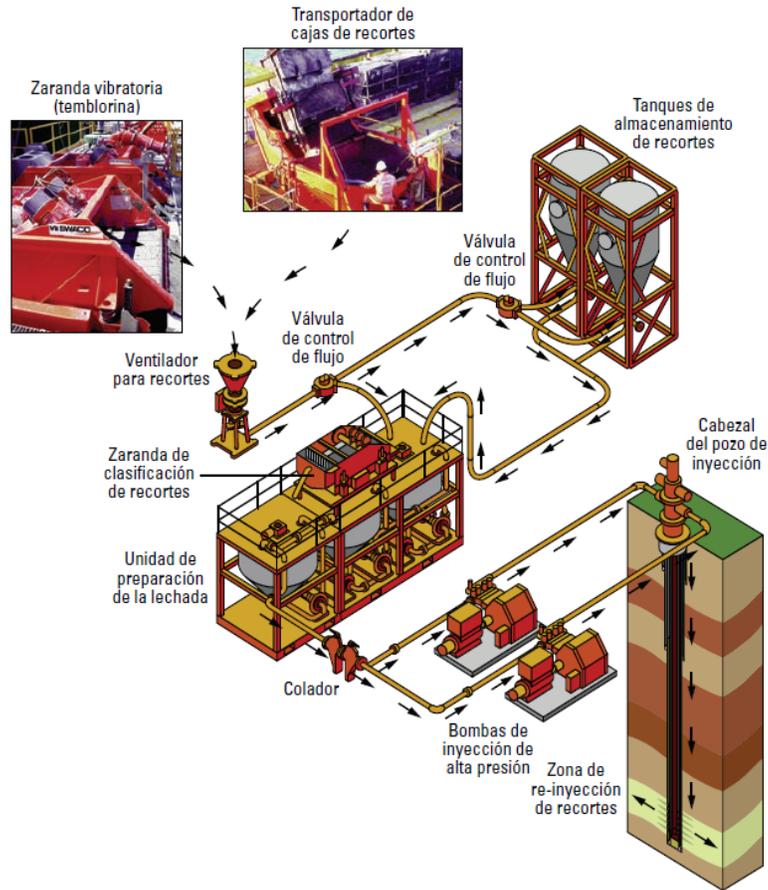
Este proceso de preparación posee según Geehan, T., Gilmour, A., & Guo, Q.²³⁰ una característica de circuito cerrado, de tal manera que los cortes son dirigidos desde el pozo hacia la unidad separadora de sólidos o Zaranda vibradora, de la cual son dirigidos mediante un sistema neumático hacia su almacenamiento en tanques o su desplazamiento directo hacia la unidad preparadora de la lechada. Una vez terminado el proceso de adecuación de la lechada de cortes, se procede a la inyección de los mismos a partir del uso de una serie de bombas de inyección de alta presión, con una gran potencia de trabajo (ver figura 18). Como se puede observar el sistema está diseñado para que se dé el procedimiento de una manera continua, de tal forma que los tiempos de disposición de cortes, sean tan breves como sea posible.

²²⁸ SVENSEN, T., & TAUGBOL, K.. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011. p. 4.

²²⁹ GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007 p. 63.

²³⁰ Ibid. p. 63-65.

Figura 18. Preparación de la lechada de inyección en un proceso CRI.

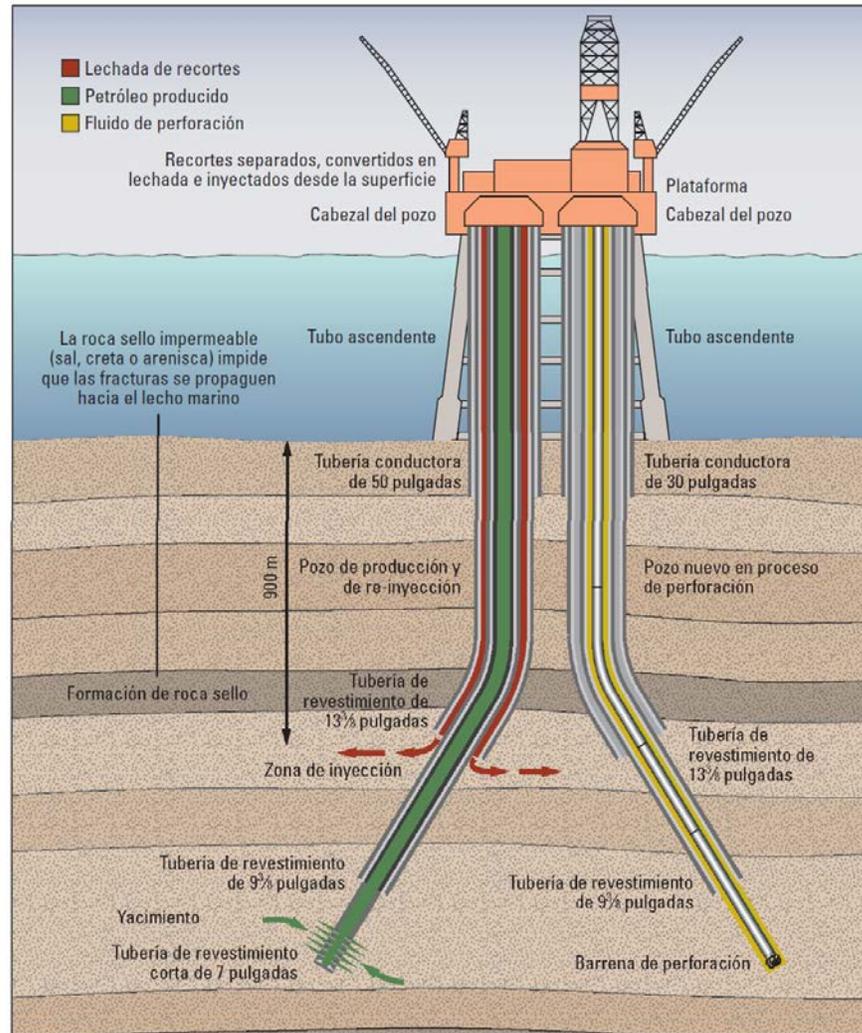


Fuente: GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007. p. 65.

Tal como es referido por Geehan, T., Gilmour, A., & Guo, Q.²³¹, una vez adecuada la mezcla de inyección, se procede al bombeo de la misma a través de un pozo dedicado a la eliminación de residuos (usualmente se hace uso de un pozo abandonado o cerrado) o por medio de la inyección a través del espacio anular existente entre la tubería de revestimiento y el tubing; usualmente este proceso se realiza a un presión tal, que se generan una serie de fracturas hidráulicas en la formación, de tal forma que el fluido quede dispuesto en dichas fracturas, las cuales por lo general se inducen por encima de la formación productiva (ver figura 19), con el objetivo de evitar cualquier posible comunicación entre estas dos capas de roca.

²³¹ GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007 p. 63-65.

Figura 19. Proceso de inyección de la lechada de cortes.



Fuente: GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007. p. 62.

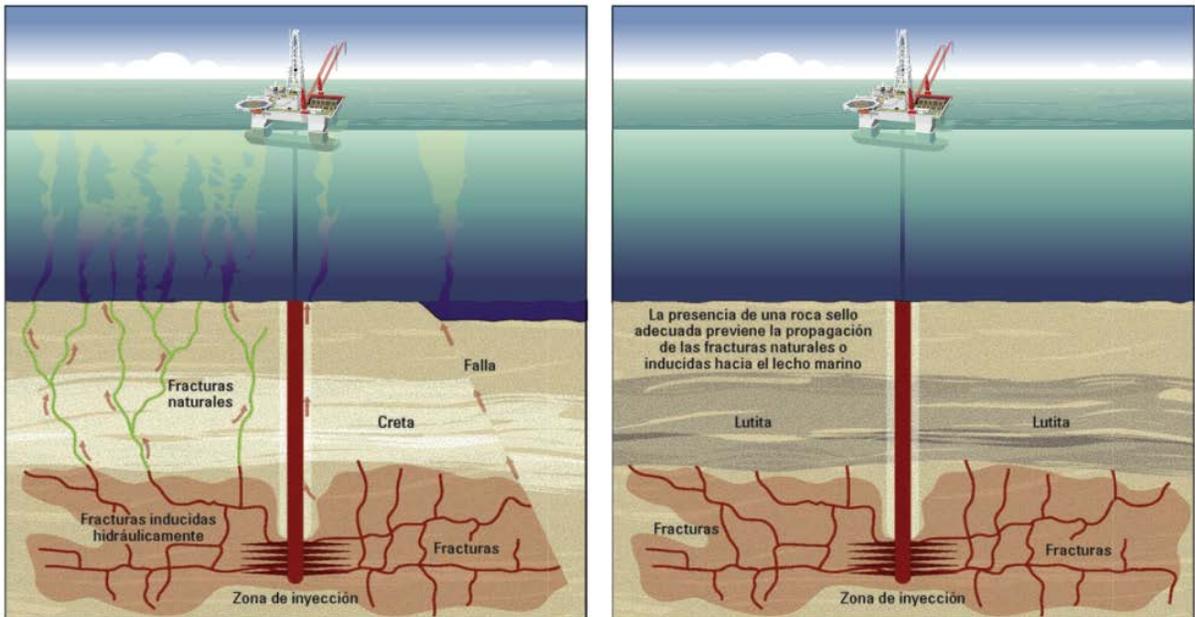
Riesgos

De acuerdo a lo expuesto por Geehan, T., Gilmour, A., & Guo, Q.²³² los riesgos de esta tecnología están usualmente relacionados con su aplicación en operaciones Off-shore, pues al involucrarse la generación de fracturas hidráulicas durante el proceso, existe la posibilidad de transmisión de los fluidos de inyección (Lechada de cortes) a través de la comunicación de las fracturas inducidas o naturales, lo cual podría causar la contaminación del lecho marino circundante. Este tipo de fallas

²³² GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007. p. 65.

operacionales, no solo representan un riesgo ambiental, sino que implica altos riesgos económicos, pues se aumenta los periodos de inactividad del pozo, el costo de remediación y el mantenimiento del pozo inyector. Este tipo de riesgo es controlado y minimizado cuando la inyección se propone realizar en aquellas formaciones anexas a una porción de roca sello, que impida la transmisión de las fracturas hidráulicas inducidas, además a través de este medio se garantiza la impermeabilidad de la zona en general.

Figura 20. Preparación de la lechada de inyección en un proceso CRI.



Fuente: GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007. p. 64.

4.10 NUEVAS TECNOLOGÍAS DE INYECCIÓN CRI

Los autores Bai, M., McLennan, J., Guo, Q., & Green, S.²³³, realizaron una serie de análisis enfocados a determinar la eficiencia de la aplicación de un método cíclico durante la inyección CRI, de tal manera que se tuviera un mayor control de la presión de inyección durante todo el proceso. Durante esta investigación se hizo uso del análisis a partir de simulaciones tridimensionales de fracturamiento hidráulico, la cual está diseñada para satisfacer los requerimientos especiales en las operaciones de Re-inyección; en particular la atención se centró en la identificación de las

²³³ BAI, M., MCLENNAN, J., GUO, Q., & GREEN, S. Cyclic injection modeling of cuttings re-injection American Rock Mechanics Association, 2006.p. 1-11.

diferentes respuestas de fractura durante los ciclos de pozo en “cierre” y en estado de “re-inyección”, con el fin de definir si dichas fracturas existentes en la roca, fueron abiertas o si se indujeron nuevas fracturas. Durante los análisis de simulación, los autores realizaron una serie de estudios de sensibilidad, variando de esta manera parámetros tales como: un número amplio de permeabilidades de roca, diferentes tipos de lechada, diferentes tasas de inyección y una serie de ambientes in situ de esfuerzo y estrés de roca. Finalmente se realizaron una serie análisis comparativos entre la inyección CRI convencional y la inyección CRI cíclica, con el objetivo de determinar la importancia de la reología de la lechada de inyección, la tasa de inyección, el nivel de filtración, la estructura de disposición de la lechada y la geometría de las fracturas hidráulicas inducidas bajo varios ambientes de análisis de esfuerzo.

Posteriormente los autores Shokanov, T., Still, V., Hernandez, E., Anokhin, V., Ovalle, A., & Fragachan, A.²³⁴, someten a consideración el balance existente entre el nivel de aplicabilidad de la inyección CRI como método de disposición de cortes y el riesgo asociado a la misma, representado en la posibilidad de la generación de una brecha de comunicación desde la formación de disposición y la superficie (operaciones On-Shore) o lecho marino (operaciones Of-Shore), la intersección de las fracturas generadas con las fallas naturales y la posibilidad de taponamiento del pozo a partir del flujo de lechada.

Considerando lo anterior, durante esta investigación (Shokanov, T., Still, V., Hernandez, E., Anokhin, V., Ovalle, A., & Fragachan, A)²³⁵ se plantea el uso tanto del monitoreo continuo de la operación de inyección como de la interpretación de la presión como mecanismos claves para lograr la mitigación de los riesgos asociados a esta operación, asegurando de esta manera la disminución de la probabilidad del posible impacto ambiental generado. Teniendo en cuenta que durante el proceso de inyección, la lechada induce una serie de sistemas complejos de fracturas en la roca, se hace necesario determinar la distribución y el dominio ocupado por el materia de desecho (lechada) en tiempo real, a través de la interpretación del comportamiento existente de las presiones. En este trabajo se presenta además la aplicación de este método de interpretación y monitoreo de las presiones en diferentes proyectos de inyección, en los cuales la caracterización del dominio ocupado a cierta profundidad junto a la interpretación de presiones ayuda a minimizar los posibles riesgos en superficie.

Cabe aclarar que esta investigación se realizó teniendo en cuenta que las operaciones de perforación eran de naturaleza Off-shore, a pesar de esto, se puede asegurar que tanto el riesgo inherente a la operación como la aplicación del

²³⁴ SHOKANOV, T., STILL, V., HERNANDEZ, E., ANOKHIN, V., OVALLE, A., & FRAGACHAN, A. Subsurface drilling waste injection: Real-time waste domain characterization using injection monitoring and pressure interpretation (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/114148-RU, 2008. p. 1-2.

²³⁵ Ibid. p. 1-10.

monitoreo e interpretación de presiones, existen en operaciones en tierra firme, de tal manera que los principios aplicados son los mismos.

La investigación anteriormente mencionada tuvo una gran relación con estudios posteriores de este campo, pues en 2009 Bartko, K., Al-Shobaili, Y., Gagnard, P., Warlick, M., & Ba Im, A.²³⁶ realizaron la implementación de una metodología similar, en la cual junto a la compañía Saudi Aramco se aplicó el método de inyección CRI para el desarrollo del campo “Manifa Field”; realizándose pues el continuo monitoreo de la operación de disposición de los cortes de perforación. Para asegurar la eficiencia del procedimiento se realizaron una serie de simulaciones, enfocadas a predecir el comportamiento de disposición de los cortes en las fracturas inducidas en el subsuelo, asegurando de esta manera la disposición correcta en la formación deseada. En general este estudio incluye la recopilación de la información y los factores que se tuvieron en cuenta durante el desarrollo de la prueba piloto en el campo “Manifa Field”, tal como son análisis geotécnicos del reservorio, así como el diseño de las facilidades de superficie.

Continuando con el desarrollo de la investigación de esta técnica de disposición de cortes, se plantea la inyección de la lechada en formaciones no permeables como los son la roca tipo Shale, para lo cual en 2011 Shokanov, T. A., & Ronderos, J. R.²³⁷ resaltaron la importancia de comprender la incertidumbres relacionadas a la disposición en fondo de la lechada inyectada, así como los efectos generados en el dominio de colocación perturbado (área creada por las fracturas inducidas hidráulicamente), dichos efectos pueden generar un daño ambiental considerable, si no son tomados en cuenta. En esta investigación se realiza una recopilación histórica de la evolución del concepto “dominio de disposición” en las formaciones tipo shale, además se analizan las presiones anómalas existentes en el desarrollo del proceso, concluyendo finalmente que la caracterización de la distribución de las fracturas en las rocas, posee una especial relevancia para mitigar los daños asociados a esta actividad.

²³⁶ BARTKO, K., AL-SHOBAILI, Y., GAGNARD, P., WARLICK, M., & BA IM, A. Drill cuttings re-injection (CRI) assessment for the manifa field: An environmentally safe and cost-effective drilling waste management strategy Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/126077-MS, 2009. p. 1-11.

²³⁷ SHOKANOV, T. A., & RONDEROS, J. R. Cuttings and waste injection, shale fracturing pressure decline, and domain mapping Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/147671-MS, 2011. p. 1-12

4.11 REINYECCIÓN CRI MEJORADA

La tecnología CRI más innovadora es aquella en la discutida en el trabajo titulado "Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field", de los autores J.C Rodríguez, L. Paredes, LM Sandoval, C. Oyatamari, M. Naranjo, A. Paladines, A. Romero, P. Lema y P. González, Schlumberger; M. Orozco y G. Ponce, Petroamazonas, pues presenta procedimientos previos a la mezcla de los cortes y preparación del "Slurry" de inyección, eliminando de esta manera los riesgos relacionados al método tradicional de carga, tratamiento y disposición en Off-Site.

Procedimiento

Esta técnica fue aplicada para disponer los cortes del campo Shushufindi, en la amazonia ecuatoriana (Figura 21), inyectando de esta manera 40378 barriles de lechada (Slurry), 15305 barriles de agua de desecho y 74136 barriles de agua de producción.

Figura 21. Localización del campo Shushufindi - Ecuador.



Fuente: J.C RODRÍGUEZ, L. PAREDES, LM SANDOVAL, C. OYATOMARI, M. NARANJO, A. PALADINES, A. ROMERO, P. LEMA Y P. GONZÁLEZ; M. OROZCO Y G. PONCE. Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field. Schlumberger, Petroamazonas. doi: 10.2118/184960-MS, 2017.p. 2.

El primer paso para la aplicación de esta tecnología según J.C Rodríguez, L. Paredes, Lm Sandoval, C. Oyatamari, M. Naranjo, A. Paladines, A. Romero, P. Lema Y P. González; M. Orozco Y G. Ponce²³⁸, es la selección de la formación en

²³⁸ J.C RODRÍGUEZ, L. PAREDES, LM SANDOVAL, C. OYATOMARI, M. NARANJO, A. PALADINES, A. ROMERO, P. LEMA Y P. GONZÁLEZ; M. OROZCO Y G. PONCE. Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field. Schlumberger, Petroamazonas. doi: 10.2118/184960-MS, 2017.p. 2.

la cual se va a disponer el residuo en forma de lechada, para lo cual se tienen en cuenta variables tales como la litología, la profundidad inicial del pozo, el gradiente de fractura y el módulo de Young. Para el caso de esta investigación se hizo un estudio geológico en la cuenta oriental Ecuatoriana, determinando que la formación objetivo (Formación Hollin) se encuentra en un anticlinal asimétrico de 1-2 grados con un espesor de 200 a 300 pies, una porosidad de 15-20% y un rango de permeabilidad de 300-1300mD. Posteriormente se hace necesario determinar los pozos que actuaran como inyectores, teniendo en cuenta que posean condiciones de integridad estables, características de casing funcionales y capacidad para llegar a la formación objetivo identificada con anterioridad, de esta manera para el caso de estudio fue escogido el pozo AGR-19D, que anteriormente producía desde una capa inferior a la formación hollin.

A medida que se da la inyección del "Slurry" en la formación, se da la necesidad de crear fracturas de disposición, mediante el aumento de la presión de fondo, de esta manera a profundidades desde los 5200 pies, usualmente se produce un fracturamiento con orientaciones verticales, a pesar de esto los mecanismos de fractura existentes depende de una serie de variables de la roca tales como las características de resistencia, la dirección de esfuerzos en la formación y la secuencia de inyección; estos factores operacionales determinan así si las fallas se dan de tipo simple o múltiple. A partir de lo anterior para la aplicación en el campo Shushufindi se realizó un modelaje del perfil de fractura con el fin de predecir su afectación y disposición. Por otra parte se realizaron una serie de estudios de balance de materia, con el fin de determinar el volumen de material a manejar, de esta manera se consideraron variaciones en el programa de perforación, que contemplaba por una parte la perforación de 60 pozos en tres años, mientras que por otra lado este número se reducía a 30 (tabla 8).

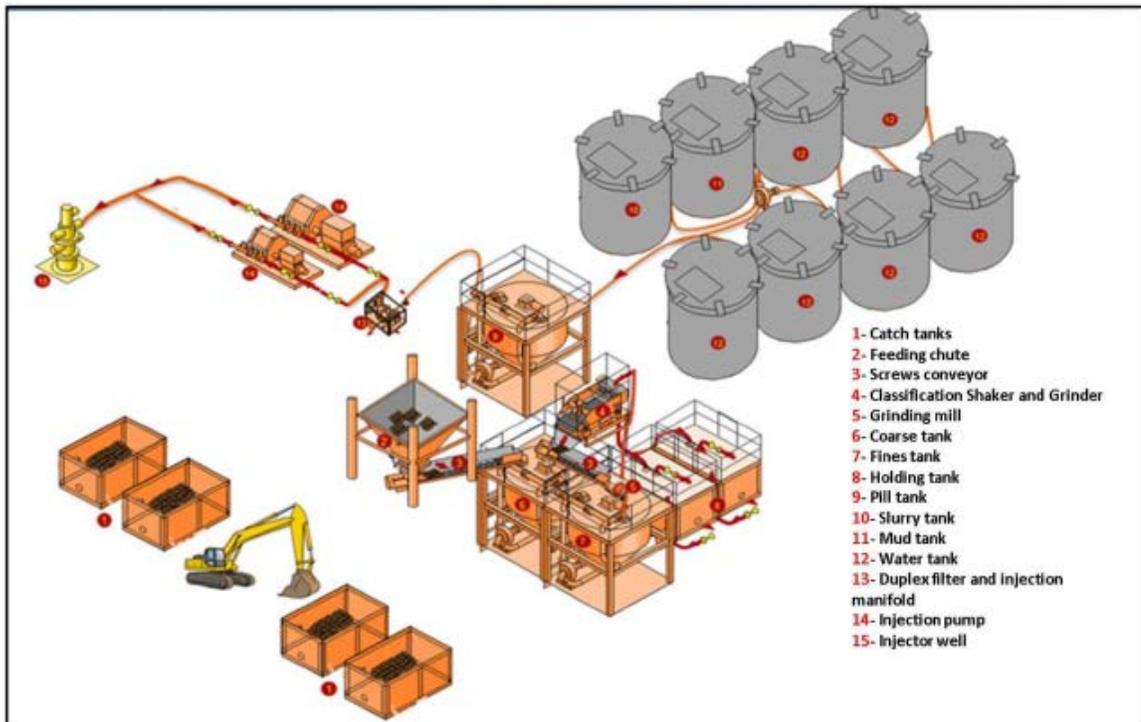
Tabla 8. Resultados del balance de materia, caso 1: 60 pozos y caso 2: 30 pozos.

Volúmenes calculados de desechos de perforación de sesenta pozos	
Volumen de cortes de un pozo, bbl	7.250
Máximo total acumulado de los pozos (2015-2017)	60
Volumen total de cortes para disponer, bbl	435000
Densidad promedio de los cortes, SG	1.56
Volumen total de agua añadir para alcanzar una lechada de 1.3 SG	452400
Volumen total de lechada, bbl	887400
Volumen calculado de desechos de perforación de treinta pozos	
Volumen de cortes de un pozo, bbl	7.250
Mínimo total acumulado de los pozos (2015-2016)	30
Volumen total de cortes para disponer, bbl	217500
Densidad promedio de los cortes, SG	1.56
Volumen total de agua añadir para alcanzar una lechada de 1.3 SG	226200
Volumen total de lechada, bbl	443700

Fuente: Adaptado de J.C RODRÍGUEZ, L. PAREDES, LM SANDOVAL, C. OYATOMARI, M. NARANJO, A. PALADINES, A. ROMERO, P. LEMA Y P. GONZÁLEZ; M. OROZCO Y G. PONCE. Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field. Schlumberger, Petroamazonas. doi: 10.2118/184960-MS, 2017.p. 8.

Por otra parte para el desarrollo de este sistema de inyección, se realizó el ensamblaje de los equipos para lograr un control de ciclo; en general se identifican tres secciones: el sistema de transporte de los cuttings, el sistema de mezclado de la lechada y el sistema de re inyección (Figura 22).

Figura 22. Sistema de re inyección de cortes - Campo Shushufindi.



Fuente: J.C RODRÍGUEZ, L. PAREDES, LM SANDOVAL, C. OYATOMARI, M. NARANJO, A. PALADINES, A. ROMERO, P. LEMA Y P. GONZÁLEZ; M. OROZCO Y G. PONCE. Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field. Schlumberger, Petroamazonas. doi: 10.2118/184960-MS, 2017.p. 9.

Con la aplicación de esta nueva tecnología, los autores J.C Rodríguez, L. Paredes, Lm Sandoval, C. Oyatomari, M. Naranjo, A. Paladines, A. Romero, P. Lema Y P. González; M. Orozco Y G. Ponce²³⁹ se dieron en su investigación los siguientes resultados:

- Se eliminó el uso de grandes áreas para disponer los cortes de perforación así como las aguas producidas durante la perforación.
- Se dio una reducción del 25% en los costos de perforación.
- Se redujo el almacenamiento de agua de producción en las facilidades de superficie, lo cual permitió un aumento en la producción de crudo.

²³⁹ J.C RODRÍGUEZ, L. PAREDES, LM SANDOVAL, C. OYATOMARI, M. NARANJO, A. PALADINES, A. ROMERO, P. LEMA Y P. GONZÁLEZ; M. OROZCO Y G. PONCE. Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field. Schlumberger, Petroamazonas. doi: 10.2118/184960-MS, 2017.p. 8.

4.12 TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN “ALL NATURAL PROCESS”

Tal como se refiere en el trabajo de Andrew R. Miles²⁴⁰, esta tecnología se centra en la aplicación de una bio-solución (All natural) a base de bacterias, que generan una remediación del contenido orgánico de los cortes a través de la mezcla del producto base (en forma de polvillo) con un volumen adecuado de agua, este procedimiento se realiza en el sitio donde se generan los cortes de perforación, mediante un circuito cerrado conectado directamente al tanque de almacenamiento de los residuos provenientes del taladro. Al tratarse una técnica ejecutada en sitio, se dan una serie de ventajas ambientales, así como económicas relacionadas a: (1) la eliminación de los medios para transportar los cortes a una diferente locación de tratamiento, (2) la eliminación de la necesidad de un foso para disponer los cortes en el suelo, y (3) la reducción del material agregado relacionado a la disposición de los cortes tratados.

Procedimiento

Según el estudio de Andrew R Miles²⁴¹, el sistema de tratamiento donde se da la mezcla de los cortes con una cantidad de la solución “all-Natural”, se encuentra conectado directamente a los tanques de almacenamiento de los cuttings provenientes del taladro; de esta manera a medida que se genera un volumen de residuo, el mismo es transportado a una cámara metálica donde se mezcla y se almacena con el agua necesaria así como con un volumen de material agregado a una relación de 1:1; una vez se da la remediación de la mezcla, esta puede ser reutilizada como material de relleno en las carreteras. Ahora bien, dentro de esta investigación se realizó el estudio comparativo de tres escenarios que vislumbran los casos de remediación más comunes: derrames de petróleo a pequeña y gran escala, y el tratamiento de los cortes de perforación en On-Site, de esta manera se realizaron una serie de contrastes en costos entre los métodos tradicionales, y la aplicación de la tecnología “All natural process”²⁴²:

Comparación #1 Remediación All Natural Vs el uso de sorbentes en un derrame pequeño: en esta situación se da el derrame de 5 galones de aceite de lubricación en el suelo en una locación; tradicionalmente cuando se da una situación de esta naturaleza se hace uso la aplicación de una remediación mediante un sorbente fortificado en nutrientes para contener el hidrocarburo, de esta manera dicho sorbente es cubierto con el suelo y dejado hasta que la bacteria consume la

²⁴⁰ ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017. p. 5.

²⁴¹ Ibid. p. 6.

²⁴² Ibid. p. 6.

contaminación; esta sustancia se vende naturalmente en empaques de 30 lb, justo lo necesario para la remediación del volumen del derrame a tratar. En contraposición tal como hace énfasis Andrew R Miles²⁴³, la aplicación de la solución “all Natural”, necesitara tan solo la mezcla de una tasa de material en polvillo con 5 galones de agua, para consumir y eliminar completamente el hidrocarburo en tan solo horas. De esta manera se realizó el análisis de costos para las dos aplicaciones (Tabla 9), mostrando un menor valor para el caso de esta nueva tecnología.

Tabla 9. Comparación de costos remediación All Naural vs uso de sorbentes para un derrame menor.

Comparación	Sorbente - Contenido y cobertura	Solución "All Natural"
Aplicación	1 bolsa de sorbente - \$34	Solución de 5 galones - \$ 14
Re - aplicación si se desea	\$0	\$14
Total	\$34	\$28

Fuente: Adaptado de ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017. p.7.

Comparación #2; Remediación All Natural vs la excavación y relleno para un derrame mayor: en este caso según Andrew R Miles²⁴⁴, se dan el derrame de 10 barriles de petróleo, que afecta un volumen de 100 y3 de suelo. Durante el manejo de un derrame de estas proporciones, usualmente se excava el terreno afectado para posteriormente llenarse con suelo limpio; el volumen afectado es tratado en una locación diferente al sitio del derrame. En contra posición, el principal beneficio de la técnica “All Natural” es que el suelo afectado puede ser restaurado completamente y por lo tanto no se hace necesario realizar una excavación y relleno, generando un valor mucho menor en los gastos relacionados (Tabla 10).

²⁴³ ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017. p. 6-7.

²⁴⁴ Ibid. p. 7.

Tabla 10. Comparación de costos Remediación All Natural vs Excavación y relleno para un derrame mayor

Comparación	Excavación y relleno	Remediación "all natural"
Contratista de primera respuesta	\$5000 (cuota de movilización)	\$5000 (cuota de movilización)
Contención del derrame	\$3500 (materiales)	\$3500 (materiales)
Excavación de 100 yd3 de suelo	\$5000 (maquinaria)	\$0 (no se requiere)
Aplicación inicial de solución	-	\$1175
Transporte/disposición - 100 yd3 de suelo	\$10000	\$0 (no se requiere)
Pruebas de la localización del derrame	\$5000	\$5000
Re - aplicación de la solución	-	\$1175 (si se requiere)
Compra de 100 yd3 de suelo para el relleno	\$2500	\$0 (no se requiere)
Relleno del suelo	\$5000 (maquinaria)	\$0 (no se requiere)
Reserva de responsabilidad ambiental	\$5000	\$0 (no se requiere)
Maquinaria para labrar el suelo	-	\$5000
Total	\$41000	\$20860

Fuente: Adaptado de ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017. p. 7.

Comparación # 3: Tratamiento en sitio All Natural vs transporte y disposición del residuo de perforación: para este escenario Andrew R Miles²⁴⁵ considera un proyecto de perforación que produce 500 y3 de cortes humectados de aceite; donde en el primer caso del uso tradicional de transporte y disposición, se involucra una serie de operaciones y costos relacionados a la generación de fosos, personal, transporte y equipamiento; lo cual además genera un mayor impacto ambiental durante su ejecución; en contra posición el uso de la técnica "All Natural" elimina estos factores, pues al tratarse de una operación en sitio, los residuos son descargados directamente del taladro a las cajas de almacenamiento, donde se da la mezcla de los cortes con agua fresca en una relación 1:1, de esta manera en la tabla 11 se puede observar que para esta nueva tecnología dichos valores son 0; resultando en un valor den dólares (US\$ 42500) mucho menor al mecanismo tradicional implementado (US\$132500).

²⁴⁵ ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017. p. 7-8.

Tabla 11. Comparación en costos del tratamiento "All Natural" vs el transporte y disposición tradicional.

Comparación	Transporte y disposición	Tratamiento y reciclado "all natural"
Pozo de reserva (apertura, mantenimiento, clausura)	\$50000	\$0 (no se requiere)
Construcción de una celda de contención (para el residuo reciclado)	-	\$5000
Transporte y disposición - 500 yds	\$37500	\$0
Bio tratamiento en sitio - 500 yd3	\$0	\$30000
Personal y maquinaria	\$15000	\$15000
Compra de 1000 yd3 de agregados nuevos	\$25000	\$0
Compra de 500 yd3 de agregados nuevos	\$0	\$12500
Prueba del material reciclado	\$0	\$5000
Crédito por 1000 yd3 de material reciclado	\$0	(\$25000)
Reserva de responsabilidad ambiental	\$5000	\$0
Total	\$132500	\$42500

Fuente: Adaptado de ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017. p. 8.

En los tres casos se dan unos costos menores para el uso de esta nueva tecnología, debido a su tipo de aplicación así como a su velocidad de tratamiento superior a los mecanismos tradicionales; este mecanismo de biorremediación mejorada se encuentra como base para el desarrollo de nueva tecnología basada en la selección de las bacterias adecuadas para el caso de consumo de material orgánico; lo cual generará una disminución no solo en costos, sino también en los impactos ambientales durante la perforación.

5. CAPITULO IV: COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS TRADICIONALES CON RESPECTO A LAS NUEVAS INVESTIGACIONES PARA EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

En este apartado se pretende realizar la comparación de las tecnologías tradicionales aplicadas internacionalmente para el tratamiento y disposición de cortes de perforación, teniendo en cuenta las investigaciones innovadoras desarrolladas a nivel internacional; para lograr este hecho se pretende realizar una clasificación de las tecnologías tratadas en los capítulos previos, en función del objetivo o enfoque principal de las mismas, de esta manera dichas tecnologías pueden ser subdivididas en dos categorías principales: aquellas tecnologías que están enfocadas en el tratamiento del contenido contaminante que saturan los cortes de perforación, representado por el contenido de material orgánico en los mismo y aquellas que se centran en el proceso de aislamiento o eliminación del material por completo.

Teniendo en cuenta la clasificación establecida, se ha de realizar la comparación entre las diferentes tecnologías, que permita resaltar los beneficios que representa la aplicación de las nuevas investigaciones a nivel de campo; para lograr esto, se pretende hacer el paralelo de las características de cada una de estas, de tal forma que para el sub grupo de aquellas enfocadas en el tratamiento, se presenta en primera instancia la efectividad de la técnica de tratamiento, representada de esta manera en el porcentaje remanente de materia orgánica después de realizado el proceso, por otro lado se compara el nivel de inversión o costo necesario para la tecnología; así como el tiempo promedio necesario para efectuar el procedimiento, teniendo en cuenta esto se presenta además las posibles ventajas y limitaciones presentes en cada una de dichas tecnologías.

Con respecto al subgrupo enfocado en la disposición de los cortes de perforación, se presenta la efectividad de las tecnologías de tratamiento, representada en el nivel de aislamiento o eliminación que proporcionan; por otro lado y teniendo en cuenta que en este tipo de procedimientos puede variar los costos generales, se muestra de una manera cualitativa las tendencias de las diferentes tecnologías en cuanto a este apartado; cabe mencionar que al ser técnicas enfocadas a la disposición, las mismas tendrán una serie de riesgos inherentes, que son presentados para cada una de estas. Finalmente se presentan las ventajas y limitaciones de cada uno de estos procedimientos, con el objetivo de resaltar los contextos de aplicación que brinden una mayor eficiencia a esta etapa del desarrollo y explotación de un pozo.

5.1 TECNOLOGÍAS ENFOCADAS EN EL TRATAMIENTO DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

Tabla 12: Recopilación de las tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cortes de perforación.

Tecnología de tratamiento	Efectividad (% remanente de materia orgánica)	Costos	Tiempo de tratamiento	Ventajas	Limitaciones	Fuente
<i>Biorremediación</i>	7-8	30-100 \$US/m3	6 meses a 5 años	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Facilidad en aplicación ✓ Buena relación Costo-eficiencia ✓ Posibilidad de aplicar en sitio ✓ Disponibilidad de aplicación 	<ul style="list-style-type: none"> • A bajas temperaturas la biorremediación es lenta. • La limpieza en genera solo puede ser efectuada si la matriz de la roca impide el contacto microorganismo – corte de perforación. • Altas concentraciones de peróxido de hidrogeno (>100 ppm) pueden disminuir la actividad microbiana • La circulación de los fluidos a través del medio poroso puede incrementar la acción de los contaminantes. • El tiempo requerido para el tratamiento está entre 6 meses a 5años. 	<p>LADOUSSE, A., TALLEC, C., CHAINEAU, C., & VIDALIE, J. F. Landfarming of drill cuttings Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/35879-MS, 1996.</p> <p>CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011.</p>
<i>Bio venteo</i>	5-7	500-522 \$US/m3	5 meses a 4 años	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estimulación del proceso de degradación. ✓ Disponibilidad de aplicación. ✓ Es relativamente fácil de adaptar en sitio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Un bajo contenido de humedad de los cortes puede limitar el proceso de degradación, y por tanto su eficacia. • Una baja temperatura puede retardar en general el proceso. 	<p>CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011.</p>

(Continuación Tabla 12)

					<ul style="list-style-type: none"> • El monitoreo de gases en facilidades de superficie añade cierta complejidad al procedimiento. 	de Ingenierías Físicoquímicas, 2011.
<i>Biopilas</i>	6-8	130-260 \$US/m3	1 a 12 meses	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Posee una gran utilidad cuando la sustancia contaminante tiene tendencias a la volatilización. ✓ Se acelera el proceso de convención de biorremediación. ✓ Permite realizar el monitoreo del proceso, Permite recolectar los posibles lixiviados del contaminante 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere la excavación de una porción de suelos considerable. • Los procedimientos en general causan un desajuste estético en los terrenos en los cuales son practicados. • Se deben realizar una serie de pruebas de trazabilidad, con el fin de determinar las tasas de degradación óptimas. 	CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011.
<i>Oxidación química</i>	8-10 (Reducción del 90% del contaminante)	Moderado	1 a 2 horas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Su tiempo de tratamiento es relativamente bajo. ✓ Esta tecnología es capaz de minimizar la toxicidad de los cortes de perforación. ✓ Esta técnica puede ser utilizada además para el tratamiento de los suelos contaminados 	<ul style="list-style-type: none"> • Las propiedades del suelo a tratar tales como: Temperatura, pH y grado de penetración del contaminante determinana la eficiencia general del proceso. • El nivel de vertimiento del contaminante en el suelo esta sujeto a la aplicabilidad del proceso. • El alto riesgo asociado a la manipulación de grandes cantidades de agentes implementados en el tratamiento. • Alto factor económico involucrado, procedente de la naturaleza de los agentes químicos utilizados. 	CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011.

(Continuación Tabla 12)

<i>Desorción térmica</i>	<1	Planta de desorción térmica de 3 a 10 ton/h: \$3 a 5 millones de dólares	Proceso Continuo	<ul style="list-style-type: none">✓ Remueve fácilmente hidrocarburos livianos, aromáticos y otros compuestos orgánicos volátiles.✓ Remoción eficiente de aceite contenido en los cortes.✓ Remoción del contenido orgánico menor al 1%.✓ Reducción de emisiones relacionadas al uso de camiones o equipos de transporte de cortes.✓ Cumple con las regulaciones exigidas para la disposición en off-shore	<ul style="list-style-type: none">• La remoción de hidrocarburos como aromáticos cíclicos se dificulta.• Genera subproductos como sólidos, condensados de agua y aceite.• Tiene un alto costo de tratamiento.• Su aplicación requiere la instalación de una plata de tratamiento.• Alta nivel de gasto de energía.	ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. Drilling Waste Management Information System [en línea], [citado agosto 23, 2017]. Disponible de World Wide Web: < http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/thermal/index.cfm >. SCHLUMBERGER. Thermal Desorption Technologies. p. 1-4.

(Continuación Tabla 12)

<p><i>Pirólisis</i></p>	<p>1-5</p>	<p>Alto (300 a 1600 °C)</p>	<p>Proceso Continuo</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Posee un alto porcentaje de remoción. ✓ Los gases no condensables generados pueden ser aprovechados para la generación de energía eléctrica. ✓ Parte del residuo sólido del proceso puede ser usado como material para hornos. ✓ Las emisiones atmosféricas son menores con respecto a la incineración 	<ul style="list-style-type: none"> • El líquido piroleñoso obtenido es altamente corrosivo y contaminante. • Tiene un alto costo de tratamiento. • Se maneja un alto nivel de temperaturas. • Se hace necesario el uso de grandes cantidades de energía. • Requiere la instalación de una planta destinada a este fin. • Se hace necesario el uso de combustible o electricidad para alimentar a la fuente de calor 	<p>SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS,</p>
<p><i>Gasificación</i></p>	<p>1-2</p>	<p>Alto (850°C)</p>	<p>Proceso Continuo</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uno de los subproductos Syngas. ✓ El gas generado puede ser usado para la generación de energía eléctrica, mecánica o en forma de calor. ✓ Mediante este proceso se puede obtener materia prima como combustibles sintéticos, metanol, etanol y otros químicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un alto nivel de temperatura para su funcionamiento (850°C). • La viabilidad de generación de syngas es tan solo posible usando oxígeno puro. • Los gasificadores para la producción de syngas tienen un alto costo y requieren unidades especiales para su limpieza. • El residuo a tratar debe ser limpiado previamente 	<p>SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS,</p>

(Continuación Tabla 12)

<p><i>Gasificación asistida con plasma</i></p>	<p><1</p>	<p>Alto (3000°C)</p>	<p>Proceso Continuo</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓Las altas temperaturas permite la destrucción completa del alquitrán. ✓Permite la conversión de materiales densos en gas sintético. ✓El Syngas producido puede ser utilizado como el gas natural, por lo cual puede ser aplicado en la generación de energía, ✓Los compuestos resultantes de sílice puede ser re utilizados como material base para las construcciones civiles. ✓La alimentación puede ser mezclada con residuos municipales, llantas, residuos peligroso, entre otros 	<ul style="list-style-type: none"> • El gasto energético es considerable. • Se hace necesario alcanzar temperaturas muy altas para que se del proceso. • Las facilidades necesarias para la operación son muy costosas. • Requiere el uso de una gran cantidad de energía eléctrica en la entrada. 	<p>SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS,</p>
<p><i>Tratamiento mediante una fuente Microondas</i></p>	<p><1 (En el mejor caso 0.1%)</p>	<p>Consumo de energía 70-100kWh por tonelada</p>	<p>Proceso Continuo (500 Kg/h)(Fuente de microondas de 30kWh)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓Esta tecnología es capaz de alcanzar valores de material remantes menores al 1%. ✓Los impactos generados durante el proceso son menores. ✓Puede ser aplicado a escala de campo en off-shore. ✓La tasa de alimentación del proceso es variable, siendo además un proceso continuo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene un gasto considerable de energía durante el proceso (70-100KWh), • Su aplicación solo ha sido aplicada a escala de laboratorio y piloto 	<p>ROBINSON, J., KINGMAN, S., SNAPE, C. E., BRADLEY, M., BRADSHAW, S., THOMAS, D. J. M., & PAGE, P. W. Microwave treatment of oil-contaminated drill cuttings at pilot scale Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111637-MS, 2008.</p>

(Continuación Tabla 12)

				<p>✓Es posible recuperar el aceite contenido de los cortes de perforación, así como el lodo de perforación.</p>		
<p><i>Tratamiento mediante el uso de una nano emulsión</i></p>	<1	<p>Muy Alto (Debido al uso de nanoemulsiones)</p>	<p>Proceso Continuo</p>	<p>✓Puede alcanzar una disminución menor al 1% de contenido orgánico remanente en los cortes.</p> <p>✓No se requieren altas concentraciones de emulsión.</p> <p>✓Puede usarse a bajas temperaturas (25°C).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La aplicación de esta tecnología está fuertemente influenciada por su alto coste. • El uso de nanopartículas limita la aplicación de este método a escala de campo. • El proceso de tratamiento posee una alta complejidad técnica. 	<p>SAPHANUCHART, W., LOKE, Y. S., & SEE, C. H. Nanoemulsion-enhanced treatment of oil-contaminated oil-based drill solids Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/162401-MS, 2013.</p>
<p><i>Descontaminación mediante un secador microondas continuo</i></p>	0.1-2.7 (250-500Kg/h)	<p>Moderado Consumo de energía 0.12 a 0.34 KWh/Kg</p>	<p>Proceso Continuo (250-500Kg/h)</p>	<p>✓Bajo condiciones de flujo menores a 300 Kg/h puede llegar a alcanzar valores de 0.1% de materia orgánica remanente.</p> <p>✓El proceso se da de una manera continua, Permite la variación en la alimentación de cortes hacia la unidad.</p> <p>✓El rango de temperaturas aplicado es relativamente</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La reducción del contenido orgánico en los cortes depende en gran medida de la tasa de alimentación de la unidad. • Requiere la instalación de unidad especializada. 	<p>I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras.</p>

				bajo con respecto a los métodos térmicos tradicionales		doi: 10.4043/26335-MS, 2015.
<i>Combinación de un agente limpiador sintetizado con tecnología ultrasónica</i>	0.79	Bajo	Proceso semi continuo (10 minutos aproximadamente)	<p>✓Alcanza valores de contenido remante de materia orgánica de hasta 0.79%.</p> <p>✓Su costo es relativamente bajo con respecto a otras técnicas de tratamiento.</p> <p>✓El aceite que recuperado de los cortes puede ser re utilizado en lodos base aceite.</p> <p>✓El agente limpiador así como el agua pueden ser re utilizados ajustando el pH a neutral.</p> <p>✓No se requieren altas dosis de agente limpiador (7.5 g/L).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere la aplicación de una fuente microondas por cierto periodo de tiempo. • Requiere la instalación de un equipo especializado. 	<p>GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016.</p>

(Continuación Tabla 12)

<p>Tecnología de remediación "all natural"</p>	<p><1</p>	<p>42500 US\$ para el tratamiento de 500 yd3</p>	<p>Proceso Continuo</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓Posee un costo relativamente bajo de tratamiento de cortes. ✓No requiere el uso de medios de transporte de los cortes ya que se realiza en sitio. ✓No requiere la excavación de un pozo para disponer los residuos. ✓Reduce los impactos generados debido al transporte del material. ✓Al ser un proceso continuo realizado en sitio se reducen riesgos logísticos en la operación. ✓Aumenta la eficiencia de las bacterias que actúan durante la remediación. ✓Puede ser utilizado para remediar derrames de hidrocarburos en el suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere la contrición de una celda de contención. • Requiere la mezcla 1:1 de la solución con agua. 	<p>ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017. p. 8.</p>
--	--------------	--	-------------------------	--	---	---

Fuente: elaboración propia, basado en los documentos relacionados.

A partir de la tabla anterior se puede observar el paralelo de las diferentes técnicas usadas para la reducción del contenido orgánico que saturan los cortes de perforación, de tal forma que en una primera instancia se hace notable el aumento de eficiencia que presentan las nuevas investigaciones con respecto a las tecnologías tradicionales aplicadas.

Tal como se puede apreciar, los métodos basados en la remediación biológica del material, muestran un porcentaje remanente de contenido orgánico de alrededor 6-8% después del proceso, variando dependiendo de la tecnología implementada (biorremediación, bio venteo o biopilas); cabe mencionar que dicho valor se encuentra sujeto a factores como la eficiencia del método aplicado, el tiempo del proceso y condiciones de los cuttings a tratar. Por otro lado, otra técnica tradicional aplicada a nivel de campo es de tipo químico, más específicamente la que hace uso de la oxidación del material contaminante de los residuos de perforación, la cual puede alcanzar valores de 8 a 10% de contenido remanente, con unos periodos de tratamiento relativamente cortos. Las tecnologías mencionadas con anterioridad comprenden la gran mayoría de procesos aplicados actualmente en la industria, los cuales tal como se puede observar no logran una reducción eficaz de los contaminantes en los cortes de perforación; a pesar de este hecho se puede decir que su aplicación se ve enfocada a campos donde las regulaciones ambientales son menos estrictas o aquellos que no pertenecen a áreas sensibles, tal como lo son gran parte de las operaciones On-Shore.

Ahora bien, el aumento de efectividad de remoción de la materia orgánica se hace especialmente importante en operaciones de perforación ejecutadas en zonas con una sensibilidad ambiental considerable, tal como son las operaciones costa afuera, en las cuales se hace necesario la reducción de este contenido saturante de los residuos sólidos de perforación; a partir de este hecho se han desarrollado investigaciones encaminadas a este propósito.

Por una parte las tecnologías que hacen uso del aumento de la temperatura para lograr la disminución de la presencia de contaminantes en los cortes, tales como la desorción térmica, la pirolisis, la gasificación y la gasificación asistida con plasma, se caracterizan por poseer una eficiencia alta, alcanzando valores de remanencia menores al 1%, a pesar de esto, tienen unos altos costos de tratamiento, debido principalmente a las altas temperaturas necesarias para cada uno de estos procesos, cabe mencionar además que dichas técnicas están desarrolladas con el objetivo de mantener un proceso de tratamiento continuo, que no necesite la aplicación de periodos de tratamiento extensos.

Ahora bien, respecto a las investigaciones más innovadoras para el tratamiento de cortes, que se encuentran en estado de investigación, se puede observar que tienen la tendencia de alcanzar un equilibrio entre la eficiencia de tratamiento y el costo general del mismo, conservando además la característica de un proceso continuo para el tratamiento; cabe aclarar que para este hecho se encuentra una excepción,

tal como lo es el tratamiento basado en la aplicación de una nano emulsión, tecnología que posee una eficiencia considerable, con unos costos de operación muy altos para ser aplicada eficientemente en escala de campo. Teniendo en cuenta lo anterior, las demás investigaciones de las tecnologías enfocadas al tratamiento alcanzan eficiencias de remoción altas, llegando de esta manera a un contenido remanente de materia orgánica menor al 1% después del proceso, existiendo casos donde esta variación alcanza niveles mínimos de hasta el 0.1% para tecnologías basadas en la aplicación de una fuente microondas como mecanismo de tratamiento.

Todas las investigaciones mencionadas, posee un facilidad técnica relativamente simple de aplicar, por lo cual su implementación a una mayor escala posee altos índices de factibilidad, teniendo presente la excepción mencionada anteriormente. Ahora bien, a pesar de que todas estas tecnología investigadas están enfocadas a reducir los costos de tratamiento, existen dos que destacan particularmente por los bajos costos implicados en el proceso; en primera instancia se encuentra la aplicación de la tecnología de remediación “all natural”, la cual a través de la investigación efectuada por los autores demostró poseer una balance costo efectividad resaltante con respecto a los métodos tradicionales de remediación, además de ser utilizable para el tratamiento de los vertimientos de hidrocarburos en el suelo; y finalmente la tecnología basada en la combinación de una agente limpiador sintetizado con una fuente ultrasónica, la cual alcanza valores remanencia de 0.79%, con un costo de tratamiento bastante bajo y de una manera continua.

Cabe añadir, que al realizar la comparación de cada una tecnologías existentes e investigadas, se hace notable que cada una de ellas posee sus ventajas y limitaciones, haciendo que la implementación de una de ellas implique un escenario particular, por lo cual considerando las características y necesidades de los pozos, puede hacer que la aplicación de una tecnología específica tenga una mayor eficiencia con respecto a las demás.

5.1.1 Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cuttings

Teniendo en cuenta la necesidad de realizar la comparación de las diferentes tecnologías aplicadas para el tratamiento de los cortes de perforación, se presenta una tabla de ponderación que considera parámetros generalizados para las diferentes tecnologías tratadas a lo largo de este trabajo, en este caso en específico para aquellas enfocadas en el tratamiento o disminución del contenido contaminante saturando los cortes de perforación; de esta manera se tienen en cuenta factores, tales como la eficiencia de tratamiento, costos de aplicación y tiempo de proceso; siendo estos los más relevantes dentro del conjunto de los demás parámetros en la tabla. A partir de esto se muestra un valor de importancia con base a su peso en el proceso de tratamiento; con el fin de dar realizar la ponderación de cada una de las tecnologías referida.

El conjunto de parámetros evaluados son compartidos por todas las tecnologías a comparar, además su selección se dio con base a las diferentes investigaciones del tema, a partir de esto se muestra una valoración de 1 a 10 para cada uno de estos factores dentro de las diferentes tecnologías, evidenciando los apartados resaltables de cada una, así como sus limitaciones. Se muestra además, la ponderación de estos valores, con respecto a los factores mencionados, evidenciándose las ventajas de las nuevas tecnologías para el tratamiento de los cortes de perforación con respecto a las demás.

A partir de los valores de ponderación se presenta una serie de rango donde pueden ser posicionadas las tecnologías evaluadas, tal como se muestra a continuación:

Tabla 13: Rangos clasificatorios tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cortes de perforación.

Nivel de aplicabilidad bajo	<330
Nivel de aplicabilidad moderado	330-400
Alto nivel de aplicabilidad	>400

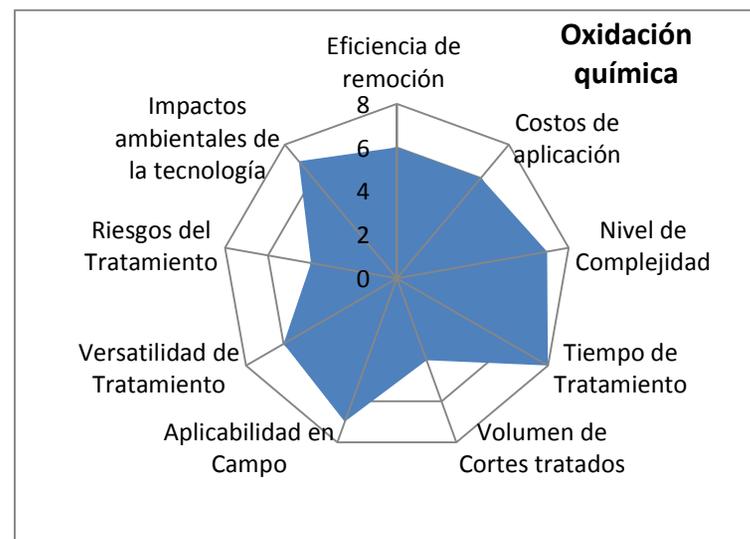
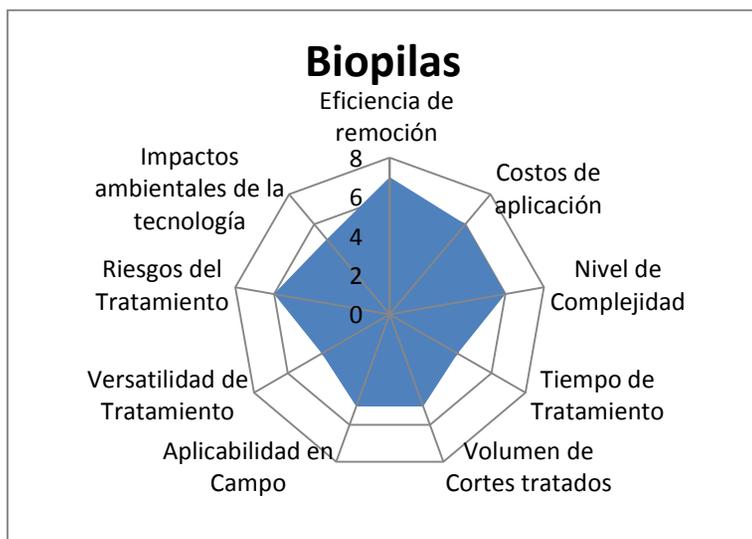
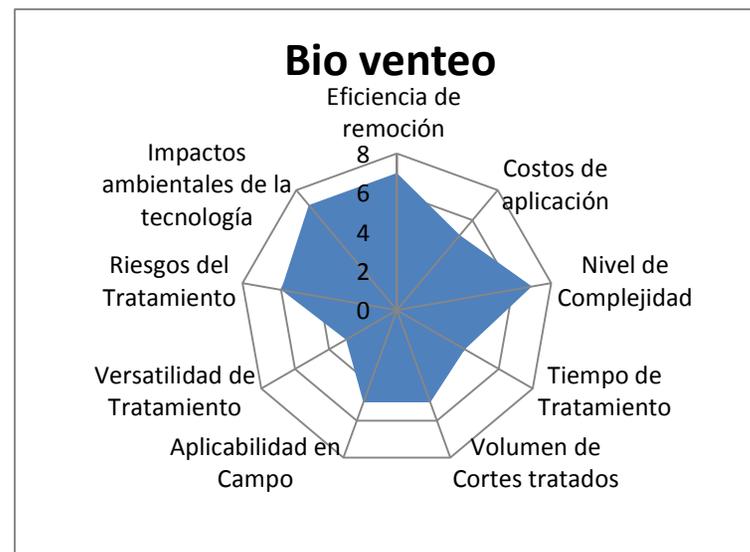
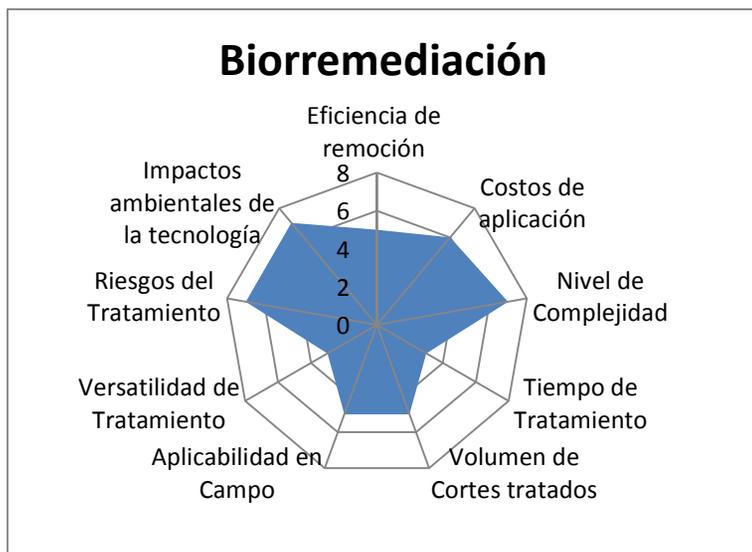
Fuente: elaboración propia.

Mediante esta tabla de clasificación se puede evidenciar que las nuevas tecnologías demuestran a partir de la evaluación por ponderación ventajas considerables con respecto a los métodos tradicionales, existiendo aquellas que resaltan durante esta evaluación, este hecho se puede evidenciar aun mas fácilmente a partir de los gráficos que preceden.

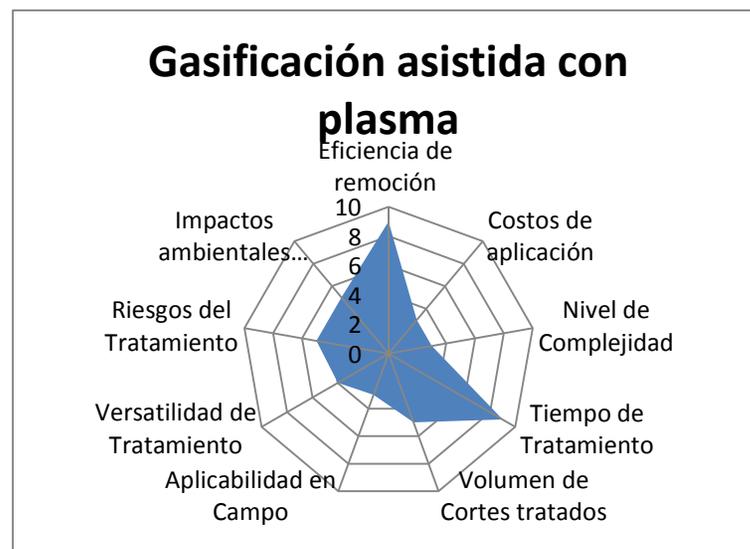
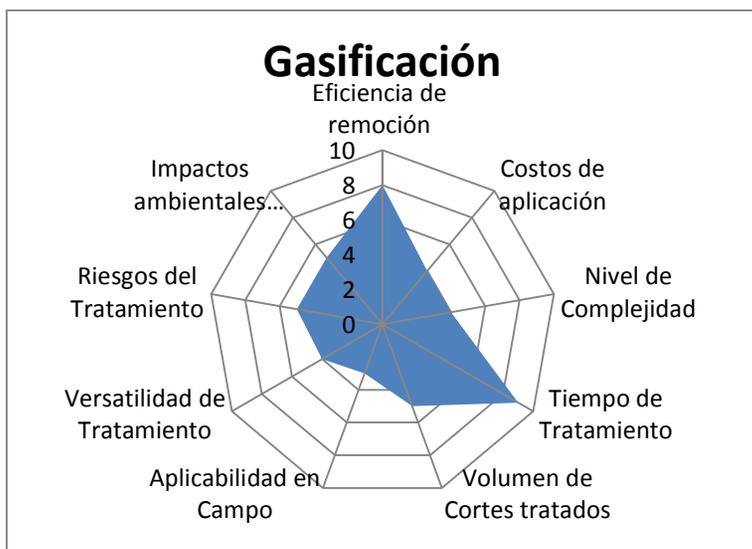
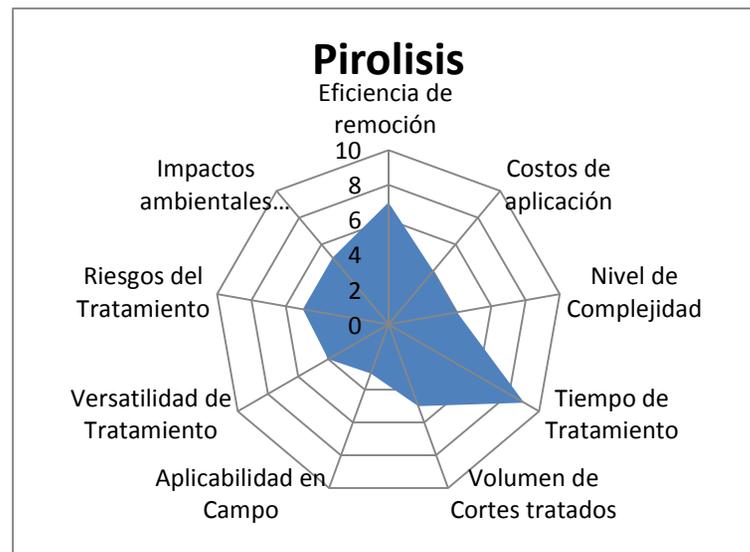
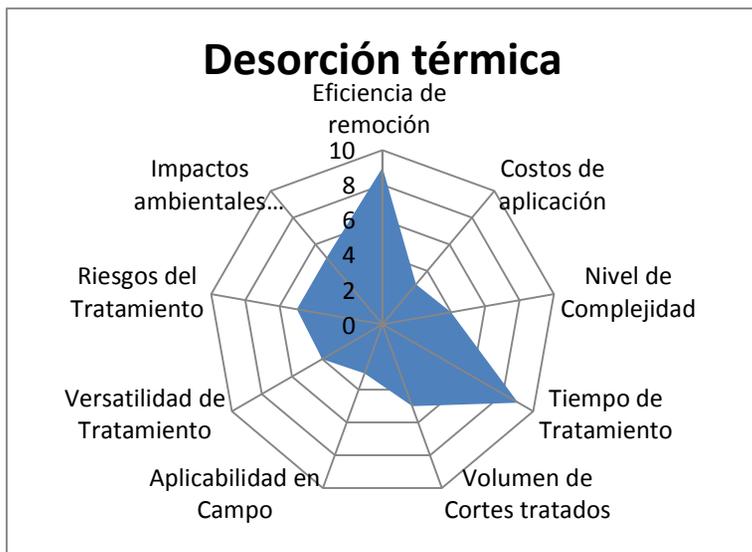
Tabla 14: Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cuttings.

Factores		Tecnologías												
Descripción	Peso	Biorremediación	Bio venteo	Biopilas	Oxidación química	Desorción térmica	Pirólisis	Gasificación	Gasificación asistida con plasma	Tratamiento mediante una fuente Microondas	Tratamiento mediante el uso de una nano emulsión	Descontaminación mediante un secador microondas continuo	Combinación de un agente limpiador sintetizado con tecnología ultrasónica	Tecnología de remediación "all natural"
Eficiencia de remoción	10	5	7	7	6	9	7	8	9	9	10	9	9	9
Costos de aplicación	10	6	5	6	6	3	4	4	3	7	1	7	9	8
Nivel de Complejidad	6	7	7	6	7	4	4	4	3	7	2	7	8	8
Tiempo de Tratamiento	7	3	4	4	8	9	9	9	9	9	9	9	9	8
Volumen de Cortes tratados	5	5	5	5	4	5	5	5	5	6	6	6	6	8
Aplicabilidad en Campo	6	5	5	5	7	3	3	3	3	7	1	7	8	9
Versatilidad de Tratamiento	5	3	3	4	6	4	4	4	4	7	2	7	8	8
Riesgos del Tratamiento	7	7	6	6	4	5	5	5	5	8	7	8	8	8
Impactos ambientales de la tecnología	6	7	7	5	7	5	5	5	5	7	7	8	7	8
Total Ponderación		334	344	341	380	335	325	335	329	470	322	476	507	512

Figura 23: Graficos Radiales – Tecnologías enfocadas en el tratamiento de los cortes de perforación.

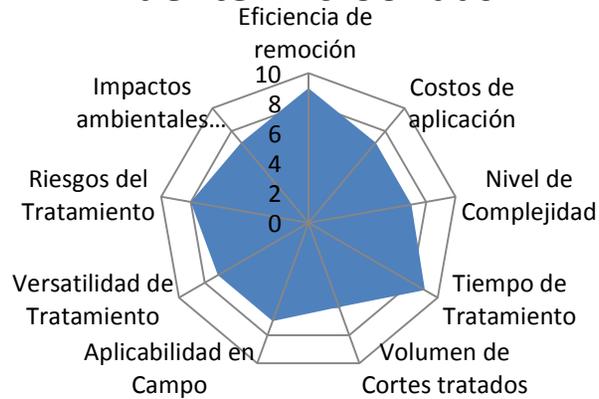


(Continuación Figura 23)

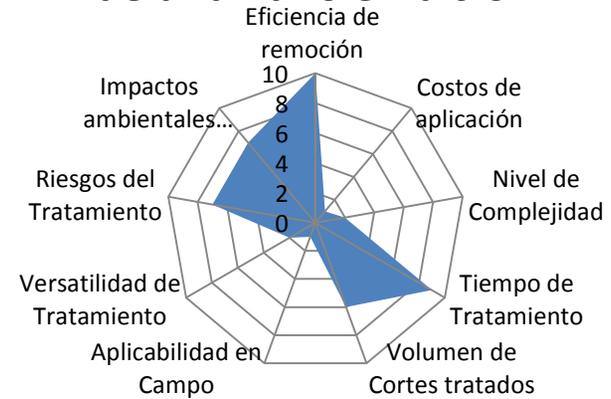


(Continuación Figura 23)

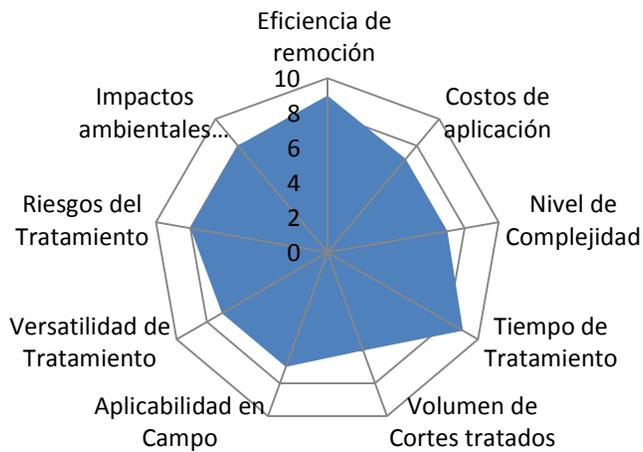
Tratamiento mediante una fuente Microondas



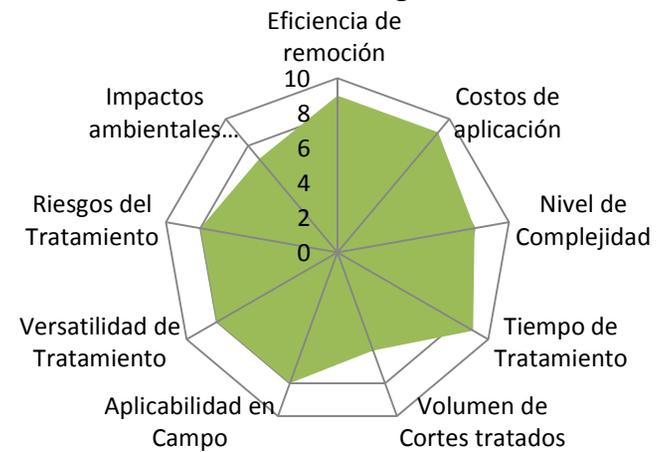
Tratamiento mediante el uso de una nano emulsión



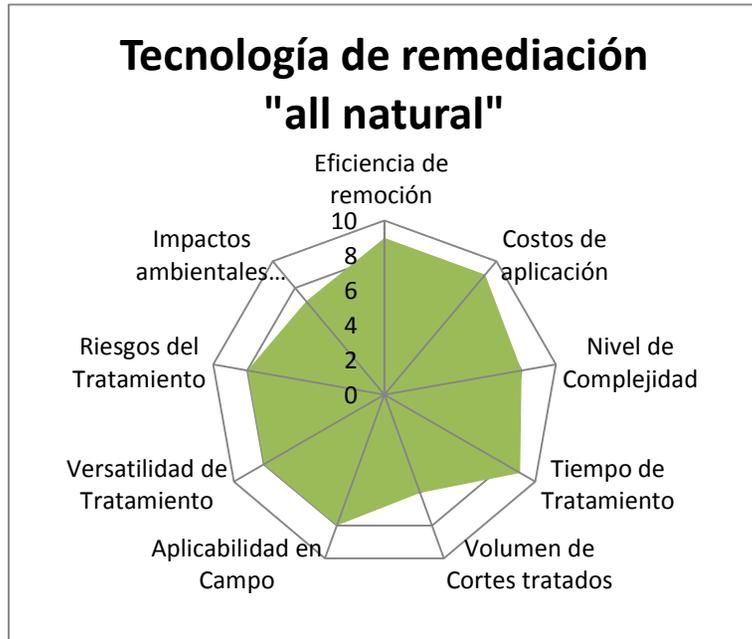
Descontaminación mediante un secador microondas continuo



Combinación de un agente limpiador sintetizado con tecnología ultrasónica



(Continuación Figura 23)



Mediante este método de comparación, se hace evidente los beneficios que representan algunas de las nuevas tecnologías investigadas, teniendo en cuenta que se evaluó en general su aplicación a escala de campo. En primera instancia se hace notable por una parte la valoración correspondiente a las tecnologías basadas en la remediación del contenido orgánico de los cortes, las cuales presentan resultados similares, variando en función a la diferencia que presenta con respecto al método tradicional de biorremediación, demostrando además resultados relativamente bajos con respecto las nuevas tecnologías de tratamiento investigadas.

Por otra parte, con respecto a las tecnologías basadas en un aumento de temperatura para realizar la descomposición del material contaminante, tales como la desorción térmica, pirolisis, gasificación y gasificación asistida con plasma, presentan una tendencia similar, con una variación mínima en el resultado de la ponderación, este hecho se explica principalmente debido a la naturaleza técnica de su aplicación, así como los posibles impactos y riesgos que se encuentran presentes en estas tecnologías, además de su versatilidad y capacidad de aplicación en campo.

Ahora bien, con respecto a las tecnologías investigadas con un carácter más novedoso, se hace notable que las mismas presentan valores relativamente altos con respecto las tecnologías tradicionales, existiendo una excepción dentro de dicha valoración, referente a la técnica de tratamiento de los cortes de perforación mediante una nano emulsión, la cual a pesar de mostrar una eficiencia de remoción superior con respecto a las demás tecnologías, presenta unos costos de aplicación, así como un nivel de complejidad demasiado altos para ser llevada a escala de campo, además de su baja versatilidad de proceso.

Teniendo en cuenta la anterior matriz de ponderación, se puede concluir que los valores más altos corresponden a las nuevas tecnologías investigadas, referentes a la combinación de un agente limpiador sintetizado con una fuente microondas, así como la tecnología de remediación “all natural”, las cuales a partir de las investigaciones realizadas presentan resultados sobresalientes en la mayoría de parámetros, entre los cuales resaltan la eficiencia del proceso, el costo de aplicación y su facilidad de aplicación a escala de campo, además de su bajo nivel de complejidad. Estas técnicas comparten además, un enfoque al mejoramiento de la relación costo – eficiencia, de tal forma que demuestran un potencial latente con respecto a las técnicas implementadas actualmente para realizar el tratamiento de los cortes de perforación, manteniendo en simultaneo un proceso técnico relativamente sencillo.

5.2 TECNOLOGÍAS ENFOCADAS AL AISLAMIENTO/ELIMINACIÓN DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

Tabla 15: Recopilación de las tecnologías enfocadas al aislamiento/eliminación de los cortes de perforación.

<i>Tecnología de tratamiento</i>	<i>Efectividad (Nivel de aislamiento/eliminación)</i>	<i>Costos</i>	<i>Riesgos</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>	<i>Fuente</i>
<i>Estabilización con cal viva</i>	Bajo a Moderado	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ○ Riesgos asociados a la salud humana: la cal viva es un compuesto peligroso que puede causar quemaduras a la piel, los ojos y el aparato respiratorio. ○ Posee riesgos ambientales relacionados a su disposición o derrame, los cuales pueden afectar al agua o al suelo; aumentando de esta manera su pH 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Este procedimiento es efectivo con cortes base agua y con pequeñas cantidades de contenido de aceite. ✓ Su costo es relativamente moderado con respecto a otras técnicas de disposición. ✓ Su correcta aplicación permite la estabilización de los contaminantes saturados con bajos contenidos de aceite. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una efectividad limitada para los cortes base aceite, debido a su inestabilidad con el tiempo. • La aplicación de esta técnica en cortes base aceite puede producir lixiviados. • Se requiere una alta pureza del óxido de calco (70-80%). • Se requiere un sistema de mezclado continuo. 	<p>COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 4343: Gestión Ambiental. Tratamiento de los Cortes producidos durante la perforación de pozos de petróleo con lodo base aceite. Fijación con Cal Viva.</p> <p>MUNEVAR, L., RUBIO, M., TORO, M. Manual de procedimientos para el Manejo de Cortes y Fluidos de Perforación Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, 2006.</p>

(Continuación Tabla 15)

<p><i>Incineración</i></p>	<p>Alto</p>	<p>Hornos rotatorios con capacidad de procesar 3 a 10 ton/h pueden costar de \$3 a 5\$ millones de dólares</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Riesgos ambientales asociados a la generación de subproductos como CO₂, Sox, HCL, HF, CO y Nox. ○ El proceso puede generar material particulado y metales como Cd, Hg, As, V, Cr, Co, CU, Pb, Mn, Ni t Ti. ○ Existe una generación importante de emisiones durante el proceso. ○ Riesgos asociados a la salud así como al medio debido a los subproductos de tipo ceniza voladora y escoria. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Durante el proceso se puede generar una disminución notable en el volumen de los desechos. ✓ Debido a su naturaleza, este tipo de tratamiento genera una destrucción completa del material a disponer. ✓ En casos como el uso de hornos de cemento, los compuestos aceitosos pueden ser usados como material sustituto para los combustibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los equipos necesarios para el proceso poseen un alto costo. • El proceso consume altos niveles de energía con el fin de alcanzar las temperaturas de incineración (1200-1500°C). • Existen grandes volúmenes de emisiones a la atmosfera. • Se generan subproductos como CO₂, Sox, HCL, HF, CO y Nox. • Produce una gran cantidad de subproductos tipo ceniza. • Requiere un monitoreo continuo de la operación. 	<p>SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015.</p> <p>ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. Drilling Waste Management Information System [en línea], [citado agosto 23, 2017]. Disponible de World Wide Web: <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/thermal/index.cfm>.</p>
----------------------------	-------------	--	--	---	---	--

(Continuación Tabla 15)

<p><i>Solidificación /Estabilización (Vitrificación)</i></p>	<p>Moderado</p>	<p>Bajo a Moderado</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Riesgos asociados al manejo de altas temperaturas (1600 a 2000°C). ○ El proceso de fusión puede alterar las propiedades del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reducen en gran medida la movilidad de los contaminantes saturando los cortes de perforación. ✓ Poseen un costo bajo con respecto a otras tecnologías enfocadas en la disposición. ✓ Posee un rendimiento eficiente para la estabilización de los metales pesados presentes en los cortes 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere el uso de altas cantidades de energía con el fin de alcanzar las temperaturas necesarias del proceso. • La solidificación del los cortes puede reducir el uso posterior del área. • La profundidad y penetración de los contaminantes. • Ciertos residuos son incompatibles con este proceso • El muestreo puede volverse más complejo que el proceso en sí. • No tiene una alta eficiencia para la inmovilización de fracciones de petróleo livianas 	<p>PATON, W., & FLETCHER, P. Challenges of waste management in environmentally developing countries Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111679-MS, 2008.</p> <p>CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2011.</p>
--	-----------------	------------------------	--	---	---	--

(Continuación Tabla 15)

<p>Co- Procesamiento</p>	<p>Alto</p>	<p>Moderado a Alto</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Riesgos asociados a la generación de emisiones atmosféricas. ○ Pueden producirse sub productos tipo ceniza y escoria. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Este mecanismo de disposición representa el re uso de los cortes como materia base para la producción de Clinker. ✓ A través de este medio se recupera parte de la energía contenida en los cuttings. ✓ Representa una manera de disminuir el costo en la producción de cementos. ✓ Los medios alcalinos productos de la combustión pueden generar la neutralización de gases ácidos emitidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Esta técnica requiere del transporte del material a las plantas de co procesamiento, • El co procesamiento no puede ser aplicado con desperdicios corrosivos o tóxicos, tales como organoclorados. • Para hacer uso de esta tecnología se necesita que los residuos a disponer tengan un valor calorífico de al menos de 2.775 Kcal/kg , • Este procedimiento genera un volumen considerable de emisiones a la atmosfera 	<p>SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015.</p>
<p>Skip and Ship</p>	<p>Bajo a Moderado</p>	<p>Moderado a Alto</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Riesgos ambientales asociados al transporte y disposición de gran cantidad de residuos sólidos. ○ Existe la posibilidad de un derrame del material en el lecho marino. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Es un mecanismo de una ejecución relativamente sencilla en operaciones off-shore. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conlleva un costo económico y logístico considerable, en función del número de viajes a realizar. • El transporte de grandes cantidades de residuos contaminantes por medio de buques, puede conllevar a la generación de impactos serios en el ambiente • El tiempo de transporte de los cortes puede llegar a ser substancial. • Requiere en gran medida el uso de grúas. 	<p>SVENSEN, T., & TAUGBOL, K. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011. KIRKNESS, A. J. Treatment of nonaqueous-fluid-contaminated drill Cuttingsâ€Raising environmental and safety standards Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/112727-MS, 2008. p. 3.</p>

(Continuación Tabla 15)

<p><i>Bulk Transfer</i></p>	<p>Moderado</p>	<p>Moderado</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Riesgos de derrame del material a través del circuito, ○ Una falla en el proceso puede causar afectación directa en el océano. ○ Posible afectación del ecosistema marino 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reduce en gran medida el riesgo asociado a derrames de material, representando una mejora amigable con el ambiente. ✓ Este método no genera un volumen extra de residuos, de tal forma que no requiere grúas elevadoras. ✓ Su diseño está pensado para ser un proceso de circuito cerrado que transporta los cortes del taladro al buque transportador. ✓ Requiere de un número bajo de operadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una dependencia importante de la tasa de generación de residuos. • Su naturaleza hace que el tiempo de disposición este determinado por el transporte de los residuos. • Requiere un transporte de los cortes hasta superficie- • Puede considerarse como un método intermedio de disposición. 	<p>TORGRIM SVENSEN; KNUT TAUGBOL. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011.</p> <p>AGWA, A., SADIQ, R., & LEHETA, H. Offshore drilling waste discharge: Egyptian environmental regulations Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/161446-MS, 2012. p.13.</p>
-----------------------------	-----------------	-----------------	---	---	---	---

(Continuación Tabla 15)

<p>Reinyección CRI</p>	<p>Alto</p>	<p>Moderado a Alto</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Los riesgos de esta tecnología se encuentran principalmente en operaciones Off-Shore, pues al ser necesario la generación de fracturas hidráulicas, existe la posibilidad que a través de las mismas se dé la transmisión de la lechada de cortes hacia el lecho marino circundante. ○ Este tipo de fallas operacionales, supone tanto un riesgo ambiental como económico, ya que implicaría el costo de remediación, aumento de periodos inactivos y finalmente el mantenimiento del pozo inyector. ○ Para abordar este tipo de riesgo se propone realizar la inyección en formaciones con una porción importante de roca sello, que impida la transmisión de las fracturas inducidas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Produce un nivel alto de aislamiento de los cortes de perforación, reduciendo de esta manera el impacto ambiental generado. ✓ No requiere realizar el transporte del material a disponer, puesto que se realiza de una manera in situ. ✓ El proceso facilita la operación de manejo de residuos en Off-shore. ✓ El consumo de energía es 48% menor con respecto al método tradicional de transporte y tratamiento en superficie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un control continuo de la operación de preparación de la lechada de cortes, así como del proceso de inyección de la misma. • Requiere de condiciones óptimas para la inyección, tales como: estabilidad de las formaciones objetivo, una capa sello lo suficientemente impermeable para impedir la transmisión de las fracturas, y presiones de inyección que permitan el proceso. 	<p>TORGRIM SVENSEN; KNUT TAUGBOL. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011.</p> <p>GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007 p. 63.</p>
----------------------------	-------------	----------------------------	---	---	--	---

(Continuación Tabla 15)

<p><i>Inyección CRI mejorada</i></p>	<p>Alto</p>	<p>Moderado a Alto</p>	<p>o Teniendo en cuenta que esta técnica consiste en la mejora de la tecnología de reinyección CRI, existen los riesgos asociados a esta: tales como la posible generación de fracturas que transmitan el material de desechos (cuttings) al lecho marino, durante las operaciones costa afuera.</p>	<p>✓ Los procedimientos de pre tratamiento a la inyección incluyen manejo de sólidos mecánicamente, separación de líquidos, estabilización química de los sólidos y finalmente procesos de coagulación/floculación, lo cual supone un nivel de tratamiento mayor, así como una minimización de los posibles impactos al subsuelo.</p> <p>✓ Cuando se realiza de una manera efectiva se pueden alcanzar las políticas de cero de descarga.</p> <p>✓ Se minimizan riesgos asociados a la carga y transporte del material.</p> <p>✓ Reducción de la necesidad de almacenamiento.</p> <p>✓ Posee una reducción del 25% en los costos de perforación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Posee limitaciones relacionadas a la condiciones operacionales, así como a los parámetros del proceso, tales como integridad de la formación, presión de inyección y características de los cuttings, • Requiere un alto control operacional. 	<p>J.C RODRÍGUEZ, L. PAREDES, LM SANDOVAL, C. OYATOMARI, M. NARANJO, A. PALADINES, A. ROMERO, P. LEMA Y P. GONZÁLEZ; M. OROZCO Y G. PONCE. Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field. Schlumberger, Petroamazonas. doi: 10.2118/184960-MS, 2017.</p>
--------------------------------------	-------------	------------------------	--	--	--	---

Fuente: elaboración propia, basa en los autores referidos.

Teniendo en cuenta la anterior comparación, se hace evidente las ventajas que presentan las nuevas tecnologías enfocadas en la eliminación/aislamiento de los cortes de perforación, las cuales se centran en un aumento en la eficiencia, así como una mitigación de los posibles riesgos implicados en el proceso. Cabe añadir además, que las nuevas tecnologías suponen un contexto de aplicación tanto en operaciones costa adentro como costa afuera.

Tal como se puede apreciar, dentro de las técnicas enfocadas al aislamiento de los cortes de perforación, se encuentran principalmente las técnicas de estabilización con cal viva, así como la solidificación-vitrificación; las cuales al ser comparadas con las demás técnicas mostradas, muestran unos costos de tratamiento relativamente bajos, haciendo que las mismas sean útiles bajo ciertas condiciones, a pesar de esto cabe mencionar que debido a su naturaleza, estas tecnologías no poseen la capacidad de eliminar el efecto contaminante de los cortes, pues se centran únicamente en el aislamiento de este material, logrando que el mismo sea realizado de una manera moderada con respecto a las demás técnicas de tratamiento, considerando esto cabe añadir que otra de las limitaciones principales de este tipo de tecnologías, se centra en la dificultad que presentan cuando son aplicadas para tratar los cortes aceitosos generados durante las operaciones de perforaciones, los cuales representan un porcentaje importante de este tipo de residuos.

Por otra parte, dentro de las tecnologías enfocadas a la destrucción del material por completo se encuentran principalmente la incineración y el co-procesamiento, tecnologías que poseen una alta eficiencia de eliminación con respecto a las demás, a pesar de este hecho, cabe aclarar que su aplicación implica una serie de riesgos ambientales asociados a la emisión de sub productos de un alto potencial contaminante, además de la necesidad de grandes cantidades de energía para su funcionamiento. Con respecto a la tecnología de co-procesamiento, cabe resaltar que su aplicación a pesar de poseer los riesgos mencionados anteriormente, presenta la ventaja de una re utilización del material para un proceso posterior de fabricación de Clinker, hecho que bajo las condiciones adecuadas puede suponer una ventaja considerable con respecto a la técnica de incineración de los cuttings.

Un enfoque que han tomado las nuevas tecnologías de este tipo se centra en la aplicación de la disposición/eliminación de cortes en operaciones off-shore, para lo cual las técnicas convencionales se centran en el transporte del material hasta la costa, donde posteriormente es tratado y dispuesto; dentro de este grupo se encuentran las técnicas de "Skip & ship" y el "Bulk Transfer", las cuales tienen un nivel de aislamiento bajo con respecto a las demás tecnologías, debido principalmente a que suponen el transporte de grandes cantidades de material contaminado a través del mar hasta la costa, lo cual además implica costos considerables si se tiene en cuenta el número de viajes a ser ejecutados según la escala de generación de cortes. Este tipo de tecnologías, pueden considerarse como las más tradicionales cuando se trata de operaciones costa afuera, teniendo

de esta manera la técnica de Bulk Transfer una mayor eficiencia, representada en un aislamiento mayor, basado en la implementación de un proceso de circuito cerrado, entre el punto de generación de los cuttings y los buques de transporte del material, además de la disminución de los costos relacionados al uso de grúas de levantamiento.

Ahora bien, con respecto a las nuevas tecnologías de esta categoría, pueden considerarse como aquellas técnicas enfocadas a su aplicación en operaciones costa afuera, donde la descarga de residuos se realiza en un área sensible, por lo cual se hace necesario la implementación de técnicas que logren una disposición efectiva de grandes cantidades de residuos; a partir de esta necesidad se han implementado nuevas técnicas de disposición, tales como la reinyección de cortes de perforación, la cual supone la eliminación completa de este tipo de material una vez el mismo es dispuesto en el subsuelo; además de su variación en la cual se da la mejora de sus apartados de pre tratamiento de la lechada que va a ser re inyectada.

Teniendo en cuenta las nuevas tecnologías enfocadas en la disposición de cortes de perforación, se hace notable un aumento en la eliminación de los residuos tipo corte de perforación, los cuales al ser dispuestos en el subsuelo, no efectúan ninguna interacción en superficie, así como se elimina la necesidad de transporte de grandes volúmenes de residuos desde plataforma hasta superficie; siendo esta misma la principal ventaja con respecto a las técnicas tradicionales de recolección y descarga en On-Shore.

5.2.1 Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en la eliminación/aislamiento de los cuttings

Al igual que se presentó en el apartado anterior, se da la comparación de las tecnologías de este sub grupo, determinando de esta manera los parámetros generalizados más relevantes durante la eliminación/aislamiento de este tipo material de desecho, tales como los costos de aplicación, la eficiencia de eliminación y los posibles riesgos durante el proceso, entre otros. Tal como se encuentra estipulado para las tecnologías del subgrupo anterior, se muestra la cuantificación de estos parámetros, dándoles pesos en función de su impacto durante el proceso.

La determinación del nivel de importancia de los parámetros se encuentra escalado de 1 a 10, haciendo que la evaluación de las diferentes tecnologías se encuentre homogeneizada; permitiendo además evidenciar las ventajas y limitaciones de cada una de las tecnologías evaluadas.

Al igual que en apartado anterior, se pueden posicionar los diferentes métodos técnicos a partir del valor total de ponderación en la siguiente escala:

Tabla 16: Rangos clasificatorios tecnologías enfocadas al aislamiento/eliminación de los cortes de perforación.

Nivel de aplicabilidad bajo	<330
Nivel de aplicabilidad moderado	330-400
Alto nivel de aplicabilidad	>400

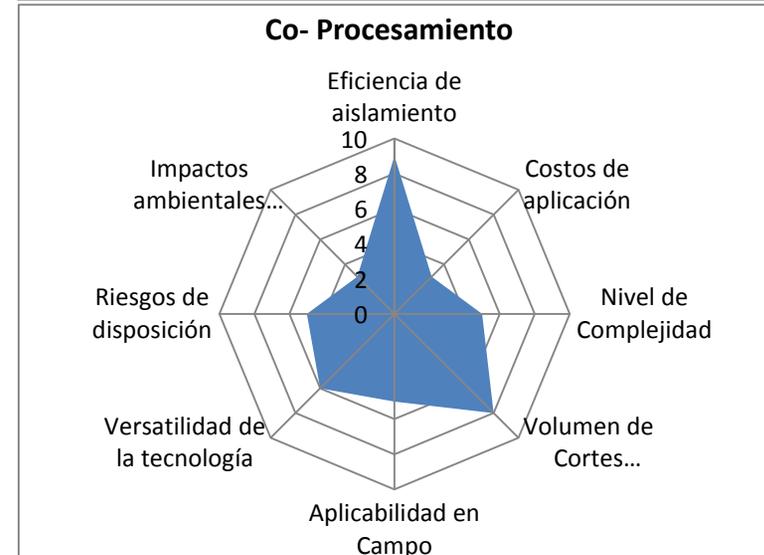
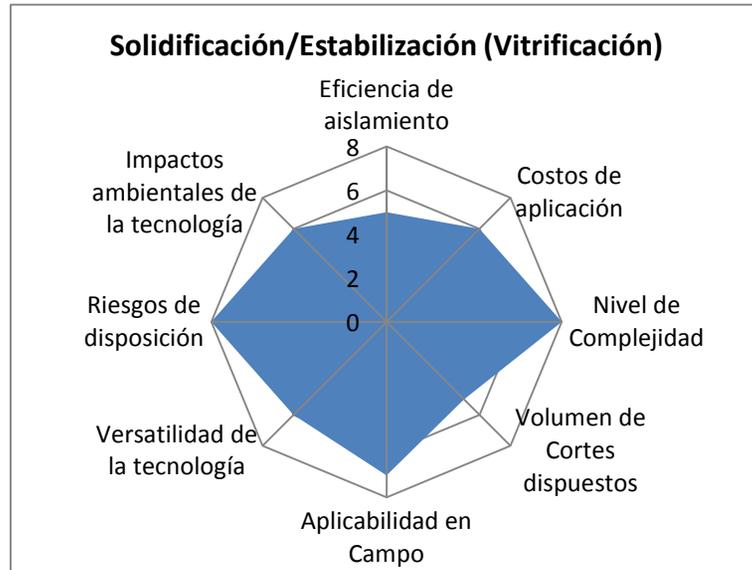
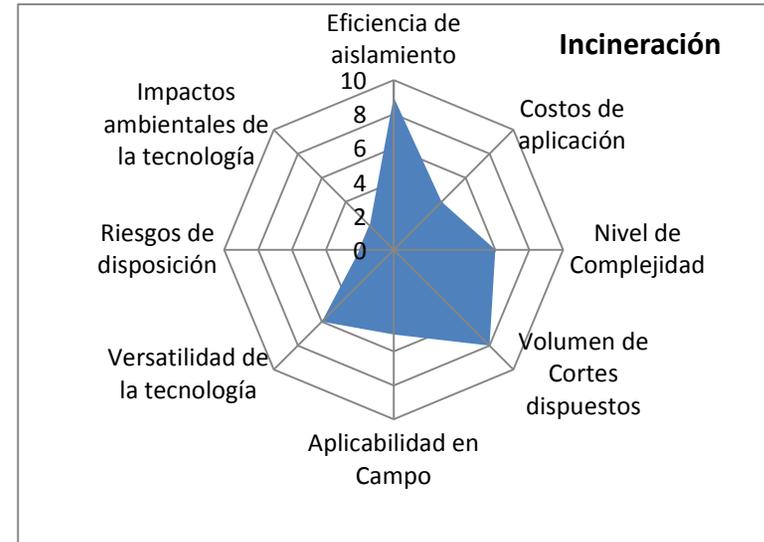
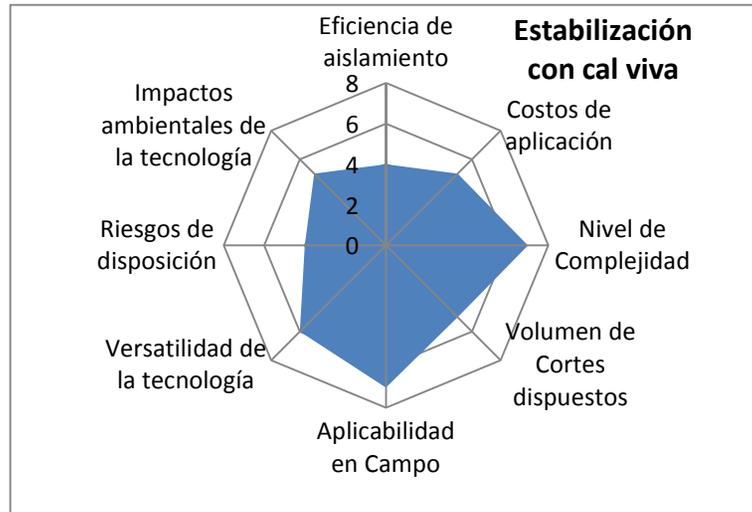
Fuente: elaboración propia.

Tabla 17: Tabla de ponderación de las diferentes tecnologías enfocadas en la eliminación/aislamiento de los cuttings.

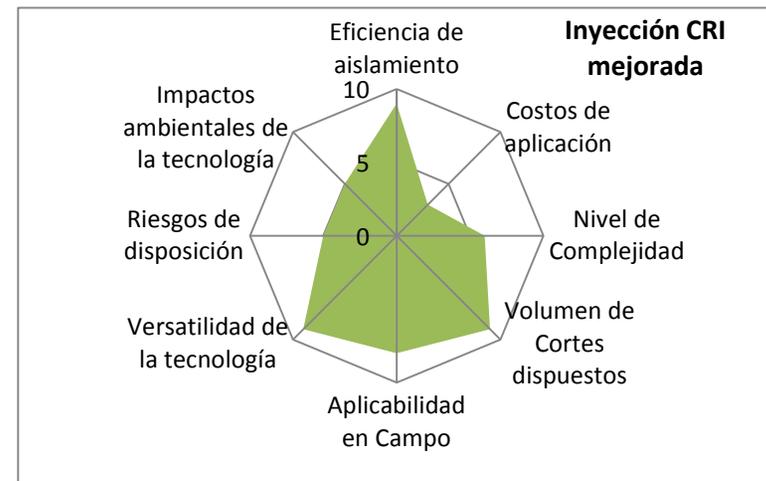
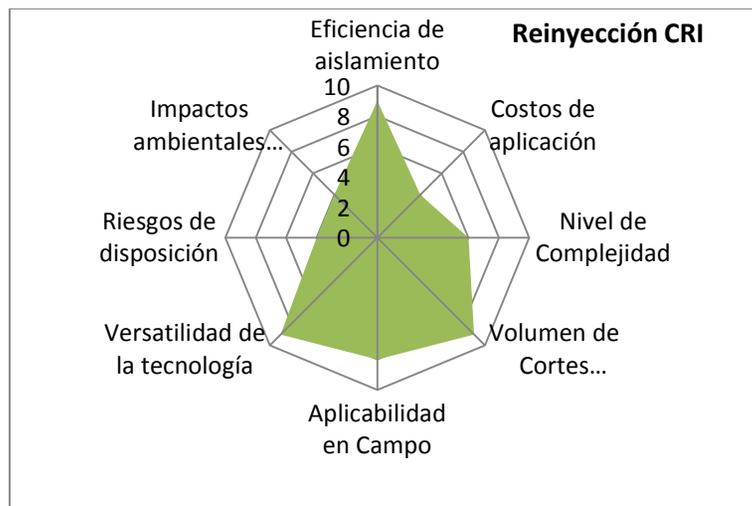
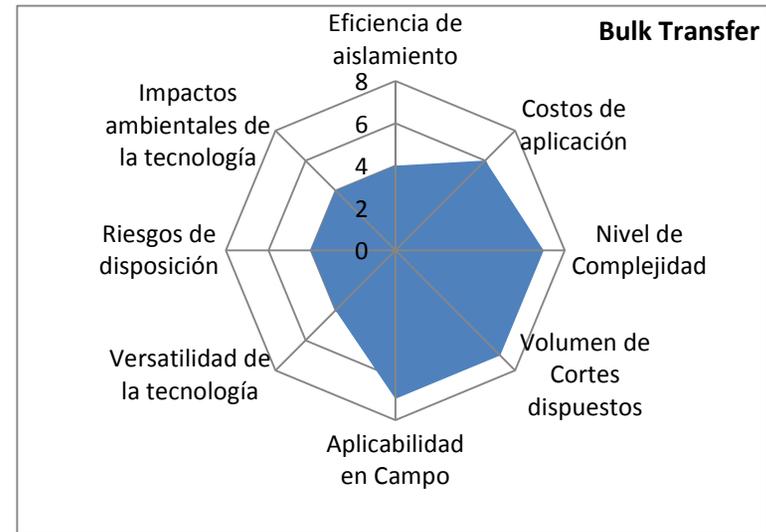
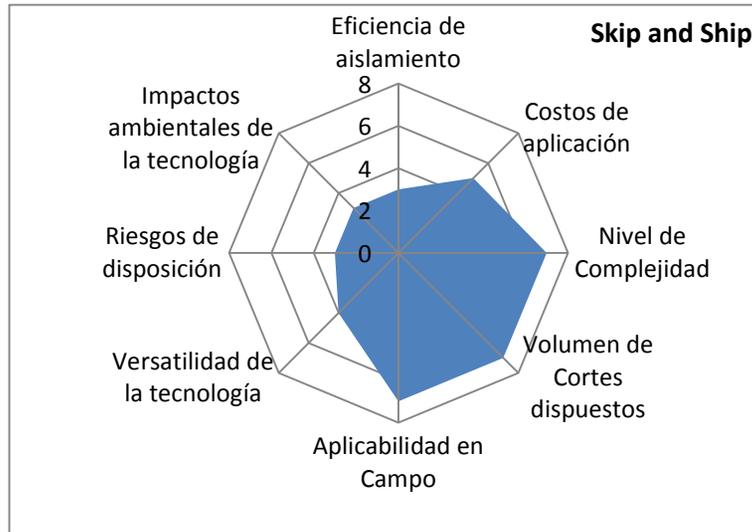
Factores		Tecnologías							
Descripción	Peso	Estabilización con cal viva	Incineración	Solidificación/Estabilización (Vitrificación)	Co-Procesamiento	Skip and Ship	Bulk Transfer	Reinyección CRI	Inyección CRI mejorada
Eficiencia de aislamiento	10	4	9	5	9	3	4	9	9
Costos de aplicación	10	5	4	6	3	5	6	4	3
Nivel de Complejidad	6	7	6	8	5	7	7	6	6
Volumen de Cortes dispuestos	5	5	8	5	8	7	7	9	9
Aplicabilidad en Campo	6	7	5	7	5	7	7	8	8
Versatilidad de la tecnología	5	6	6	6	6	4	4	9	9
Riesgos de disposición	7	4	2	8	5	3	4	4	5
Impactos ambientales de la tecnología	6	5	2	6	3	3	4	4	5
Total Ponderación		287	292	347	303	258	291	356	359

Fuente: elaboración propia.

Figura 24: Graficos Radiales – Tecnologías enfocadas al aislamiento/eliminación de los cortes de perforación.



(Continuación Figura 24)



La anterior tabla de ponderación hace referencia a la comparación de aquellas tecnologías enfocadas al aislamiento/eliminación del material, de tal manera que al igual que la comparación realizada al sub grupo anterior, se presenta la valoración de los diferentes parámetros involucrados en el proceso, tales como: la eficiencia de aislamiento, el costo de aplicación y los riesgos e impactos durante la disposición; a estas variables al igual que a las demás se les asignó un valor de impacto durante el proceso, con el fin de realizar la asignación de valores a cada una de las tecnologías a comparar, dando finalmente la ponderación de las mismas.

De esta forma, se puede observar en primera instancia, que aquellas técnicas basadas en la estabilización del material contaminante dentro de los cuttings, demostraron valores relativamente bajos con respecto a las demás tecnologías de disposición, este hecho, puede ser explicado teniendo en cuenta la naturaleza técnica de esos procedimientos, en la cual el material contaminante no es eliminado, pues se limita al aislamiento/encapsulación del mismo. Cabe añadir que dentro de este tipo de técnicas existe la desventaja relacionada con el volumen de cortes a tratar, así como de los efectos que puede causar el desarrollo de prácticas de esta índole.

Por otra parte, las tecnologías que hacen uso de altas temperaturas para lograr la eliminación del material (incineración y co procesamiento), mostraron resultados similares en la tabla de ponderación, debido principalmente a su alta eficiencia, grandes volúmenes de cortes tratados, altos costos en el proceso, así como impactos ambientales considerables, cabe aclarar que la diferencia entre las dos principales tecnologías tratadas con anterioridad, se centra en la posibilidad de aprovechar el material dispuesto como materia prima para la producción de un material nuevo (co procesamiento); este reusó aporta un valor agregado que se ve reflejado en la tabla de ponderación.

Ahora bien dentro de las tecnologías tradicionales usadas para la disposición de los cuttings en operaciones costa afuera, se pueden apreciar valores bastantes bajos con respecto a las demás tecnologías; este hecho se debe principalmente a la ineficiencia en el aislamiento del material durante el proceso, así como de los riesgos asociados a las mismas; teniendo en cuenta que este tipo de técnicas se basan a grandes riesgos en el transporte del material desde plataforma hasta la costa donde se realiza su debida disposición. Cabe añadir que dentro de estas tecnologías, se destaca el “bulk transfer”, debido al aumento en la eficiencia de aislamiento que presenta durante la operación, con respecto a la técnica de “skip and ship”, este hecho se presenta además en un valor mayor en el índice de ponderación.

Finalmente, las nuevas tecnologías enfocadas en la disposición del material tipo corte de perforación (reinyección CRI y reinyección mejorada), muestran valores de ponderación mucho mayores a las demás técnicas discutidas, esto se debe principalmente a los beneficios relacionados a la alta eficiencia de asilamiento y disposición del material, su aplicabilidad en campo, el gran volumen de cortes a disponer y finalmente su utilidad en operaciones costa afuera, mitigando de esta manera los posibles impactos ambientales relacionados a este proceso. Cabe añadir que estas tecnologías suponen una mejora con respecto a las técnicas tradicionales de movilización hasta tierra firme, representada en la eliminación del requerimiento del transporte, así como los riesgos e impactos que este proceso puede implicar.

6. CONCLUSIONES

La generación de cortes de perforación se presenta técnicamente similar para diferentes escenarios, a pesar de esto sus características, así como la escala de producción de este tipo de material, se encuentran definidos principalmente por el tipo de pozo a perforar, así como las características brutas de la perforación.

Las tecnologías convencionales basadas en la remediación del contenido orgánico saturando los cortes de perforación presentan una eficiencia similar, representada en la disminución de dicho material, alcanzando valores de contenido remanente post tratamiento que oscilan dentro de un rango del 5% al 8%. Por otro lado, las técnicas basadas en la aplicación de una fuente de calor para la eliminación del contaminante poseen reducciones variables, existiendo así un rango de materia remanente que oscila entre 1% al 5%, dependiendo de la tecnología implementada.

Las técnicas novedosas de reinyección CRI, demuestran un alto índice de aplicación en operaciones Off-Shore puesto que las mismas ofrecen un alto nivel de aislamiento, lo cual se debe principalmente a la inyección de la lechada de los cortes de perforación directamente en el subsuelo, evitando de esta manera su interacción con el ambiente oceánico circundante.

Las técnicas de estabilización y solidificación poseen un nivel de aislamiento relativamente bajo con respecto a las demás tecnologías, siendo aplicables en escenarios operativos donde la disposición sea realizada en áreas no sensibles, así como en terrenos con una legislación ambiental menos rigurosa.

La tecnología basada en el uso de una nano emulsión para lograr el tratamiento de los cortes de perforación, presenta una eficiencia bastante alta, alcanzando de esta manera niveles de contenido remanente post tratamiento menores al 1%; a pesar de este hecho se puede evidenciar que su aplicación se ve limitada a escala de laboratorio, ya que la misma posee un alto costo relacionado a el uso de nano partículas en cantidades suficientes para llevar esta técnica a escala de campo.

La tecnología basada en la combinación de un agente limpiador sintetizado con una fuente ultrasónica presentó un contenido remanente de materia orgánica post tratamiento del 0.79% manteniendo un costo relativamente bajo, lo cual demuestra su alto potencial de implementación a escala de campo de una manera extensiva.

La tecnología de remediación "All Natural" puede ser implementada no solo para el tratamiento de cortes de perforación, ya que la misma se encuentra formulada además como una alternativa para tratar los derrames en suelos a pequeña y gran escala, con unos resultados económicos resaltantes. Además, con respecto al tratamiento de los cortes de perforación, presenta una relación costo – eficiencia

destacable, alcanzado de esta manera porcentajes remanentes de contenido orgánico menores al 1% con una inversión de 42500 \$US para 300 yd³.

A partir de la matriz de ponderación de las tecnologías enfocadas en la disposición de los cortes de perforación se evidenció que las técnicas basadas en el transporte de los residuos en operaciones Off-Shore, tales como las técnicas de “Skip & Ship” y el “Bulk Transfer” poseen una limitación evidente, basado en el bajo nivel de aislamiento alcanzado, lo cual además supone un alto riesgo ambiental.

Mediante la evaluación de los diferentes aspectos, se encontró que las técnicas de incineración, así como co-procesamiento poseen un alto nivel de aislamiento del material, pues suponen su eliminación parcial o completamente, a pesar de esto su aplicación se encuentra limitada por su alto costo operativo, así como su nivel de impacto ambiental.

7. RECOMENDACIONES

Para esta investigación, se encontró que la mayoría de papers revisados, se encontraban directamente en la base de datos de One Petro, por lo cual, y considerando que la misma se especializa en el sector de hidrocarburos, para próximas investigaciones se recomienda tener como fuente principal a esta.

Se recomienda no descartar las investigaciones enfocadas en las técnicas consideradas convencionales, teniendo en cuenta que en la actualidad existen gran variedad de estudios enfocados en la mejora de la eficiencia de dichas tecnologías bajo ciertas condiciones y contextos operacionales, lo cual supone una ventaja por encima de las demás.

Para un estudio exclusivo de las tecnologías más innovadoras de esta área, se recomienda tener una mayor atención a las investigaciones realizadas a partir del año 2006, el cual puede ser considerado como el hito de inicio de esta línea de investigación.

Durante el desarrollo de este trabajo investigativo, se evidenció que gran parte de los trabajos revisados, consistían en estudios de casos de aplicaciones de las diferentes tecnologías, por lo cual se recomienda tener en cuenta los mismos, con el fin último de determinar las condiciones óptimas de aplicación para cada una de las tecnologías, incluyendo tanto tecnologías convencionales como innovadoras.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario. [citado julio 01 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-t>>.

AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS. *EPA en Español*. [en línea], sec. Glosario. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-e>>.

AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL. *Manejando sus Residuos Peligrosos – Una guía para empresas pequeñas*. Washington, 2003. p. 4.

AGWA, A., SADIQ, R., & LEHETA, H. Offshore drilling waste discharge: Egyptian environmental regulations Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/161446-MS, 2012.

ALCADIA DE BOGOTA. *Unidad Ejecutiva de Servicios Publicos, Analisis sobre la propiedad de los residuos solidos*. [en línea], sec. Inicio. [citado junio 23 2017]. Disponible de World Wide Web <<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37003>>.

ANDREW R MILES, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Inicio.[citado abril 26, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/index.cfm> >.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Inicio. [citado mayo 01, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/regs/index.cfm> >.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Waste Management Technology Descriptions. [citado mayo 02, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/index.cfm>>.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Fact Sheet - The First Step:

Separation of Mud from Cuttings .[citado mayo 02, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/sep/index.cfm> >.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec.Solidification and Stabilization [citado mayo 02, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/solid/index.cfm>>.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec.Solidification and Stabilization. [citado mayo 03, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm> >.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec.Solidification and Stabilization. [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/lower/index.cfm>>.

ASME, Cap 1 by ROBINSON L., Cap 2 by GROWCOCK F. & HARVEY T. *Drilling Fluids Processing Handbook*. Elsevier. United States, 2005.

ASME, Cap 2 by Growcock F. & Harvey T. *Drilling Fluids Processing Handbook*. Elsevier. United States, 2005.

BAI, M., MCLENNAN, J., GUO, Q., & GREEN, S. Cyclic injection modeling of cuttings re-injection American Rock Mechanics Association, 2006.

BARBERII, EFRAIN. E. El pozo ilustrado, publicado editado por el Departamento de Relaciones Publicas, Lagoven S.A, cuarta edición, Caracas, Diciembre 1985.

BAROID a Halliburton Company. *Manual de Fluidos*. Houston, Estados Unidos, 1999-2000.

BARTKO, K., AL-SHOBAILI, Y., GAGNARD, P., WARLICK, M., & BA IM, A. Drill cuttings re-injection (CRI) assessment for the manifa field: An environmentally safe and cost-effective drilling waste management strategy Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/126077-MS, 2009.

BASEL CONVENTION, UNEP. *Basel Convention on the Control of Trasnboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal – Protocol on Liability and Compensation for Damage Resulting from Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal*. 1999.

BENAVIDES, M. RISSO, W. - VIRTUAL LIBRARY IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ENVIRONMENTAL HEATH- CEPIS. *Glosario de residuos*

peligrosos. [en línea], [citado julio 05 2017]. Disponible de World Wide Web:< <http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt046-a.html>>.

BILATAYIB. M., ENG. MUFAZZAL, S. KABULI, ISSA D., AYYADAND N., RAMIRES D. Management of Drilling Cuttings in Term of Volume and Economics in Oil Field. Australian College of Kuwait, 2016.

BUREAU OF OCEAN ENERGY MANAGEMENT. *BOEM* [en línea], [citado abril 27, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://www.boem.gov/Leadership/>>.

BUREAU OF SAFETY AND ENVIRONMENTAL ENFORCEMENT. *BSEE* [en línea], sec. About Us. [citado abril 27, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <https://www.bsee.gov/who-we-are/our-organization/leadership>>.

CALAO, J. Caracterización Ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías Disponibles para la Prevención y Mitigación de Impactos Ambientales Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin, 2007.

CASTEBLANCO, I., NIÑO, J. Manejo y Tratamiento actual de Residuos Aceitosos en la industria Petrolera Colombiana universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2011.

CEPIS/OPS. *Guía para la definición y clasificación de Residuos Peligrosos*. [en línea], sec. Inicio. [citado junio 23 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://www.bvsde.paho.org/cdromrepi86/fulltexts/eswww/fulltext/gtz/defclarp/guiars.html>>.

Classifications of fluids systems, World Oil (June, any year), citado por SKALLE PAL. Drilling Fluid Engineering. Bookboon.

COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 4343: Gestión Ambiental. Tratamiento de los Cortes producidos durante la perforación de pozos de petróleo con lodo base aceite. Fijación con Cal Viva.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DARROLLO TERRITORIAL. Guías para Manejo seguro y Gestión Ambiental de 25 sustancias químicas, 2003.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE; ACP. Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas, 1999.

COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 4741 (30, Diciembre, 2005): por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los

residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, Bogotá D.C. Diario Oficial 46130, 2005.

CORDAH. Research on the Re-use of Drill Cuttings Onshore. Prepared by Cordah Limited, Aberdeen, Scotland, for Talisman Energy (UK) Limited, 2001 September 11 citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

DOE. Environmental Benefits of Advanced Oil and Gas Production Technology, DOE-FE-0385, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, Washington, DC (Available at: http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=771125.), 1999.

DOE. Environmental Benefits of Advanced Oil and Gas Production Technology, 1999 citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Drilling Practices That Minimize Generation of Drilling Wastes. [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/drilling/index.cfm>>.

ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web:<http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=waste%20treatment>

ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web:<http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=chemical%20treatment%20of%20waste >.

ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web:<http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=physical%20treatment>

ENVIRONMENTAL TERMINOLOGY AND DISCOVERY SERVICE. *European Environmental Agency*. [en línea], sec. Glossary [citado julio 03 2017]. Disponible de World Wide Web:<http://glossary.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=waste%20disposal>.

EPA. Development Document for Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for Synthetic-Based Drilling Fluids and other Non-Aqueous Drilling Fluids in the Oil and Gas Extraction Point Source Category, EPA-821-B-00-013U.S. (Available at: <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/sbf/eng.cfm>) December, 2000.

FLEMING, C. A Discussion of: Chemical Fixation and Solidification (CFS), Solidification/Stabilization, Microencapsulation, and Macroencapsulation. Prepared for the API/NOIA Synthetic Based Fluids Research Group, 2000.

GEEHAN, T., GILMOUR, A., GUO, Q. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación (CRI) Oilfield Review, Schlumberger, 2007.

GOMEZ ROMO, J. A., & GONZÁLEZ RIVERA, J. W. Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos del norte. Trabajo de Grado, Bucaramanga, 2009.

GROWCOCK, F.B., G.W. CURTIS, B. HOXHA, W.S. BROOKS, AND J.E. CANDLER. Designing Invert Drilling Fluids to Yield Environmentally Friendly Drilled Cuttings. IADC/SPE 74474, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, 2002, February 26-28. Citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. Drilling Waste Management Information System [en línea], [citado agosto 16, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/lower/index.cfm>>.

GUANGHUAN LI, HONG MA, TAO LONG, DAQUAN HUANG, ZENGYAN TIAN, AISHUN ZHANG, WEIZHONG WANG, SHILI HOU, AND CHUNWU GONG. Harmless Treatment Technology of Oily Cuttings. Drilling Fluids Technology Service Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd. doi: 10.2118/183041-MS, 2016.

H. C. H. Darley, George R. Gray. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Quinta Edición. Gulf Professional Publishing, 1988.

HAWKER D., VOGT K., & ROBINSON A. DATALOG. Procedimientos y operaciones en el pozo, 2001.

I. PETRI JÚNIOR, CH ATAÍDE, CR DUARTE, RN DE TOLEDO, AS MORAIS, CM DE A. PANISSET, CHM DE SÁ, AND AL MARTINS. Decontamination of Drilled Cuttings by a Semi-Industrial Continuous Microwave Dryer. Federal University of Uberlândia; INNOVARE; Petrobras doi: 10.4043/26335-MS, 2015.
INSTITUTO AMERICANO DEL PETRÓLEO, ENERGY API. Manual de Fluidos de Perforación. Texas, United States.

J.C RODRÍGUEZ, L. PAREDES, LM SANDOVAL, C. OYATOMARI, M. NARANJO, A. PALADINES, A. ROMERO, P. LEMA Y P. GONZÁLEZ; M. OROZCO Y G. PONCE. Cuttings and Waste Injection Disposal Management: An Environmentally Attractive Solution for Amazonian Oil Field. Schlumberger, Petroamazonas. doi: 10.2118/184960-MS, 2017.

KIRKNESS, A. J. Treatment of nonaqueous-fluid-contaminated drill Cuttings—Raising environmental and safety standards Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/112727-MS, 2008.

LADOUSSE, A., TALLEC, C., CHAINEAU, C., & VIDALIE, J. F. Landfarming of drill cuttings Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/35879-MS, 1996.

MCHUGH, S., HOFFMANN, R. E., & CONRAD, D. L. Waste management standards enhance environmental performance Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111750-MS, 2008.

MENDEZ, R., COMEZ, P., LEDESMA, J., CENICEROS, C. Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013.

MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. NOM-115-SEMARNAT-2003. Diario Oficial. México, 2004.

MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT. Plan de Manejo de Recortes de Perforación en el Estado de Tabasco, 2012.

MORILLON, A., J.F. VIDALIE, U. SYAHNUDI, S. SURIPNO, AND E.K. HADINOTO. Drilling and Waste Management-SPE 73931, presented at the SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Kuala Lumpur, Malaysia. doi: 10.2118/73931-MS, 2002.

MUNEVAR, L., RUBIO, M., TORO, M. Manual de procedimientos para el Manejo de Cortes y Fluidos de Perforación Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, 2006.

PAGE, P.W., C. GREAVES, R. LAWSON, S. HAYES, AND F. BOYLE. Options for the Recycling of Drill Cuttings. SPE 80583, SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, TX, 2003 March 10-12, citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Beneficial Reuse of Drilling Wastes. [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

PATON, W., & FLETCHER, P. Challenges of waste management in environmentally developing countries Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111679-MS, 2008.

PAUL W. PAGE, CHRIS GREAVES, ROSEY LAWSON, SEAN HAYES, FERGUS BOYLE, MOTT MACDONALD. Options for Recycling of Drill Cuttings. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/80583-MS, 2003.

PIERCE, D. A., WOOD, B., & GADDIS, C. Lessons learned from treating 500,000 tons of oil-based drill cuttings on five continents Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/99027-MS, 2006.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. Convenio de Basilea: Sobre el control de los Movimientos Transfronterizos de los desechos Peligrosos y su Eliminación. 1989.

R. PRIATNA, A. SJAHROEZH & R. I. BLEDOEGL. Waste Management: An Approach to the Management of Drilling Waste. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/61249-MS, 2000.

Real Academia Española. [en línea], sec. Inicio. [citado junio 23 2017]. Disponible de World Wide Web: < <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=desecho>>.

R MILES, ANDREW, P.E. All-Natural Process for the Rapid Treatment and Recycling Hydrocarbon-Contaminated Solid Wastes Offers a Cost-Saving and Environmentally-Green Solution for the Petroleum industry. doi: 10.2118/184456-MS, 2017.

ROBINSON, J., KINGMAN, S., SNAPE, C. E., BRADLEY, M., BRADSHAW, S., THOMAS, D. J. M., & PAGE, P. W. Microwave treatment of oil-contaminated drill cuttings at pilot scale Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/111637-MS, 2008.

SANCHEZ V., GUIZA G. UNESCO-PNUMA. Programa Internacional de Educación Ambiental- Glosario de Términos sobre Medio Ambiente. Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe, 1989.

SAPHANUCHART, W., LOKE, Y. S., & SEE, C. H. Nanoemulsion-enhanced treatment of oil-contaminated oil-based drill solids Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/162401-MS, 2013.

Schlumberger Oilfield Glossary. [en línea], sec. Oilfield Glossary. [citado junio 22 2017]. Disponible de World Wide Web: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/r/rotary_drilling.aspx>.

SCHLUMBERGER. Thermal Desorption Technologies.

SCORZELLI, I. B., COSTA, C. L. P., & FURIO, P. R. Evaluation of new technological routes to waste treatment generated on oil platform: Waste-to-energy Offshore Technology Conference. doi:10.4043/26090-MS, 2015.

SERGIO A. VARDARO; JOSÉ A. GÁLVEZ; JOSÉ A. CANTERO; A. CECILIA LÓPEZ; GUILLERMO TETTAMANTI; IVANNA PINEDA. Recortes de perforación de la industria Petrolera generados en el oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento. Universidad Nacional de Cuyo; Facultad de Ingeniería; Bioprocesos, 2013.

SHOKANOV, T. A., & RONDEROS, J. R. Cuttings and waste injection, shale fracturing pressure decline, and domain mapping Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/147671-MS, 2011.

SHOKANOV, T., STILL, V., HERNANDEZ, E., ANOKHIN, V., OVALLE, A., & FRAGACHAN, A. Subsurface drilling waste injection: Real-time waste domain characterization using injection monitoring and pressure interpretation (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/114148-RU, 2008.

SKALLE PAL. Drilling Fluid Engineering. Bookboon, 2010.

SVENSEN, T., & TAUGBOL, K. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011.

TORGRIM SVENSEN; KNUT TAUGBOL. Drilling waste handling in challenging offshore operations (russian) Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/149575-RU, 2011.

U. S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. *Bureau of Land Management* [en línea], [citado abril 26, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<https://www.blm.gov/about/our-mission>>.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Federal Remediation Technologies Round Tables* [en línea] sec. Inicio. [citado agosto 04, 2017]. Disponible de World Wide Web: <https://frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html>

UNdata- Glossary. *Base de información UN*. [en línea], sec. Inicio. [citado julio 01 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://data.un.org/Glossary.aspx?q=treatment>>.

UNdata- Glossary. *Base de información UN*. [en línea], sec. Glossary. [citado julio 04 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://data.un.org/Glossary.aspx?q=disposal>>.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA [en línea], sec. About Us. [citado abril 26, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<https://www.epa.gov/aboutepa/our-mission-and-what-we-do>>.

VARHAUG, A. Un giro a la derecha: Una Visión general de las operaciones de perforación Oilfield Review, Schlumberger. Volumen 23, n° 3, 2012.

VEIL, J. A. Drilling waste management: Past, present, and future Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/77388-MS, 2002.

VEIL, J.A.. Drilling Waste Management: Past, Present, and Future. SPE 77388, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, 2002 September 29-October 2, citado en ARGONNE NATIONAL LABORATORY; CHEVRONTEXACO; MARATHON. *Drilling Waste Management Information System* [en línea], sec. Inicio [citado agosto 17, 2017]. Disponible de World Wide Web: <<http://web.ead.anl.gov/dwm/techdesc/reuse/index.cfm>>.

VICTOR E. MARTINEZ M Y FEIPE LOPEEZ S. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. Terra Volumen 19, Numero 1, 2001.

VIRTUAL LIBRARY IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ENVIRONMENTAL HEATH, WORLD HEALTH ORGANIZATION, PAN AMERICAN HEATH ORGANIZATION. Glossary on Environmental Health. Lima, 2003. p. 253.

WALKER, J., MILLER, J. J., BURROWS, K., MANDER, T., & HOVAN, J. Nonaqueous, salt-free drilling fluid delivers excellent drilling performance with a smaller environmental footprint Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/178804-MS, 2016.

WORLD BANK GROUP. Pollution Prevention and Abatement Handbook . Glossary of Environmental Terms. 1998.

WORLD BANK, citado por Fromm C. H, CALLAHAN M. S. Waste Reduction Audit Procedure A Methodology for Identification, Assessment and Screening of Waste Minimization Options. Hazardous & Toxic Materials Division Jacobs Engineering Group Incorporated. California, Estados unidos.