

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA BIORREMEDIACIÓN DE CORTES DE
PERFORACIÓN EN LODOS BASE AGUA DE POZOS ESTRATIGRÁFICOS
PROFUNDOS**

INGRID CAROLINA CÓRDOBA RÍOS

YENYFER YAMILE VALLEN VARGAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA BIORREMEDIACIÓN DE CORTES DE
PERFORACIÓN EN LODOS BASE AGUA DE POZOS ESTRATIGRÁFICOS
PROFUNDOS**

INGRID CAROLINA CÓRDOBA RÍOS

YENYFER YAMILE VALLEN VARGAS

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingenieras de Petróleos**

Directora

M. Sc. OLGA PATRICIA ORTIZ CANCINO

Co-director

TEC. ALEXANDER BELTRÁN BARRERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A Dios por brindarme todas las oportunidades, desafíos y enseñanzas para triunfar a lo largo de mi camino.

A ti mamita, Matilde Ríos por ser mi guía, mi fortaleza y la persona que siempre estuvo allí para brindarme su apoyo y amor incondicional.

A mis tías y tío Teresa, Yaneth, Sofía, Obdulía, Jaime, quienes con sus consejos y compañía me motivaron a seguir adelante y culminar exitosamente este proyecto

A mis hermanos Natalia, Jonathan, Jenny y a mi sobrina Jineth que los llevo en mi corazón y quienes estuvieron dispuestos a darme una mano amiga en circunstancias adversas.

A mi nonita María del Carmen Velandía y a mi nonito Hilario Ríos (Q. E.P.D.) por ser esa fuente de sabiduría, paciencia y fortaleza.

A ti Sergio Ruiz, que eres mi norte, mi escudo de batalla y fuiste mi refugio en momentos en los cuales sentí desfallecer; sin olvidar a tu familia, quienes me brindaron su cariño y su apoyo.

A mis amigos de universidad, de San Gil, Hernán, Jesús, Javier Darío, Yenyfer, Alex, Abelardo, Diana, Andrés Anaya, Lore, Jury, Stivenson, Cuchís, Juancho, Maricela, William, Cristian, Daniela, Cyndi, Santiago, Migue con quienes compartí mis alegrías, triunfos, tristezas y demás experiencias de mi vida universitaria.

A todos ellos y a muchas personas más que han compartido conmigo un minuto de su tiempo, mil gracias por su valiosa compañía. De todos aprendí y disfrute cada momento como si fuera el último.

Ingríd Carolina Córdoba Ríos

DEDICATORIA

Doy gracias al Dios todo poderoso por permitir ver este logro hecho realidad, por su voluntad, sus grandes bendiciones y su gloria me permitió realizar mis estudios, y culminar este gran objetivo en mi vida.

A mi padre Alberto Vallén (Q.E.P.D) por guiarme e inculcarme los valores que me hacen la persona que soy hoy en día, a mi mamá Olguita porque ella es mi fuerza en esta vida, es mi mano derecha, mi mejor amiga. Mi hermano Albert que ha sido mi compañero de lucha desde que entré a la universidad y a mis schnauzer; los amo mucho mi familia hermosa, gracias por apoyarme en mis decisiones.

A Edwin Robles por que más que mi novio es mi amigo aquel ángel que llegó cuando más lo necesitaba. Por darle música a mi vida y llenarla de felicidad.

A la familia Vallén y a la familia Vargas especialmente mis tíos, Josesito, Humberto, Tía Elens, Sarita y Betty, por extender su mano en los momentos más difíciles, aun así en la distancia estuvieron pendientes, brindándome su apoyo incondicional. Así mismo al Sr. Sergio Pinto y Doña Adela por todas sus bendiciones recibidas para mi familia.

A mis amigos, Jesús, Michael, Karen, Carito, Cuchís, Lore, Chisfero, Sajito, Liza, Nata y Laura, y demás compañeros por aportar algo positivo en mi vida. Gracias por acompañarme en esta gran etapa.

“Nunca te detengas frente a los obstáculos así como la luz domina las tinieblas podrás vencer todo problema, toda dificultad, la luz que hay en ti es mucho más grande y sobrenatural que cualquier adversidad”. (Alberto Vallén).

Yenyfer Vallén Vargas

AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera **OLGA PATRICIA ORTIZ** quien, como nuestra directora de proyecto estuvo pendiente de todo nuestro trabajo, de realizar las respectivas observaciones y sugerencias para el éxito de nuestro proyecto de grado.

A nuestro Co-director **ALEXANDER BELTRÁN** por su incondicional guía, apoyo y colaboración en las pruebas de laboratorio y en la obtención de los microorganismos; elementos clave para la realización de este trabajo.

A la Dra. **GRACIELA CHALELA** y su auxiliar **PILAR**, del Grupo de Investigación en Biotecnología y Ambiente (**CINBBYA**) de la UNAB, quienes nos brindaron todo su conocimiento, valiosa ayuda, asesoría y nos permitieron el uso de su laboratorio y equipos para realizar las pruebas con los cortes de perforación y los microorganismos.

Al Ing. de **HSEQ ERIC PRINCE**, quien nos brindó muy amablemente y de manera oportuna la información pertinente de la finalización de los proyectos de PATIA Y BUENAVENTURA; datos clave para realizar los cuadros comparativos de los tratamientos de los cortes de perforación.

A todos los Ingenieros de las empresas de WEATHERFORD (Ing. **CLAUDIO**, Ing. **JAER**) y los ingenieros de QMAX por su paciencia y por su tiempo durante las visitas de campo, en las cuales se lograron reforzar y aclarar conceptos claves para la realización de las pruebas de control de parámetros de cortes de perforación y de todos aquellos productos químicos que se le adicionan al lodo.

Al proyecto de investigación de Pozos Profundos, la Escuela de Ingeniería de Petróleos y la UIS por permitirnos visitar cada una de las locaciones, por su apoyo económico y formativo, que permitieron la exitosa finalización de esta investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	26
1. GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO	28
1.1. EL SUELO	28
1.1.2. El perfil del suelo	28
1.2. FACTORES DE CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS	31
1.2.1. Transporte	32
1.2.2. Retención	34
1.2.3. Transformación.....	35
2. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN.....	37
2.1. DEFINICIÓN DE LODO DE PERFORACIÓN	38
2.2. FUNCIONES DEL LODO DE PERFORACIÓN	38
2.2.1. Remoción de los recortes del pozo	38
2.2.2. Control de las presiones de la formación	39
2.2.3. Suspensión y descarga de recortes	39
2.2.4. Obturación de las formaciones permeables	39
2.2.5. Mantenimiento de la estabilidad del hueco	40
2.2.6. Minimización de los daños a la formación	40
2.2.7. Enfriamiento, lubricación y sostenimiento de la broca de perforación	40
2.3. COMPOSICIÓN DEL LODO DE PERFORACIÓN	41
2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN	41
2.4.1. Lodos de perforación base agua.....	41
2.4.1. Lodos de perforación base aceite	42
2.4.3. Lodos neumáticos.....	42

3.TÉNICAS DE TRATAMIENTO DE CORTES PARA SU DISPOSICIÓN FINAL..	43
3.1. TRATAMIENTOS EX SITU E IN SITU	44
3.2. TÉCNICAS DE BIOTRATAMIENTO	45
3.2.1. Biodegradación pasiva.....	45
3.2.3. Bioventilación.....	48
3.2.1. Biodegradación in situ.....	49
3.2.4. Biopilas	51
3.2.5. Lanfarming.....	51
3.2.6. Biodegradación en suspensión	55
3.3. TRATAMIENTOS FÍSICOS.....	56
3.3.1. Ventilación de suelos	56
3.3.2. Flushing	57
3.3.3. Lavado de suelos	58
3.3.4. Aglomeracion con alquitran de carbón	59
3.4. TRATAMIENTOS QUÍMICOS.....	60
3.4.1. Extracción con solventes	60
3.4.2. Degradación química	60
3.5. TRATAMIENTOS TÉRMICOS	61
3.5.1. Calentamiento con radiofrecuencia.....	61
3.5.2. Vitricación	62
3.5.3. Desorción térmica	63
3.6. OTROS TRATAMIENTOS	63
3.6.1. Técnicas de confinamiento	63
3.6.2. Microencapsulación	64
3.6.3. Capping	64
3.6.4. Microconfinamiento.....	64
3.6.5. Landfilling	65
3.7. TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE CORTES DE PERFORACIÓN ...	65
3.7.1. Confinamiento en piscinas y celdas	66
3.7.2. Incineración controlada	69

3.7.3. Estabilización con cal viva	71
4.GENERALIDADES DE LOS POZOS ESTRATIGRÁFICOS.....	74
4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL POZO ANH-PATIA -1-ST- P	74
4.2. INFORMACION GEOLÓGICA DE LA CUENCA PATIA.....	76
4.2.1. Formaciones geológicas	79
4.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL POZO ANH-B/VTURA -1-ST-P	79
4.4. INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE LA CUENCA TUMACO.....	81
4.4.1.Prognosis geológicas.....	83
5.NORMATIVIDAD	84
5.1. DEFINICIÓN DE RESIDUO	84
5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS.....	85
5.2.1. Clasificación por estado.....	85
5.2.2. Clasificación por origen.....	85
5.2.3 Clasificación por tipo de tratamiento	86
5.2.4. Clasificación por sus potenciales efectos	86
5.3. RESIDUOS PELIGROSOS	86
5.3.1 Residuos peligrosos conforme la resolucion 2309 de 1986 de Colombia.....	87
5.4. LEYES Y NORMAS QUE RIGEN EN COLOMBIA.....	88
5.4.1. Ley 99 de 1993	88
5.4.2. Ley 99 de 1993 y decreto 2820 del 5 de agosto de 2010.....	89
5.4.3. Decreto – ley 2811 de 1974.....	89
5.4.4. Decreto 4741 de 30 de diciembre de 2005	90
5.4.5. Decreto 1609 de 2002.	91
5.4.6. Ley 430 de 1998.	91
5.5. NORMATIVIDAD EXTRANJERA COMO MODELO DE APLICACIÓN EN LA LEGISLACIÓN COLOMBIANA	92

6. ESTUDIO DE LA BIORREMEDIACIÓN.....	95
6.1. TIPOS DE BIORREMEDIACIÓN	96
6.1.1. Electrobioreclamación	96
6.1.2. Bioslurping.....	97
6.1.3. Biopile.....	97
6.1.4. Bioventing	97
6.1.5. Degradación enzimática	98
6.1.6. Fitorremediación o remediación con plantas	99
6.1.7. Remediación microbiana	100
6.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN.....	101
7. MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACION	103
7.1. BACTERIAS	104
7.1.1. Crecimiento bacteriano	106
7.1.2. Nutrición y metabolismo.....	107
7.1.3. Clasificación de las bacterias.....	108
7.1.4. Condiciones físico-químicas de las bacterias	110
7.1.4.1. Concentraciones de H ⁺	110
7.1.4.2. Temperatura	111
7.1.4.3. Presión osmótica	111
7.1.4.4. Humedad y desecación	112
7.1.4.5. Presencia de luz	112
7.1.5. Las bacterias y la ecología	113
7.2. ALGAS.....	114
7.3. PROTOZOOS.....	115
7.4. HONGOS	116
8. DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	117
8.1. ETAPA DE CARACTERIZACIÓN DE LOS CORTES SIN TRATAMIENTO	120

8.2. ETAPA DE IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS	120
8.2.1. Preparación del agar-agar	121
8.2.2. Preparación y siembra de cultivo	122
8.2.2.1. Condiciones para la preparación del medio de cultivo	122
8.2.2.2. Preparación de cultivo para muestras líquidas	123
8.2.2.3. Preparación de cultivo para muestras sólidas	124
8.2.2.3. Preparación del caldo	124
8.2.3. Identificación de colonias microbianas	126
8.2.3.1. Caracterización de los microorganismos	126
8.2.4. Aislamiento de microorganismos oil free y nativos	126
8.2.4.1. Preparación del medio BHB	131
8.2.4.2. Raspado o extracción de microorganismos	131
8.3. DISEÑO Y MONTAJE DE LOS BIORREACTORES	132
8.3.1. Adición de los microorganismos	133
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS	134
10. CONCLUSIONES	152
11. RECOMENDACIONES	154
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155
13. ANEXOS	159

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Composición por volumen de un suelo en buen estado para el crecimiento vegetal	29
Figura 2. Perfil idealizado de un suelo en latitudes medias de clima húmedo	30
Figura 3. Lodo y piscina de cortes de perforación	37
Figura 4. Procesos de biodegradación	44
Figura 5. Proceso de la bioventilación	48
Figura 6. Proceso de biopilas	52
Figura 7. Procedimiento en el landfarming	54
Figura 8. Proceso de Flushing	58
Figura 9. Lavado de suelos.	59
Figura 10. Proceso de incineración	70
Figura 11. Proceso de solidificación / estabilización	71
Figura 12. Localización del pozo estratigráfico ANH-PATÍA -1ST-P	75
Figura 13. Columna estratigráfica en el pozo ANH-PATÍA-ST-P	78
Figura 14. Localización de pozo estratigráfico ANH-BVTURA-1-ST-P	80

Figura 15. Columna estratigráfica y espesores aproximados en el pozo estratigráfico ANH-BVTURA-1-ST-P	82
Figura 16. Clasificación De Los Residuos Peligrosos	87
Figura 17. Proceso en la Fitorremediación	99
Figura 18. Metabolismo Microbiano	101
Figura 19. Esquema de paredes de células Gram-positivas y Gram-negativas	105
Figura 20. Coloración de Gram y tinción de microorganismos	105
Figura 21. Curva de crecimiento bacteriano	107
Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de implementación de biorremediación	119
Figura 23. Identificación/Caracterización de microorganismos	121
Figura 24. Procedimiento de preparación Agar-Agar	122
Figura 25. Siembra de microorganismos Oil free	123
Figura 26. Métodos de rayado para la siembra	124
Figura 27. Dilución de la muestra en agua peptonada	125
Figura 28. Siembra de las muestras sólidas diluidas en agua peptonada	126
Figura 29. Muestras de microorganismos (hongos y bacterias)	126
Figura 30. Frotis o extendido del cultivo microbial	127
Figura 31. Aplicación de la técnica de tinción	128
Figura 32. Coloración de Gram sobre las láminas	129

Figura 33. Microorganismos en oil free	130
Figura 34. Microorganismos en cortes de perforación	130
Figura 35. Extracción de los microorganismos	131
Figura 36. Diseño de los biorreactores	132
Figura 37. Proceso de adición de microorganismos	133
Figura 38. Efecto de los microorganismos sobre el Bario	139
Figura 39. Efecto de los microorganismos sobre el Hierro Total	140
Figura 40. Efecto de los microorganismos sobre el Nitrógeno	140
Figura 41. Efecto de los microorganismos sobre el Aluminio	141
Figura 42. Efecto de los microorganismos sobre el Sulfuro - Sulfato	141
Figura 43. Efecto de los microorganismos sobre el Ca^{++}	142
Figura 44. Efecto de los microorganismos sobre el NaCl.....	142
Figura 45. Efecto de los microorganismos sobre el $CaCO_3$	143
Figura 46. Efecto de los microorganismos sobre el Cl^-	143
Figura 47. Efecto de los microorganismos sobre el pH.....	144
Figura 48. Efecto del oil free con respecto a una muestra control en un medio oxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-PATIA-1-ST-P.....	149
Figura 49. Efecto del oil free con respecto a una muestra control en un medio anoxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-PATIA-1-ST-P.....	149

Figura 50. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio anoxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA-1-ST-P (1)....150

Figura 51. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio oxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA -1-ST-P (1).....150

Figura 52. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio anoxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA -1-ST-P (2)...151

Figura 53. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio oxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA -1-ST-P (2).....151

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tratamientos alternativos de cortes de perforación	44
Tabla 2. Concentración máxima de metales pesados en la cal viva	72
Tabla 3. Proporciones de mezcla (todos los porcentajes son en peso)	73
Tabla 4. Formaciones geológicas de la cuenca ANH-PATÍA-1-ST-P.....	79
Tabla 5. Prognosis geológica pozo ANH-BVTURA-1-ST-P	83
Tabla 6. Parámetros objeto de monitoreo en cortes de perforación	93
Tabla 7. Límite del contenido total de metales (ppm) en los residuos mezclados con la tierra	93
Tabla 8. Nivel de regulación de una sustancia contaminante	94
Tabla 9. Técnicas de biorremediación	96
Tabla 10. Clasificación de las bacterias según fuentes de carbono y energía ...	109
Tabla 11. Clasificación de las bacterias según la tolerancia de oxígeno	110
Tabla 12. Humedad del suelo y número de bacterias	112
Tabla 13. Grupos microbianos en el perfil del suelo	113
Tabla 14. Efecto de la materia orgánica sobre las bacterias	114
Tabla 15. Análisis físico-químico de cortes de perforación. Pozo ANH-PATIA 1	135

Tabla 16. Análisis físico-químico de lixiviados. Pozo ANH-PATIA 1	135
Tabla 17. Biorremediación en cortes de perforación de Patía 1	136
Tabla 18. Análisis físico-químico de cortes de perforación. Pozo ANH-BUENAVENTURA 1	136
Tabla 19. Análisis físico-químico de cortes de perforación. Pozo ANH-BUENAVENTURA 1	137
Tabla 20. Biorremediación en cortes de perforación de B/vtura 1	137
Tabla 21. Biorremediación en cortes de perforación de B/vtura 2	138

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE BIORREMEDIACIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN EN LODOS BASE AGUA DE POZOS ESTRATIGRÁFICOS PROFUNDOS*

AUTORES: INGRID CAROLINA CÓRDOBA RÍOS**
YENYFER YAMILE VALLEN VARGAS**

PALABRAS CLAVE: Biorremediación, cortes de perforación, residuos, tratamiento, microorganismos, bacterias, biodegradación, Norma Luisiana 29B.

El empleo de la biorremediación en la actualidad está enfocado hacia el tratamiento de ambientes (suelos y afluentes) que han sido contaminados por crudo y metales pesados. El presente trabajo de investigación desea mostrar que esta técnica biológica, amigable con el ambiente y sin efectos secundarios, junto con sus procesos, abarca muchas más áreas de estudio y puede ser la solución al problema de efectuar un verdadero tratamiento a los cortes de perforación, ya sean con lodos base agua o base aceite.

El enfoque de esta investigación es mostrar mediante pruebas de laboratorio (físico-químicas), que los cortes resultantes de la perforación con lodos base agua a los que se les aplicó microorganismos provenientes del inóculo de estudio (oil free), sufrieron cambios positivos, de la misma manera a los que se estabilizaron con cal viva, lo cual deja en evidencia que la biorremediación al nivelar los niveles de pH y ejercer control sobre parámetros como el contenido de sulfuros, hierro total, bario, carbonatos de calcio, conductividad deja los suelos en condiciones más aptas para su posterior aprovechamiento.

El uso de microorganismos y/o plantas para el tratamiento de aquellos lugares que han sido alterados no solo implica el estudio del tipo de contaminante sino también el análisis de la zona que ha sido afectada, es decir, sus condiciones de humedad, pH, temperatura ya que de ello depende en gran medida el éxito de la aplicación de esta técnica.

* Trabajo de grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director M.Sc. Olga Ortiz Cancino. Codirector Alexander Beltrán Barrera

ABSTRACT

TITLE: FEASIBILITY STUDY FOR BIOREMEDIATION OF DRILLING CUTTINGS IN WATERBORNE MUD OF DEEP STRATIGRAPHIC WELLS*

AUTHORS: INGRID CAROLINA CORDOBA RIOS**
YENYFER YAMILE VALLEN VARGAS**

KEYWORDS: Bioremediation, drill cuttings, waste, treatment, microorganisms, bacterium, biodegradation, Louisiana Rule 29B.

The use of bioremediation is currently focused on the treatment of environments (soils and streams) that have been contaminated with oil and heavy metals. This research wants to show that this biological technique, friendly with the environment and no side effects, along with its processes, covers many more fields of study and may be the solution to the problem of makes a real treatment to the drilling cuttings, whether using water based or oil based muds.

The approach of this research is to show by laboratory tests (physical and chemical), that the cuts resulting from water-based drilling muds based muds which were applied microorganisms from the study (oil free) were suffer positive changes, in the same way those who were stabilized with quicklime, which shows clearly that the bioremediation leveling the pH levels and having control over parameters such as sulfur content, total iron, barium, calcium carbonates, conductivity leaves the soils in better conditions and more suitable for further use.

The use of microorganisms and / or plants for the treatment of those places that have been altered, not only involves the study of the nature of the contaminant it also involves the analysis of the area that has been affected, that is to say, the conditions of wet, pH, temperature, since it largely depends on the successful application of this technique.

* Degree project

** Faculty physic chemical engineering, petroleum engineering school. Dirs. M. Sc. Olga Ortiz Cancino. Alexander Beltrán Barrera

GLOSARIO

ABSORCIÓN: es la operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido con el cual forma solución; movimientos de sustancias hacia el interior de la célula.

ADSORCIÓN: fenómeno de superficie por el que las moléculas sólidas, líquidas o gaseosas quedan retenidas en la interfase.

AGAR-AGAR: químicamente el agar es una mezcla heterogénea de dos clases de polisacáridos: agarpectina y agrosa. Aunque ambas clases de polisacáridos comparten el mismo esqueleto de galactosa, la agarpectina está modificada con grupos ácidos, tales como sulfato y piruvato. Disuelto en agua caliente y enfriado se vuelve gelatinoso. Su uso principal es como medio de cultivo en microbiología.

AUTOCLAVE: es un instrumento habitual en los laboratorios de cultivo in vitro. En esencia el autoclave es un recipiente en el que se consigue exponer el material a esterilizar a temperaturas superiores a la de ebullición del agua, gracias al aumento de presión.

BHB (BRAIN HEART BROTH): (caldo de cerebro –corazón) es un medio para microorganismos exigentes. Es muy rico en nutrientes, que proporciona un adecuado desarrollo microbiano.

CUENCA: es una depresión rellenada durante o posterior a su desarrollo sufriendo cambios durante estos procesos.

CULTIVO: es la forma en la que se hacen crecer los microorganismos (colonias) en una superficie sólida o en medio líquido (caldo) e incluso en células (línea celular).

DISPOSICIÓN FINAL: es el proceso de aislar y confinar los residuos o desechos peligrosos, en especial los no aprovechables, en lugares especialmente seleccionados, diseñados y debidamente autorizados, para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente.

ENZIMAS: son sustancias de naturaleza proteica que se destacan por catalizar reacciones bioquímicas. Estas sustancias actúan sobre distintos sustratos (proteínas, grasas, hidratos de carbono, etc.) convirtiéndolos en diferentes moléculas inocuas.

FORMACIÓN: es una unidad litoestratigráfica formal que define cuerpos de rocas caracterizados por unas propiedades litológicas comunes (composición y estructura) que las diferencian de las adyacentes.

GENERADOR: cualquier persona cuya actividad produzca residuos o desechos peligrosos. Si la persona es desconocida será la persona que está en posesión de estos residuos. El fabricante o importador de un producto o sustancia química con propiedad peligrosa.

GESTIÓN INTEGRAL: conjunto articulado e interrelacionado de acciones de política, normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de evaluación, seguimiento y monitoreo desde la prevención de la generación hasta la disposición final de los residuos o desechos peligrosos, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región.

MANEJO INTEGRAL: es la adopción de todas las medidas necesarias en las actividades de prevención, reducción y separación en la fuente, acopio, almacenamiento, transporte, aprovechamiento y/o valorización, tratamiento y/o disposición final, importación y exportación de residuos o desechos peligrosos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para proteger la

salud humana y el ambiente contra los efectos nocivos temporales y/o permanentes que puedan derivarse de tales residuos o desechos.

MEDIO DE CULTIVO: consta de un gel o una solución (caldos) que cuenta con los nutrientes necesarios para permitir, en condiciones favorables de pH y temperatura, el crecimiento de virus, microorganismos, células, tejidos vegetales o incluso pequeñas plantas.

METABOLISMO: es una serie de procesos químicos que tienen lugar dentro de una célula. La palabra se deriva del griego “*metabole*” que significa cambio, aunque la célula parece una estructura fija, estable, es en realidad dinámica y está en constante actividad.

POZOS ESTRATIGRÁFICOS: Son pozos que se perforan únicamente con el objetivo de obtener información geológica de las formaciones que son atravesadas durante la perforación.

RECEPTOR: titular autorizado para realizar las actividades de almacenamiento, aprovechamiento y/o valorización (incluida la recuperación, el reciclado o la regeneración), el tratamiento y/o la disposición final de residuos o desechos peligrosos.

REMEDIACIÓN: conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para reducir o eliminar los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos.

TRATAMIENTO: es el conjunto de operaciones, procesos o técnicas mediante los cuales se modifican las características de los residuos o desechos peligrosos, teniendo en cuenta el riesgo y grado de peligrosidad de los mismos, para incrementar sus posibilidades de aprovechamiento y/o valorización o para minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo, como consecuencia de los residuos generados por la industria petrolera (lodos y cortes de perforación) ha condicionado a esta industria a estrictos controles sobre la disposición final y el posterior tratamiento que se hace de dichos desechos, porque los tipos de contaminantes y sus orígenes condicionan consecuencias, algunas expresadas en su inmediatez y otras a largo plazo con resultados devastadores.

La biorremediación nace como una rama de la biotecnología que consiste en la aplicación de métodos biológicos, en este caso de estudio; microorganismos, para recuperar aquellos ecosistemas que han sido modificados por las actividades del hombre y sin generar en tiempos futuros efectos secundarios.

En el siguiente trabajo de investigación se realiza un estudio a nivel de laboratorio en el cual se busca emplear la biorremediación como una técnica alternativa para el tratamiento de cortes de perforación en lodos base agua, dado que convencionalmente lo que se hace es adicionar cal viva a las piscinas para deshidratar el corte y regular los niveles de conductividad y de pH del suelo.

Como es sabido, la biorremediación nació y se ha aplicado a nivel mundial para la recuperación de ambientes que han sufrido derrames de hidrocarburos y para la remoción de metales pesados de efluentes y suelos.

Aunque los cortes, generados de la perforación con lodos base agua no impliquen un peligro inminente, esto no significa que no se les preste la atención que ameritan; esto se debe a, que para garantizar una óptima perforación, el lodo además de llevar agua y bentonita, lleva consigo productos químicos como surfactantes, densificantes, polímeros y geles que afectan de una u otra manera el equilibrio físico-químico del suelo.

A través del empleo de microorganismos se da a conocer que ellos a través de sus actividades metabólicas, no solo son efectivos en el rompimiento de largas y pesadas cadenas poliméricas, sino que también mediante el aislamiento y siembra de cultivos a diversas condiciones de disposición de oxígeno; los microorganismos, y para términos del presente trabajo, las bacterias; pueden resultar eficientes para el control de parámetros y devolver al suelo parte de sus características iniciales.

1. GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

1.1 EL SUELO

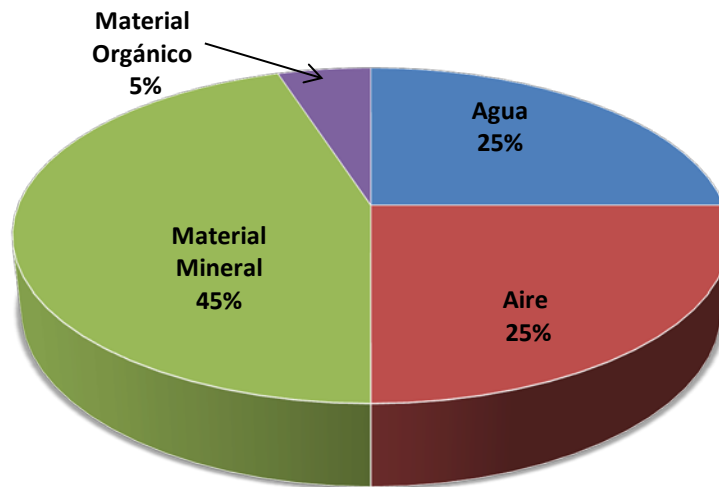
Es un material que se desarrolla en respuesta a interacciones ambientales complejas entre diferentes partes del sistema Tierra. Con el tiempo, el suelo evoluciona de manera gradual, dinámica y sensible hasta un estado de equilibrio con todos los aspectos de su entorno. Por tanto cuando se producen cambios ambientales, como por ejemplo en el clima, la cubierta vegetal o la actividad animal (incluida la humana), el suelo responde. Cualquiera de esos cambios produce una alteración gradual de sus características hasta alcanzar un nuevo equilibrio.

La superficie de la Tierra está cubierta por **regolito** (*rhegos = manta; lithos = piedra*), la capa de roca y fragmentos minerales producidos por meteorización. Algunos llaman suelo a este material, pero éste comprende más que la acumulación de restos meteorizados. El suelo es una combinación de materia mineral y orgánica, agua y aire; la porción de regolito que sustenta el crecimiento de las plantas.¹

Aunque las proporciones de los principales componentes que existen en el suelo varían, siempre están presentes los mismos cuatro componentes (figura 1). Alrededor de la mitad del volumen total de un suelo superficial de buena calidad está compuesto por una mezcla de roca desintegrada y descompuesta (materia mineral) y de **humus**, los restos descompuestos de la vida animal y vegetal (materia orgánica). La otra mitad consiste en espacios porosos entre las partículas sólidas donde circula el aire y el agua.

¹ TARBUCK E.J.; LUTGENS F.K. y Tasa, D. Ciencias de la Tierra. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed. Capítulo 6

Figura 1. Composición por volumen de un suelo en buen estado para el crecimiento vegetal.



Fuente: TARBUCK E.J.; LUTGENS F.K. y Tasa, D. Ciencias de la Tierra. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed. Capítulo 6. [Modificada por autores]

Factores formadores del suelo: el suelo es el producto de la interacción compleja de varios factores, entre ellos la roca madre, el tiempo, el clima, las plantas y los animales, y la topografía, estos factores son interdependientes.

1.1.2 El perfil del suelo. A medida que las partículas de la roca se desintegran y se mezclan con los residuos vegetales y animales, se forman las diferentes capas del suelo.²

Dado que los procesos de formación del suelo actúan desde la superficie hacia abajo, las variaciones de composición, textura, estructura y color evolucionan de manera gradual a diversas profundidades. Estas diferencias verticales, que normalmente van siendo más pronunciadas conforme pasa el tiempo, dividen el

² FUNACH-ASCAPAM Unión Temporal. EL SUELO Propiedades físicas-químicas Conservación. Mocoa, 2002

suelo en zonas o capas conocidas como **horizontes**. En la figura 2 se representa una visión idealizada de un perfil de suelo bien desarrollado en el cual identifican cinco horizontes. Desde la superficie hacia abajo, se designan como **O, A, E, B y C**. Estos cinco horizontes son comunes en los suelos de las regiones templadas. Las características y la extensión del desarrollo de los horizontes varían de unos ambientes a otros.

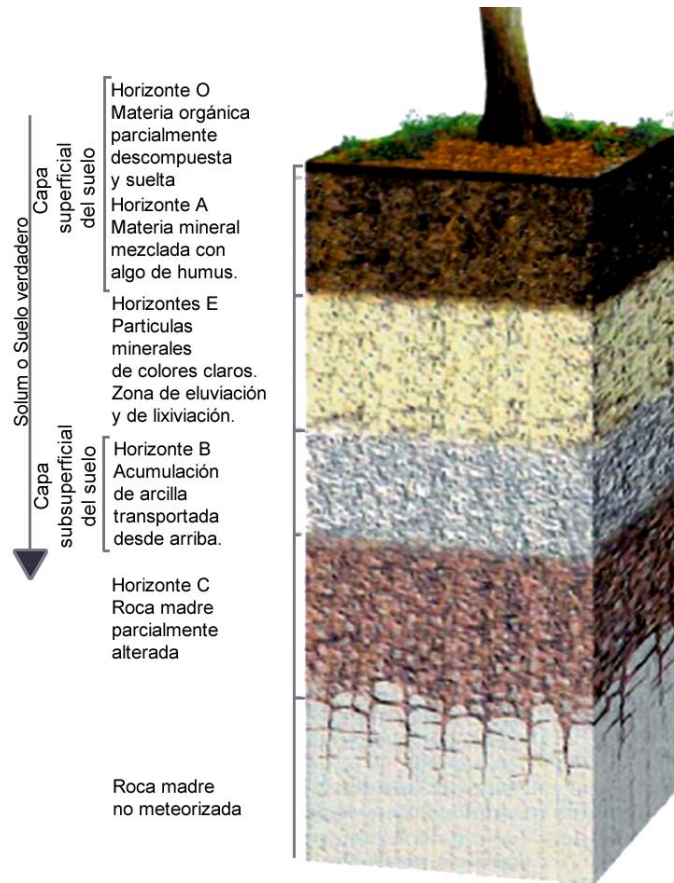
- **Horizonte O:** consiste en gran medida en material orgánico.
- **Horizonte A:** zona compuesta en gran medida por material mineral; sin embargo la actividad biológica es alta y generalmente hay humus.
- **Horizonte E:** capa de color claro que contiene poca materia orgánica. Conforme el agua percola a través de esta zona, transporta las partículas más finas.
- **Horizonte B:** o capa superficial del suelo. Gran parte del material extraído del horizonte E mediante eluviación se deposita en el horizonte B, al que se suele hacer referencia como la **zona de acumulación**.
- **Horizonte C:** capa caracterizada por roca madre parcialmente alterada.

Los horizontes O y A constituyen lo que se denomina normalmente **capa superficial del suelo**.

Los horizontes O, A, E y B juntos constituyen el **solum**, o “suelo verdadero”. En el cual son activos los procesos formadores del suelo y donde están en gran medida confinadas las raíces vivas y otros tipos de vida animal y vegetal.³

³ TARBUCK E.J.; LUTGENS F.K. y Tasa, D. Ciencias de la Tierra. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed. Capítulo 6

Figura 2. Perfil idealizado de un suelo en latitudes medias de clima húmedo.



Fuente: TARBUCK E.J.; LUTGENS F.K. y Tasa, D. Ciencias de la Tierra. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed. Capítulo 6. [Modificada por autores]

1.2 FACTORES DE CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

Las sustancias que llegan al suelo tienen diversas procedencias, unas veces son consecuencia de actividades naturales, y otras como producto de actuaciones humanas.

En ambos casos, las sustancias pueden llegar a la superficie o al interior del perfil. A la superficie llegan, en su mayor parte, por deposiciones naturales, vertidos antrópicos, deposición aérea, lluvia y deposición fluvial. En el interior del suelo los

contaminantes proceden de infiltrados, transformaciones *in situ*, o ascenso capilar de capas freáticas más profundas.

Los contaminantes, una vez depositados en superficie, pueden volatilizarse, infiltrarse, biodegradarse o ser trasladados a otras zonas por organismos vivos o por escorrentía. Las sustancias que se infiltran pueden atravesar el sustrato sin reacción con los constituyentes del suelo, o interaccionar con ellos, en este caso, los elementos extraños pueden ser neutralizados, degradados, adsorbidos o precipitados. Como resultado final se produce la retención de las sustancias o su movilización, bien en el interior del suelo, bien a través de sus lixiviados a las capas freáticas.

El movimiento y destino del compuesto a lo largo del perfil está condicionado por numerosos y complejos procesos físicos, químicos y biológicos. Las relaciones entre el tamaño y composición de los agregados del suelo, el grado de humectación del medio, o las características del fluido, condicionan procesos de transporte, disolución, transformación o retención que tienen lugar en el interior del suelo. Sin olvidar que estos procesos se realizan con la intervención del agua del suelo; medio que los contaminantes utilizan para su movilización, y es el agua junto a la temperatura, quienes determinarán las reacciones que tienen lugar.

Tres son los procesos que pueden darse en el suelo ante la llegada del nuevo elemento: transporte, retención y transformación.

1.2.1 Transporte. El transporte de contaminantes en el suelo depende, en gran medida, de cómo es el movimiento del agua en su interior, es decir, de su evolución espacial y temporal en el terreno. Los contaminantes se encuentran en el suelo en diferentes fases, por lo que su desplazamiento en él está condicionado por la movilidad de estas fases y por la interacción entre ellas. Además, la difusión

iónica o molecular contribuye al movimiento de las especies químicas desde áreas de concentraciones mayores a áreas de concentraciones menores.

La difusión molecular o iónica es uno de los mecanismos más importantes de transporte de contaminantes en los suelos donde el flujo de agua es pequeño.

De acuerdo con la primera ley de Fick, el movimiento de solutos a través de medios porosos por difusión de una solución libre (entendiendo por solución libre aquella que no está afectada por fuerzas externas distintas de la gravedad), es directamente proporcional al gradiente de concentración, al área de sección del poro y al tiempo, pudiéndose expresar por la siguiente ecuación:

$$J_{dif} = -D_o \frac{\partial C}{\partial x}$$

Donde:

J_{dif} : Densidad de flujo o velocidad de transporte expresada como unidad de masa por unidad de área y por unidad de tiempo ($ML^{-2}T^{-1}$)

D_o : Coeficiente de difusión molecular de una solución libre (L^2T^{-1})

C : Concentración del contaminante (ML^{-3})

x : Distancia en la que tiene lugar la transferencia (L).

El cociente $\frac{\partial C}{\partial x}$ es el gradiente de concentración, y está afectado por el signo menos debido a que la transferencia tiene lugar en el sentido de las concentraciones decrecientes.

Esta ecuación es aplicable asumiendo que el medio está formado por una matriz sólida continua, y que la geometría de los poros no varía durante el proceso de transferencia. Sin embargo, el suelo es un sistema poroso complejo: las diferencias en los diámetros, la tortuosidad de los recorridos, las distintas composiciones de los agregados, las proporciones elevadas de huecos producidos

por grietas, raíces o túneles de lombrices, hace que tenga un comportamiento frente al agua diferente del de una matriz rígida.⁴

1.2.2 Retención. También conocida con el nombre de sorción, tiene una relación directa con la biodisponibilidad y la degradación de los elementos tóxicos.⁵

Cuando un compuesto llega al suelo, en función de sus características, ocupa un lugar en alguna fase del sistema. Es en la fase sólida donde tienen lugar los procesos más complejos de adaptación y son, fundamentalmente, los minerales de la arcilla y la materia orgánica los constituyentes más activos, al presentar cargas en la superficie que permiten la unión con los compuestos químicos incorporados.

Este fenómeno superficial tiene lugar cuando el elemento sólido del suelo no está eléctricamente neutro y tiende a ganar o perder electrones para alcanzar el equilibrio. El tipo de estructura, el grado de alteración, o la facilidad de disociación de los grupos funcionales, son los factores que determinaran el grado de unión que se produce.

Son diversos los mecanismos que tienen lugar en el interior del suelo para la retención de compuestos químicos, aunque los más importantes, por afectar a muchos compuestos, son la adsorción y el intercambio iónico.

La adsorción se define como la asociación de sustancias, ya sean moléculas, átomos o iones, a las superficies de los receptores (interfase sólido-líquido). En los mecanismos que dan lugar a esta asociación se encuentran implicadas: fuerzas de Van der Waals, y/o fuerzas de enlace por puentes de hidrógeno, cuando se trata de moléculas, y enlace iónico y/o enlace covalente, para el caso de átomos o iones.

⁴LÓPEZ LAFUENTE, Antonio. Biorremediación Y fitorremediación En Suelos Contaminados. P.72

⁵ALEXANDER, M. (1994): Biodegradation and bioremediation. *Academic Press*, San Diego.

El segundo mecanismo de importancia en la retención de elementos contaminantes es el del intercambio iónico, por el cual el ión de un mineral es reemplazado por otro ión que esté en la solución del suelo, en otras palabras, contaminantes en la fase líquida pueden sustituir a iones estructurales de una sustancia mineral.

Además de los procesos de adsorción e intercambio, la precipitación química es otro de los mecanismos que intervienen en la retención. Ésta adquiere importancia en suelos muy contaminados, en los que la concentración del elemento supera su producto de solubilidad, originando un nuevo compuesto cristalino.

1.2.3 Transformación. En el suelo se producen numerosos procesos de transformación, por ellos el suelo alcanza desarrollos sucesivos a lo largo del tiempo y evoluciona hacia formas más complejas de organización, o hacia estadios más avanzados de alteración.

Mineralización, meteorización, humificación, cementación, son algunos de los procesos transformadores que modifican las características del medio. Hidrólisis, hidratación, oxidación, reducción, dehalogenación, demetilación, nitrificación, son algunas de las reacciones que tienen lugar entre los constituyentes del suelo.

- La mineralización es una transformación completa de elementos orgánicos en formas inorgánicas, como resultado de la actividad de los microorganismos. Su estudio está generalmente dirigido a caracterizar los caminos y la cinética de degradación química de los compuestos. Identificar los procesos que tienen lugar en las etapas intermedias de alteración, señalar los compuestos que se obtienen y determinar las variaciones en función de las condiciones ambientales, es necesario para identificar la especie química y valorar su toxicidad.

- Este proceso implica cambios en la complejidad química de la materia orgánica que hace aumentar la resistencia a la biodegradación.⁶

El término **humus**, producto de la humificación, se utiliza en sentido amplio para indicar las sustancias orgánicas que resultan como consecuencia de la alteración de los restos orgánicos.

En la humificación pueden tener lugar reacciones químicas (oxidación, condensación y polimerización), procesos biológicos y de síntesis microbiana, conformación de compuestos que no se forman en las células vivas y que son constituyentes típicos del suelo.

Su estudio es imprescindible para conocer los procesos de transformación y determinar los caminos que pueden seguir los contaminantes orgánicos que llegan al suelo, así como la influencia de la materia orgánica en los procesos de biorremediación.

⁶ TATE, R. L. (1987): Soil Organic Matter. Biological and Ecological Effects. John Wiley and Sons, p. 291. New York.

2. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN

La actividad de perforación de pozos petroleros genera desechos líquidos y sólidos que por sus características físico-químicas constituyen una fuente de contaminación para el ambiente en el cual se desarrollan.

Los residuos generados durante la actividad de perforación presentan dos fases, una líquida constituida por lodo de perforación y otra sólida, formada por los cortes de perforación, como se puede apreciar en la figura 3. Los cortes adquieren muchas de las características del lodo y por ende constituyen un desecho de difícil manejo y disposición al medio ambiente. Adicionalmente, durante la perforación se generan volúmenes de aguas utilizadas en el lavado de equipo, bombas de lodo, enfriamiento de motores y otros equipos, agua de lluvia contaminada, etc. El lodo de perforación, pasa a ser desecho una vez que culmina su vida útil, cuando se descarta por tasa de dilución diaria o por derrame en la localización.

Figura 3. Lodo y piscina de cortes de perforación



Fuente: Autores

Los residuos generados poseen características físico-químicas que se derivan básicamente del tipo de fluido de perforación utilizado; en Colombia, en su mayoría, los lodos utilizados se clasifican en base agua y base aceite (invertido y 100% aceite) y los mismos son el principal contaminante de las aguas y los sólidos generados durante la perforación.⁷

2.1 DEFINICIÓN DE LODO DE PERFORACIÓN

Se denomina lodo de perforación a un fluido con características físicas y químicas necesarias para facilitar el desarrollo de una operación de perforación minimizando los problemas concernientes a la estabilidad del pozo, y demás problemas operacionales. Estos fluidos se preparan con ciertos aditivos, teniendo en cuenta las formaciones que se planean perforar.

2.2 FUNCIONES DEL LODO DE PERFORACIÓN⁸

Las funciones del lodo de perforación describen las tareas que el fluido de perforación es capaz de realizar, aunque algunas de estas no sean esenciales en cada pozo. La remoción de los recortes del pozo y el control de las presiones de formación son funciones sumamente importantes. Aunque el orden de importancia sea determinado por las condiciones del pozo y las operaciones en curso, las funciones más comunes del fluido de perforación se encuentran mencionadas a continuación.

2.2.1 Remoción de los recortes del pozo. Los recortes de perforación deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la broca. Para esto, se hace

⁷ VERACIERTA ALFARO, Luis Emilio. Evaluación De Las Técnicas Realizadas Por El Centro De Tratamiento Y Recuperación De Desechos En El Campo Hamaca, Estado Anzoátegui. Maturín, Febrero De 2006

⁸ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

circular un fluido de perforación dentro de la columna de perforación y a través de la barrena, el cual arrastra y transporta los recortes hacia la superficie, subiendo por el espacio anular. La remoción de los recortes depende del tamaño, forma y densidad de los recortes, unidos a la velocidad de penetración (ROP); de la rotación de la columna de perforación; y de la viscosidad, densidad y velocidad del fluido de perforación en el anular.

2.2.2 Control de las presiones de la formación. A medida que la presión de la formación aumenta, se incrementa la densidad del fluido de perforación para equilibrar las presiones y mantener la estabilidad del pozo. Esto impide que los fluidos de la formación fluyan hacia el pozo y causen un reventón.

2.2.3 Suspensión y descarga de recortes. Los lodos de perforación deben suspender los recortes de perforación, los materiales densificantes y los aditivos bajo una amplia variedad de condiciones, sin embargo deben permitir la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos. Los recortes de perforación que se sedimentan durante condiciones estáticas pueden causar puentes y rellenos, los cuales por su parte, pueden producir el atascamiento de la tubería o la pérdida de circulación. El material densificante que se sedimenta constituye un asentamiento y causa grandes variaciones de la densidad del fluido del pozo.

2.2.4 Obturación de las formaciones permeables. La permeabilidad se refiere a la capacidad de los fluidos de pasar a través de formaciones porosas; las formaciones deben ser permeables para que los hidrocarburos puedan ser producidos. Cuando la presión de la columna de lodo es más alta que la presión de la formación, el filtrado invade la formación y un revoque se deposita en la pared del pozo. Los sistemas de fluido de perforación deberían estar diseñados

para depositar sobre la formación un delgado revoque de baja permeabilidad con el fin de limitar la invasión de filtrado. Esto mejora la estabilidad del pozo y evita numerosos problemas de perforación y producción tales como, condiciones de pozo reducido, daños a la formación, entre otros.

2.2.5 Mantenimiento de la estabilidad del pozo. La estabilidad del pozo constituye un equilibrio complejo de factores mecánicos (presión y esfuerzo) y químicos. La composición química y las propiedades del lodo deben combinarse para proporcionar un pozo estable hasta que se pueda introducir y cementar la tubería de revestimiento. Independientemente de la composición química del fluido y otros factores, el peso del lodo debe estar comprendido dentro del intervalo necesario para equilibrar las fuerzas mecánicas que actúan sobre el pozo.

2.2.6 Minimización de los daños a la formación. La protección del yacimiento contra daños que podrían perjudicar la producción es muy importante. Cualquier reducción de la porosidad o permeabilidad natural de una formación productiva es considerada como daño a la formación. Estos daños pueden producirse por la obturación causada por el lodo o sólidos de perforación, o de las interacciones químicas y mecánicas con la formación. El daño a la formación es generalmente indicado por un valor de daño superficial o por la caída de presión que ocurre mientras el pozo está produciendo.

2.2.7 Enfriamiento, lubricación y sostenimiento de la broca de perforación. Las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan una cantidad considerable de calor por fricción en la barrena y en las zonas donde la sarta de perforación roza contra la tubería de revestimiento y el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la barrena y la sarta de perforación. Además de enfriar, el fluido de perforación lubrica la sarta de perforación, reduciendo aún más el calor por fricción. Los

motores de fondo y los componentes de la sarta de perforación fallarían más rápidamente si no fuera por los efectos refrigerantes y lubricantes del fluido de perforación.

2.3 COMPOSICIÓN DEL LODO DE PERFORACIÓN

La composición del lodo de perforación usado en un pozo, es determinada por las condiciones del fondo del pozo y el tipo de formación que se va a perforar. Debe hacerse un análisis puesto que hay dos factores que complican la decisión de la selección. Estos factores son:

- Baja viscosidad y poco peso en el lodo de perforación, con esto se logra una mayor rata de penetración.
- Alta viscosidad y mucho peso en el lodo de perforación sirven para controlar mejor los efectos de ciertos parámetros en el fondo del pozo; tales como entrada de fluido de alta presión dentro del hueco conocida como arremetida. Estos efectos pueden causar desastres como el caso de un reventón.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN

En general, los fluidos de perforación pueden dividirse en tres categorías dependiendo de la fase continua que los conforma y su uso está condicionado al tipo de formación a perforar. Estos son: fluidos base agua, fluidos base aceite y fluidos neumáticos.

2.4.1 Lodos de perforación base agua. Son aquellos fluidos cuya fase continua es agua (dulce o salada), junto con aditivos químicos y bentonita, que se determinan por las condiciones del fondo del pozo. Estos sistemas se consideran

muy versátiles, sencillos y tiene un bajo costo comparado con otros sistemas de lodos. Se utilizan básicamente para perforar formaciones no reactivas, productoras y no productoras de hidrocarburos.⁹

2.4.2 Lodos de perforación base aceite. Estos sistemas de fluidos son una mezcla de sustancias con determinadas propiedades que se agregan a una emulsión en donde la fase dispersa corresponde al agua y la fase continua al aceite (diesel o petróleo crudo). Este tipo de fluidos no son afectados por las formaciones sensibles al agua, minimizan la corrosión en la sarta de perforación y básicamente se utilizan cuando se perforan formaciones reactivas y productoras. Se debe tener precaución en su uso debido a su alto grado de contaminación.¹⁰

2.4.3 Lodos neumáticos. Son poco utilizados. La ventaja principal de este tipo de fluido es el incremento en la rata de penetración, además se requiere el uso de compresores, que a la vez implica el empleo de menos equipo y espacio.

⁹RODRIGUEZ BERMUDEZ, Eliserio. Reestructuración Teórico - Práctica De La Guía De Laboratorio De Lodos Y Cementos. Tesis de pregrado. UIS.2007

¹⁰ BECARIA VALERO, Javier. MARTINEZ ARIAS, Carlos. Tratamiento De Ripios Producto De La Perforación Con Lodos Base Aceite. Tesis de posgrado. UIS. 1997

3. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE CORTES PARA SU DISPOSICIÓN FINAL

La contaminación de los suelos, del agua y del aire, son los factores de preocupación en cuanto a lo ambiental en la industria de los hidrocarburos, un ejemplo de ello, son los desechos producidos durante la perforación: lodos y cortes, que debido a su composición química no pueden ser arrojados de manera arbitraria, ya que poseen compuestos químicos como polímeros, emulsificantes, surfactantes que podrían ocasionar daños al medio ambiente; los cuales pueden verse reflejados a corto o largo plazo e involucrarían problemas tanto económicos como penales.

Para ello, se dispone de tecnologías que resultan útiles en el tratamiento de residuos sólidos contaminados, las cuales han sido agrupadas de distintas maneras por diferentes investigaciones. En la tabla 1 se categorizan las tecnologías de tratamientos alternativas que existen en la actualidad.

3.1 TRATAMIENTOS EX SITU E IN SITU¹¹

Ahora bien, se debe de ser conscientes que el estudio de las cinéticas de transformación es complejo, tanto si se hace *in situ* como si se hace *ex situ*. Por ejemplo, una de las principales limitaciones de los estudios en el laboratorio para caracterizar las reacciones de transformación es que la velocidad de degradación está condicionada por las condiciones particulares que se plantean en la incubación de la muestra. Si las condiciones son ideales, pH, humedad, temperatura, etc., se puede obtener un potencial de degradación para un compuesto que no representa las condiciones naturales. Si por el contrario se

¹¹ LÓPEZ LAFUENTE, Antonio. Biorremediación y fitorremediación en suelos contaminados

realizan las experiencias en el campo, las condiciones experimentales son difícilmente generalizables, ya que la variabilidad es muy grande y condiciones puntuales hacen variar en gran medida los resultados. Por ello, es necesario la utilización de ambas técnicas para obtener un número suficientemente elevado de datos, que permita modelizar los resultados y realizar previsiones válidas de cuál será el destino de los contaminantes en el suelo. De cualquier forma, hay que resaltar la capacidad autorreguladora que tiene el suelo, la actividad biológica, con alrededor de 1010 bacterias y hongos por gramo de suelo, la actividad química y la capacidad de filtración que favorece la adsorción y el intercambio, hace que en el suelo tengan lugar los procesos cuantitativamente más importantes en la degradación de contaminantes.

Tabla 1. Tratamientos alternativos de cortes de perforación

CATEGORÍA GENERAL	TIPO DE PROCESO	TECNOLOGÍA IN-SITU	TECNOLOGÍA EX-SITU
TRATAMIENTO	BIOLÓGICO	Biodegradación pasiva	Biopilas
		Bioventilación	Landfarming
		Biodegradación in-situ	Biodegradación en suspensión
	FÍSICO	Ventilación de suelos	Lavado de suelos
		Flushing	Aglomeración con alquitrán de carbón
	QUÍMICO	Degradación química	Extracción con solventes
	TÉRMICO	Calentamiento con radiofrecuencia	Desorción térmica
CONFINAMIENTO	OTROS	Vitrificación	
		Capping	Estabilización /solidificación
			Microencapsulamiento
			Microconfinamiento
	Landfilling		

Fuente: ORTIZ BERNAD, Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana. Técnicas de recuperación de suelos contaminados

3.2 TECNICAS DE BIOTRATAMIENTO

La biorrecuperación se define como todos aquellos tratamientos de recuperación que degradan contaminantes orgánicos o disminuyen la toxicidad de otros contaminantes inorgánicos como metales tóxicos a través de la actividad biológica natural, principalmente la de los microorganismos, como se puede observar en la figura 4; mediante reacciones que forman parte de sus procesos metabólicos. Estos tratamientos utilizan bacterias, hongos y plantas para detoxificar las sustancias de riesgo para el hombre y el medio ambiente. Para que los tratamientos de biorrecuperación de suelos sean efectivos no solo hay que tener en cuenta factores biológicos, como la existencia de poblaciones microbianas susceptibles de transformar los contaminantes, la presencia de nutrientes y oxígeno u otros aceptores de electrones alternativos, sino también factores ambientales como el tipo de suelo, la temperatura y el pH.

Procesos in situ: La principal ventaja de los tratamientos biológicos in situ a los ex situ es que el suelo no tiene que ser excavado ni transportado, con lo que los costos se elevarían. Sin embargo, generalmente requieren más tiempo para su desarrollo, están sujetos a la heterogeneidad de las características de los suelos y acuíferos y su eficacia es más difícil de verificar.

Figura 4. Procesos de biodegradación



Fuente: MAROTO, María Esther. ROGER, Juan Manuel. Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos.2000

Algunas sustancias se biodegradan más que otras y en menos tiempo. Este proceso recibe el nombre de degradación primaria. Generalmente estas moléculas son elementos intermedios en el proceso de biodegradación final, pero en algunos casos, puede ser más persistente o más tóxicas que el contaminante original.

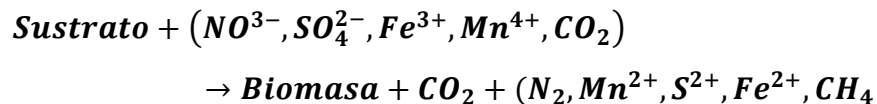
Las condiciones pueden ocurrir en condiciones tanto oxigénica (con oxígeno) como anoxigénicas (sin oxígeno). Si el contaminante se encuentra bien disuelto en el agua, normalmente hay más oxígeno disponible para la biodegradación aerobia. El lodo a base agua se dispersa más fácilmente pues es soluble en agua. Los cortes con petróleo no se dispersan tan bien, y tienden a establecerse en una pequeña área del lecho marino cerca del equipo de perforación. Esta alta concentración de material orgánico puede resultar en la generación de condiciones anoxigénicas cuando la rápida actividad bacteriana consume el oxígeno disponible en un área.¹²

Esquema de las reacciones de biodegradación:

Degradación oxigénica:



Degradación anoxigénica:



Las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación consisten principalmente en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana.

¹² MAROTO, María Esther. ROGER, Juan Manuel., “Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos” 2000

3.2.1 Biodegradación pasiva¹³. También llamada atenuación natural, se está utilizando cada vez más, dado que se trata de un método de recuperación de suelos y aguas contaminadas de bajo precio (Mulligan and Young, 2400). No obstante, a pesar de que puede ser utilizado en lugares muy variados, realmente se suele aplicar de forma individual puesto que es un tratamiento mucho más lento que los que utilizan tecnologías ingenieriles (Mulligan, 2001). De acuerdo con la USEPA (1999), la atenuación natural consiste en utilizar procesos naturales para contener la propagación de la contaminación procedente de los vertidos químicos y reducir la concentración y la cantidad de los agentes tóxicos en las zonas contaminadas.

Los procesos naturales a los que se acude para la restauración son los biológicos, como la biodegradación aerobia, anaerobia y co-metabólica, y procesos físico-químicos como la volatilización, dispersión, dilución, desintegración radioactiva, estabilización química y bioquímica, precipitación y sorción en partículas de materia orgánica y arcillas del suelo. El éxito de cada proceso de atenuación natural dependerá de las características geológicas, hidrológicas y microbiológicas de la zona afectada.

Las transformaciones y reacciones que tienen lugar durante los métodos abióticos dependen de las propiedades físico-químicas del contaminante y del suelo y, tanto para sustancias inorgánicas como orgánicas, incluyendo reacciones de hidrólisis y oxidación-reducción, formación de doble enlaces y dehidrohalogenación. Además de la biodegradación de compuestos orgánicos, los microorganismos pueden influir en la sorción de compuestos orgánicos y metales en suelos y sus productos pueden incluso actuar como quelantes de metales en suelos contaminados.

Para que la atenuación natural sea efectiva, es absolutamente necesario realizar un monitoreo constante durante todo el proceso natural. Para ello, resulta muy útil

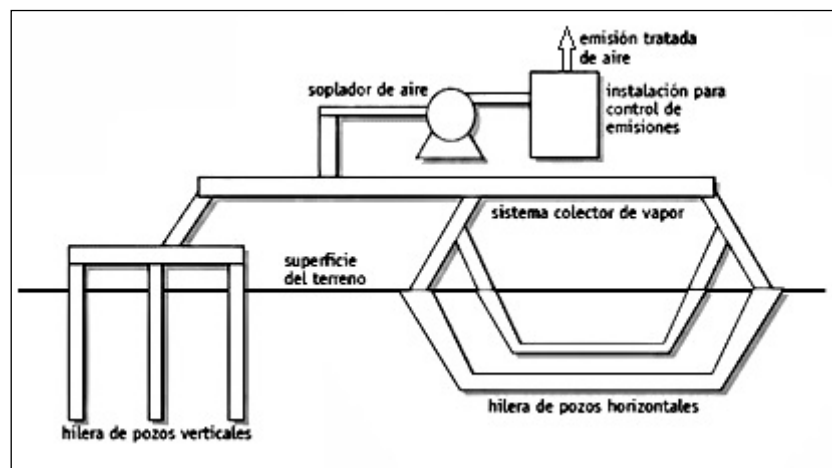
¹³ RINCON LIZCANO, Martha Cecilia.(2004). Estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental. Especialización en química ambiental. UIS. P.91

la realización de modelos que puedan predecir el comportamiento y transporte de los contaminantes.

3.2.2 Bioventilación (Bioventing). Es una técnica in situ de recuperación biológica que implica la inyección a través de pozos de aire (u oxígeno) y, si es necesario, también de nutrientes para estimular la actividad microbiana biodegradadora (Mihopoulos et al., 2001). Este tratamiento utiliza los microorganismos nativos para biodegradar compuestos orgánicos adsorbidos en los suelos de la zona no saturada, al contrario que el proceso de *biosparging* que realiza lo mismo pero en la zona saturada.

El bioventing es parecido a la extracción de vapor del suelo pero, a diferencia de este último, trata de potenciar lo más posible la biodegradación y minimizar la volatilización de los contaminantes. Cualquier sustancia biodegradable aeróbicamente es susceptible de ser tratada con bioventing.

Figura 5. Proceso de la bioventilación



Fuente: Técnicas de recuperación de suelos contaminados –Vigilancia Tecnológica

Debido a la aireación presente en el suelo se va a favorecer la degradación de los hidrocarburos por dos motivos: por la volatilización, facilitando la migración de la fase volátil de los contaminantes y por biodegradación, ya que al incrementar la oxigenación del suelo se va a estimular la actividad bacteriana.

La tecnología del bioventing ha sido satisfactoriamente utilizada en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo, disolventes no clorados, algunos pesticidas, conservantes de la madera y otros compuestos orgánicos. A pesar de no ser una técnica aplicable a la eliminación de compuestos orgánicos, la biorremediación puede ser usada para cambiar la valencia de algunos de estos compuestos para que puedan ser adsorbidos en el suelo o bioacumulados en micro y macroorganismos.

3.2.3 Biodegradación in-situ¹⁴. La biodegradación es el proceso por el cual microorganismos nativos o inoculados (bacterias y hongos) metabolizan los contaminantes orgánicos que se encuentran en suelos y/o agua subterránea, convirtiéndolos en productos finales inocuos. En este proceso, los contaminantes orgánicos son biotransformados porque generalmente los microorganismos pueden utilizarlos para su propio crecimiento como fuente de carbono y energía y, en el caso de que no sean capaces de crecer a partir de ellos, pueden seguir transformándolos si se les aporta un sustrato de crecimiento o co-sustrato.

Para el crecimiento de los microorganismos es necesaria la presencia de donadores y aceptores de electrones, una fuente de carbono y nutrientes (N, P, K, S, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu y elementos traza). El proceso más básico del metabolismo microbiano es la transferencia de electrones desde un sustrato donante hasta un sustrato aceptor. Los electrones son necesarios para oxidar (o reducir) los compuestos orgánicos, que son la fuente de carbono, a la forma química utilizada por los constituyentes celulares y para generar la energía necesaria que posibilite la síntesis y el mantenimiento de la biomasa.

¹⁴ ORTIZ BERNAD , Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana .
Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Fundación para el conocimiento madri+d. Cap.3. P.56

Además por compuestos naturales, los elementos requeridos para el crecimiento celular pueden ser aportados por muchos contaminantes orgánicos. La mayoría de los contaminantes orgánicos, típicamente alifáticos o aromáticos, contienen diferentes grupos funcionales (-OH, -Cl, -NH₂, -NO₂, -SO₃, etc.). Estos compuestos orgánicos, actuando como donadores de electrones, son oxidados durante el metabolismo microbiano para proporcionar energía para el crecimiento celular y en muchos casos terminan siendo mineralizados a dióxidos de carbono y agua. Algunos de los productos intermedios de esta oxidación pueden ser asimilados como fuente de carbono durante el crecimiento celular. Los grupos funcionales pueden ser utilizados como nutrientes o separados del esqueleto de carbono cuando los compuestos son oxidados o reducidos. Hay tres procesos por los cuales los microorganismos pueden biodegradar compuestos orgánicos: fermentación, respiración aerobia y respiración anaerobia. Durante la fermentación, los compuestos orgánicos son degradados mediante una serie de reacciones enzimáticas que no implican una cadena de transporte de electrones y pueden actuar como donadores de electrones o como aceptores.

Durante la respiración aerobia, los microorganismos utilizan el oxígeno como aceptor de electrones para la respiración microbiana. Cuando la respiración tiene lugar en condiciones anaerobias, el oxígeno es reemplazado por compuestos o elementos orgánicos o inorgánicos oxidados que pueden ser utilizados como aceptores de electrones alternativos, como el nitrato, iones metálicos (Fe (III), Mn (IV)), sulfato o dióxido de carbono. Por su parte, los compuestos orgánicos pueden ser metabolizados a metano, dióxido de carbono e hidrógeno. La biodegradación aerobia presenta las ventajas de que los organismos aerobios crecen más rápido que los anaerobios y pueden mantener tasas de degradación más elevadas pero requieren un constante suministro de oxígeno que en frecuentes ocasiones pueden limitar el proceso de biodegradación.

Cuando la biodegradación no se puede llevar a cabo de forma natural porque los microorganismos no disponen de los elementos esenciales para ello en la zona

contaminada, se requieren la intervención de actuaciones ingenieriles encaminadas a estimular la actividad microbiológica. Así la biodegradación asistida acelera las reacciones de biodegradación facilitando el crecimiento microbiano y optimizando las condiciones medioambientales de la zona donde los microorganismos deben llevar a cabo su función de descontaminación. Para que esta aproximación funcione, el contaminante no debe ser recalcitrante, es decir, los microorganismos deben tener la capacidad genética y fisiológica suficiente como para degradar la sustancia.

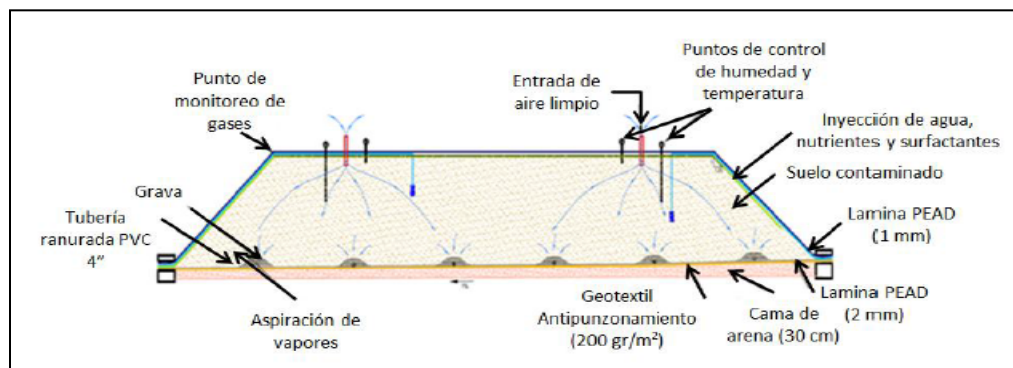
Fundamentalmente, la estimulación de la actividad microbiana natural (bioestimulación) se realiza mediante el control de parámetros como el potencial redox y las condiciones de humedad, y la adición de oxígeno u otros aceptores de electrones (como nitrato o sulfato) y nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo. Sin embargo, la adición de nitrógeno y fósforo no es estrictamente necesaria porque suele haber elevadas concentraciones de amonio en la mayoría de los suelos contaminados y el reciclado de fósforo entre suelo, agua y bacterias suele ser suficiente para soportar una limitada actividad microbiana.

3.2.4 Biopilas. Este tratamiento se utiliza especialmente para biodegradar compuestos del petróleo. Para ello, los suelos contaminados con estos compuestos orgánicos son apilados en montones o pilas sucesivas y se estimula la actividad microbiana aerobia mediante aireación y adición de nutrientes, minerales y agua, obteniendo la degradación a través de la respiración microbiana; como se puede apreciar en la figura 5. Las biopilas son similares al sistema de landfarming pero en este caso, la aireación del material no se consigue arando el terreno sino forzando la circulación de aire mediante su inyección o extracción a través de conductos perforados emplazados dentro de la pila de material. Estas pilas se suelen cubrir para prevenir la escorrentía, la evaporación y la volatilización y para promover el calentamiento por el sol. El periodo de tratamiento de esta tecnología biológica es corto, puede durar desde unas pocas semanas a unos pocos meses y además de compuestos del petróleo, también se

puede utilizar para compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y pesticidas (FRTR, 1999d; Mohn et al., 2001; Li et al., 2004; Plaza et al., 2005).

En otros tratamientos, la aplicación adecuada de esta técnica está controlada por las propiedades físicas de los suelos contaminados, de forma que los suelos más permeables permitirán una mejor circulación del aire, el agua y los nutrientes.

Figura 6. Proceso de biopilas



Fuente: VERACIERTA, Luis Emilio, "Evaluación de las técnicas realizadas por el centro de tratamiento y recuperación de desecho en el capo hamaca, estado Anzoátegui" 2006

Ventajas de las biopilas:

- Los contaminantes se destruyen en vez de pasar a otra condición
- El diseño y construcción son relativamente fáciles
- El saneamiento del suelo se lleva a cabo en un periodo entre 3 y 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y del tipo de suelo.
- El suelo saneado mediante biopilas no requiere ser confinado después.
- Las biopilas ofrecen un costo más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

Limitaciones:

- Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de cinco y seis anillos difícilmente degradables en las biopilas
- Las biopilas no son efectivas para concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) superiores a 50000 mg/Kg.
- La presencia de metales pesados pueden inhibir el crecimiento de microorganismos.

3.2.5 Landfarming. Se trata de un tratamiento de recuperación biológica practicado en todo el mundo desde hace un siglo, que reduce la concentración de hidrocarburos del petróleo de peso mediano que no pueden ser eliminados por evaporación pero que sí pueden ser degradados por microorganismos. Generalmente, el suelo se excava y se extiende en una delgada capa (no más de 1,5 m) sobre la superficie del lugar donde se está realizando la recuperación y se estimula la actividad microbiana aeróbica mediante aireación y/o adición de nutrientes, minerales y agua (USEPA, 1998b; Hejazi, 2002).

La aireación se consigue a través de labranza o arado del terreno. Es frecuente la adición de bacterias alóctonas degradadoras de hidrocarburos para acelerar el proceso y la estimulación de la actividad de los microorganismos incrementa la degradación de los productos de petróleo adsorbidos (Riser-Roberts, 1998). Este tratamiento ha sido aplicado con resultados prometedores en estudios piloto para degradar el explosivo TNT (Widrig et al.1997) pero, dado que el TNT y sus derivados son solubles, su aplicación in situ requeriría un estricto control hidráulico del agua infiltrada.

Este proceso (ver figura 7) requiere que el suelo esté bien mezclado para aumentar la superficie de contacto entre los compuestos orgánicos y los microorganismos, y suficientemente oxigenado para que se produzca la

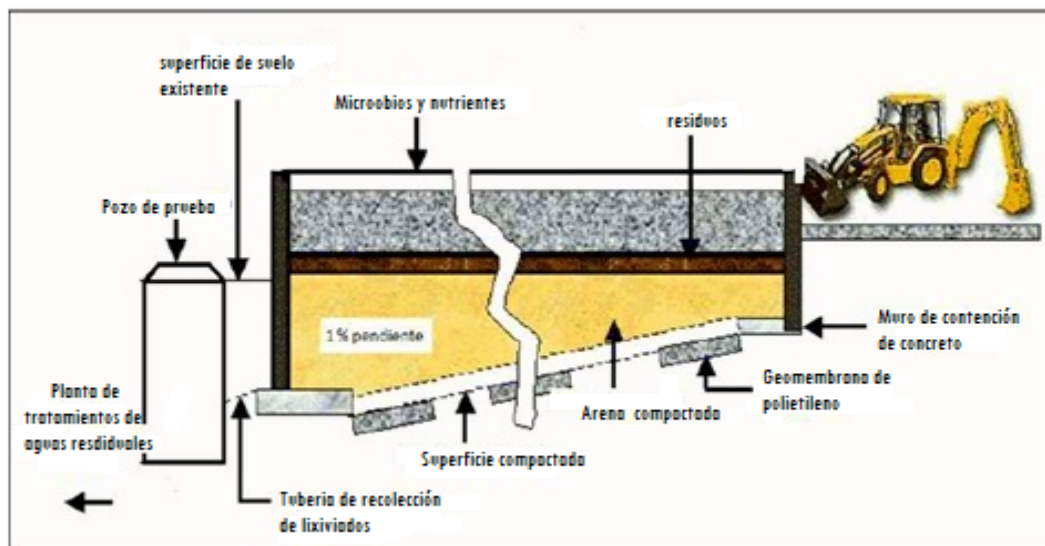
biodegradación aeróbica, pudiendo añadirse nuevos aportes de suelo con hidrocarburos para su degradación y el mantenimiento de la actividad biológica. Este tratamiento presenta una serie de limitaciones, generalmente relacionadas con parámetros que puedan desacelerar la actividad biológica durante la biodegradación, aunque es relativamente poco costosa en comparación con otras medidas de recuperación.

La descontaminación se basa en la acción de los microorganismos presentes en el suelo, por lo que la utilidad de tratarlos ex situ reside en poder controlar fácilmente las condiciones óptimas de biodegradación de los compuestos orgánicos.

Fundamentalmente se controlan las siguientes condiciones:

- Contenido de humedad: se añade agua mediante un sistema de riego.
- Aireación: el suelo es volteado por métodos mecánicos periódicamente.
- pH: debe permanecer cerca de la neutralidad, por lo que se añadirán enmiendas de caliza en caso de aumentar la acidez.
- Otras enmiendas: nutrientes, inoculación de microorganismos.

Figura 7. Procedimiento en el landfarming



Fuente: VERACIERTA, Luis Emilio, "Evaluación de las técnicas realizadas por el centro de tratamiento y recuperación de desecho en el capo hamaca, estado Anzoátegui" 2006

El landfarming se usa satisfactoriamente en el tratamiento de lodos de refinería que contiene hidrocarburos del petróleo. Si existen compuestos muy volátiles en la mezcla, estos pueden ser emitidos a la atmósfera antes de ser degradados por los microorganismos. La tasa de degradación se reduce si:

- Los hidrocarburos son muy pesados.
- Los compuestos presentan anillos en su estructura química, como es el caso de los HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos).
- Presentan cloro o nitrógeno.

3.2.6 Biodegradación en suspensión. Es un tratamiento ex situ. Los suelos contaminados son excavados y tratados en una solución o suspensión acuosa dentro de un biorreactor que provee los nutrientes y microorganismos necesarios para una biodegradación exitosa y en donde ocurren la extracción y la biodegradación. La suspensión se forma por la adición de agua al suelo y el mezclado continuo permite mantener el suelo contaminado en suspensión. El mezclado permite romper los agregados de suelo favoreciendo la disolución de los contaminantes y reduce la resistencia a la transferencia de masa. En este sistema se propicia un mejor contacto entre los microorganismos, nutrientes, oxígeno y contaminantes en consecuencia a la tasa de biodegradación se incrementa. La presencia de sólidos en el reactor implica el uso de diseños especiales y la introducción de variables que no se contemplan en los Biorreactores comunes.

El suelo junto con los nutrientes, agua y microorganismos se mezclan y airean hasta alcanzar el nivel de degradación satisfactorio. Al final en el tratamiento los sólidos deben separarse para regresarlos al sitio de origen y someterse a un tratamiento adicional; la fase líquida puede reutilizarse o enviarse a un sistema de tratamiento de agua.

La concentración de contaminantes afecta directamente a la capacidad de biodegradación. Si el suelo contiene concentraciones elevadas de contaminantes (más de 165.000 ppm) un lavado previo puede mejorar la biodegradación.

Este sistema ha resultado satisfactorio para recuperar suelos contaminados con explosivos, hidrocarburos del petróleo, petroquímicos, solventes, pesticidas, etc., y se usa principalmente para tratar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados. El uso de biorreactores está más favorecido que los tratamientos biológicos in situ para suelos heterogéneos, de baja permeabilidad, o cuando se requieren eliminaciones más rápidas de los contaminantes (USEPA, 1990b).

3.3 TRATAMIENTOS FÍSICOS¹⁵

Los tipos de tratamientos físicos no se ven alterados por la composición química de los contaminantes, solo separan o concentran los materiales tratados aprovechando las diferencias en el estado físico tales como presión de vapor, tamaño de la partícula, densidad. Los procesos físicos son una opción que poco se usa para el tratamiento final de cualquier material contaminado.

3.3.1 Ventilación de suelos. Se considera un método de eliminación pasiva para contaminantes volátiles. El suelo se excava y se vierte una fina capa, de unos 20 cm, sobre una superficie impermeable y se espera a que los COV (compuestos orgánicos volátiles) se volatilicen. Para favorecer se procede a la remoción periódica, por ejemplo mediante arado.

El riego también favorece el proceso ya que el agua disuelve los contaminantes y produce su desorción y al evaporarse los arrastra hacia la superficie, además la humedad acelera la actividad de los microorganismos. También al extender el suelo se aumenta su temperatura y se expone a la acción de los vientos, con lo que aumenta la volatilización.

¹⁵ ORTIZ BERNAD, Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana .
Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Cap 3. P.34

Por lo general, es un tratamiento muy lento y tiene la incidencia de que los contaminantes son devueltos directamente al medio ambiente, es decir a la atmósfera, sin sufrir ninguna depuración. Sin embargo, estos compuestos devueltos a la atmósfera tienden a degradarse rápidamente. Los hidrocarburos reaccionan fácilmente con radicales hidroxilos atmosféricos, degradándose en un plazo que va desde un solo día para el dodecano hasta los nueve días para el benceno. Por otro lado, los disolventes clorados industriales se descomponen fotolíticamente con gran rapidez por acción de las radiaciones ultravioleta. Para contrarrestar la contaminación atmosférica el suelo excavado es transportado a equipos cerrados en las que se puedan recoger los gases para su posterior tratamiento y controlar las condiciones ambientales.

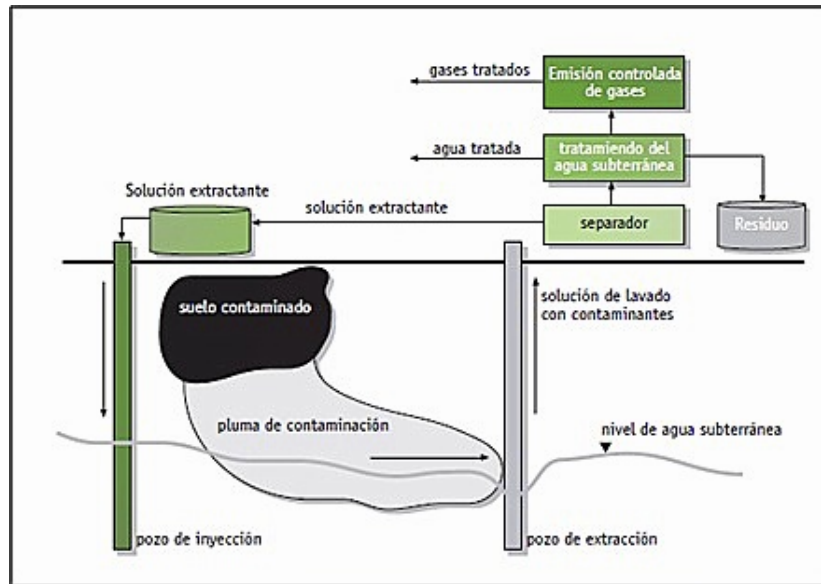
La principal ventaja de esta técnica es su bajo costo económico.

3.3.2 Flushing. Es un tratamiento in situ. Consiste en la extracción de los contaminantes del suelo con una solución que transporte dichos contaminantes a una zona determinada y localizada donde puedan ser eliminados. Así, los contaminantes son extraídos del suelo haciéndole pasar agua que contiene un aditivo que mejora la solubilidad de los contaminantes u otras soluciones acuosas mediante un sistema de inyección o infiltración. El agua subterránea y los fluidos extractantes se capturan y bombean a la superficie utilizando pozos de extracción, donde son tratados y en ocasiones reciclados.

El flushing se aplica a todo tipo de contaminantes, especialmente a compuestos inorgánicos incluidos los elementos radioactivos, y se suele combinar con otros tratamientos como la biodegradación y el pump & treat (Boulding, 1996). Asimismo, es difícil de aplicar en suelos de baja permeabilidad o ricos en elementos finos y requiere una vigilancia estrecha para impedir que los contaminantes migren en otra dirección distinta a la deseada (Johnston *et al.*, 2002). En muchos casos, se utilizan disolventes o surfactantes (detergentes) como

aditivo. La eficiencia de este proceso depende de las variables hidrogeológicas (por ejemplo el tipo de humedad del suelo) y el tipo de contaminante.

Figura 8. Proceso de Flushing

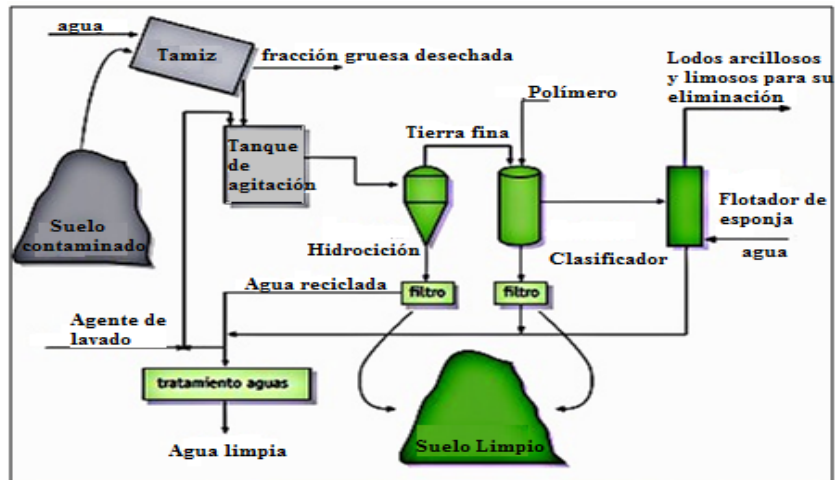


Fuente: Técnicas de recuperación de suelos contaminados –Vigilancia Tecnología

3.3.3 Lavado de Suelos. Es un tratamiento generalmente ex situ en el que el suelo excavado es previamente separado físicamente por tamizado, densidad o gravedad para eliminar las partículas de grava más gruesas, con poca capacidad de adsorción, de la fracción fina y seguidamente lavado con extractantes químicos que permitan adsorber y solubilizar los contaminantes (van Benschoten *et al.*, 1997). Después del tratamiento químico, el suelo se vuelve a lavar con agua para eliminar los contaminantes y agentes extractantes residuales y se devuelve a su lugar de origen (Peters, 1999). La eficacia de esta técnica depende del grado de adsorción del contaminante, controlado por una serie de propiedades del suelo como el pH, la textura, la capacidad de intercambio catiónico, la mineralogía o el contenido en materia orgánica y otros factores como el tiempo que hace que el suelo esté contaminado o la presencia de otros elementos tóxicos (Reed *et al.*, 1996) enlazados químicamente o físicamente al cieno o arcilla. El cieno y la arcilla

están ligados a grandes partículas de arena y grava. El lavado de suelo separa las partículas finas de cieno y arcilla, de las partículas de grava y arena granular. De esta manera las partículas grandes se remueven y los contaminantes se concentran en un volumen menor haciendo la restauración más fácil.

Figura 9. Lavado de suelos



Fuente: Técnicas de recuperación de suelos contaminados –Vigilancia Tecnología

3.3.4 Aglomeración con alquitrán de carbón. Este tratamiento ex situ, es un proceso de extracción que usa un solvente sólido para remover contaminantes. El proceso opera bajo el principio que los componentes oleosos residuales son fuertemente adsorbidos sobre la superficie de carbón finamente dividido, y que el aglomerado carbón –orgánico que se forma puede ser separado del suelo en una suspensión acuosa.

3.4 TRATAMIENTOS QUÍMICOS¹⁶

Los tratamientos químicos son similares a los de degradación in situ, la diferencia es que en estos procesos se presentan mejores eficiencias de tratamiento, homogeneizándose el suelo con el reactivo y controlándose así el proceso.

¹⁶ ORTIZ BERNAD, Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Fundación para el conocimiento madri+d. Cap.3. P.48

3.4.1 Extracción con solventes. Es un tratamiento ex situ, el proceso se basa en la extracción de contaminantes mediante la mezcla en un tanque del suelo con un disolvente orgánico como acetona, hexano, metano, propanol, dióxido de carbono líquido, etc. El disolvente orgánico arrastra los contaminantes y se separa del suelo por evaporación, y mediante la adición de nuevos disolventes o destilación, los contaminantes se eliminan para que el disolvente orgánico empleado pueda ser reutilizado. A su vez, el suelo tratado se lava para arrastrar cualquier resto que pueda quedar del disolvente.

Es eficaz para tratar sedimentos, lodos residuales y tierra que contienen principalmente contaminantes orgánicos volátiles, solventes halogenados y desechos del petróleo. No es aplicable para extraer contaminantes inorgánicos debido a que los materiales no se disuelven fácilmente en la mayoría de los solventes. Entre las limitaciones de esta técnica se encuentra la presencia de plomo y otros contaminantes inorgánicos. En algunos casos es necesaria la aplicación de un tratamiento preliminar extenso de los desechos para sacar o desintegrar los terrones grandes y mediante esta técnica mitigar la toxicidad de los contaminantes.

3.4.2 Degradación química. Este tratamiento básicamente es la adición de una sustancia química para inducir la degradación química.

Existen tres tipos de degradación:

- Oxidación mediante aireación o adición de agentes oxidantes,
- Reducción por adición de agentes reductores
- Polimerización de ciertas sustancias orgánicas mediante la adición de hierro y sulfatos.

Los factores que controlan la eficacia del sistema son: el tipo de contaminante, las características del suelo (permeabilidad para la inyección de aditivos, arenas o

materiales no finos) para facilitar su mezclado in-situ, la presencia de obstáculos subterráneos que impidan el mezclado superficial, profundidad de la contaminación del suelo y la posible generación de contaminantes más tóxicos que los originales (oxidación de mercurio, cromo).

3.5 TRATAMIENTOS TÉRMICOS¹⁷

Estos tratamientos mitigan la contaminación presente en el suelo mediante el suministro de calor.

3.5.1 Calentamiento con radiofrecuencia. Es un tratamiento in-situ. El principio de calentamiento por radio frecuencia se basa en el movimiento de cargas eléctricas debido a un campo eléctrico dentro de un átomo dado y a los límites entre dos entornos homogéneos. Al aplicar un campo eléctrico a un material, sus átomos o moléculas con cargas negativas y cargas positivas tienden a deformarse, ya que las cargas positivas tienden a deformarse, ya que las cargas son atraídas por electrodos de polaridad opuesta. Cuando se invierten la polaridad del electrodo, las cargas del átomo o molécula van a sentido opuesto y estos cambios sucesivos de dirección causan calentamiento y, a mayor frecuencia del campo eléctrico, más intensa será la fricción y mayor el calentamiento.

El calentamiento por radio frecuencia usa energía electromagnética similar a un microondas para volatilizar los contaminantes petroleros de los cortes contaminados.

3.5.2 Vitrificación. La vitrificación es un proceso de tratamiento térmico que emplea calor para convertir el material contaminado en un producto cristalino, químicamente inerte y estable parecido al vidrio. El proceso consiste en introducir

¹⁷ ORTIZ BERNAD, Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Fundación para el conocimiento madri+d. Cap.3. P.53

electrodos dentro del suelo contaminado que debe contener niveles significativos de silicatos. En la superficie los electrodos se conectan al suelo por medio de grafito, se aplica una corriente eléctrica muy alta que pasa a través de los electrodos y el grafito y el suelo se funde como resultado de la elevada temperatura. Es necesario atrapar los gases y vapores que se escapan, debido a que algunos contaminantes se evaporan. Una vez que se enfría el suelo, los contaminantes quedan químicamente enlazados por el calor dentro del vidrio formado.

Algunos contaminantes son volatilizados, mientras otros son encapsulados en matrices de vidrio. Utiliza mezclas de óxidos adecuados, formadores de la matriz vítrea. Es efectivo para tratamiento de inorgánicos, como así también de orgánicos. Los altos costos de capital inicial, el alto consumo energético han colocado a esta tecnología en un campo económico incierto.

Los componentes no volátiles se integran en la matriz vítrea, mientras que los constituyentes orgánicos son destruidos en un proceso parecido a la pirolisis. Los gases que se evaporan pueden ser recogidos en una campana instalada en la superficie del terreno.

El proceso se favorece con bajos contenidos de humedad, pudiendo utilizarse en suelo saturados, pero con alto costo, siendo necesaria una disponibilidad de electricidad suficientemente alta y un equipo técnico adecuado.

3.5.3 Desorción térmica. Es un tratamiento ex situ. Implica la aplicación de calor a los suelos y sólidos contaminados para promover la volatilización de los COV (compuestos orgánicos volátiles). Así como los contaminantes vaporizan, son desorbidos y separados de la matriz sólida. Dependiendo de la tecnología específica empleada, los contaminantes volátiles o son destruidos en cámaras específicas de tratamiento o son condensados y recuperados.

La desorción térmica no es un sistema de incineración ni se forman subproductos de combustión. Es aplicable para tratar compuestos de peso molecular intermedio

(aceites, lubricantes, aceites minerales, combustibles) y en suelos relativamente permeables.

3.6 OTROS TRATAMIENTOS¹⁸

3.6.1 Técnicas de confinamiento. También llamadas de estabilización/solidificación, son un tratamiento ex situ, las cuales reducen la movilidad de los contaminantes a través de procesos físicos y químicos, ya sea convirtiéndolos en formas menos solubles y tóxicas (estabilización) o encapsulando el material contaminado en una estructura sólida de gran integridad estructural (solidificación). La mayoría de estas técnicas presentan limitaciones para tratar sustancias orgánicas y pesticidas, excepto la solidificación con asfaltos y la vitrificación (FRTR, 1999a).

Utiliza cal, cemento y ocasionalmente mezclas de cemento/bentonita, para ligar los contaminantes y suelo en una matriz para que los contaminantes no lixivien al medio ambiente. Esta tecnología es aplicable (con reservas) para contaminaciones con metales pesados. No está recomendada para el tratamiento de residuos oleosos.

3.6.2 Microencapsulación. Es un tratamiento ex situ. Se utiliza agentes oleofílicos especiales como arcillas organofílicas, que adsorben los contaminantes orgánicos. Conjugados con agentes ligantes, se construye una microcápsula donde el contaminante quedará confinado, evitando su lixiviación en el medio ambiente. Dada la doble CEC (capacidad de intercambio catódico) interna y externa de las zeolitas, estas presentan ventajas considerables frente a las arcillas organofílicas, aunque no son los únicos agentes oleofílicos empleados recientemente se está empleando aluminosilicatos.

¹⁸ ORTIZ BERNAD , Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Fundación para el conocimiento madri+d. Cap.3. P. 59

3.6.3 Capping. Es un tratamiento ex situ o in-situ. Es una técnica que consiste simplemente en dejar residuos en su lugar aislándolo del medio ambiente mediante la colocación de una capa de tierra y/o material sobre los residuos contaminados para evitar la propagación de la contaminación. El capping proporciona un camino viable para remediar un área que está contaminada. Es una opción cuando otro tipo de tratamiento es demasiado costoso y la zona que rodea el lugar es un sistema de baja energía. Las técnicas de tapado tienen usos desarrollados en química, biología, ingeniería geotécnica y ambiental.

3.6.4 Microconfinamiento. Los sistemas de Microconfinamiento hacen uso de reacciones de precipitación/absorción para inmovilizar químicamente los constituyentes peligrosos y a menudo los incorporan en una masa solidificada mediante la adición de diversos aditivos consolidantes. El producto sólido resultante puede utilizarse a menudo en la industria de la construcción. Sin embargo, dada la compleja naturaleza química de muchos materiales de residuos, es difícil inmovilizar todos los contaminantes. El resultado es que muchos contaminantes deben tratarse aún como materiales que exigen un nuevo confinamiento. Además los residuos tratados por aquellos métodos no resultan adecuados para una futura recuperación si el mercado o las normas de regulación así lo estableciesen.

3.6.5 Landfilling. Es un tratamiento ex situ. También conocido como técnica de enterrado y relleno en el que los suelos y sólidos contaminados son transportados hacia un lugar donde, por sus características, es permitida y aceptada su disposición final.

Es un sistema de relleno; por lo tanto, deberá estudiarse muy bien con qué tipo de material contaminante se está realizando el landfilling.

En algunas circunstancias, este tratamiento se realiza fuera del sitio y en otros casos, las compañías petroleras con una gran cantidad de actividad de perforación en un área pueden construir y operar rellenos sanitarios privados.

En ciertos casos antes de enterrar y rellenar los sólidos contaminados se realiza un revestimiento inferior previo cubierto por una barrera geológica, la cual se ha desarrollado para prevenir la contaminación del suelo y finalmente un revestimiento superior o relleno. Esta técnica es aplicable a cortes con bajo contenido de hidrocarburos o cortes base agua. Es una tecnología sencilla y de bajo costo.

3.7 TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE CORTES DE PERFORACIÓN APLICADOS EN LA INDUSTRIA

El manejo de los cortes de perforación se realiza en la locación, por una empresa que presta este tipo de servicios o fuera de la locación, en los llamados “centro de acopio” bien sea en los terrenos de la empresa operadora o de la empresa de servicios. Es así que la forma de manejo de desechos depende principalmente de las características de la región (tipo de suelo, nivel freático, topografía, etc.). La decisión de cual alternativa usar depende principalmente de los parámetros a regularse, de la cantidad de desechos a disponer, del área asignada para la disposición, del tipo de agente fijador seleccionado, entre otros.

El procedimiento por el cual debe pasar el desecho de perforación después de ser descargado por el equipo de control de sólidos es el siguiente:

- Almacenamiento temporal
- Tratamiento y disposición final

3.7.1 Confinamiento en piscinas y celdas. Este proceso se utiliza cuando se perforan los pozos con lodos base agua. Las piscinas construidas dependen de la profundidad, diámetro de las secciones y tipo de perforación (direccional, horizontal o vertical) del pozo, para lo cual hay programas que calculan la capacidad de dichas piscinas.

Metodología: se deben tener celdas con capacidades semejantes a 90 m³ esto se puede lograr con la ayuda de una excavadora. Estas celdas son construidas en las partes laterales o al costado de las piscinas, el largo y ancho varía dependiendo del espacio disponible entre 4 a 7 metros que es la medida más usual y adecuada; la profundidad depende del nivel freático, normalmente está entre 2 a 4 metros, pero siempre se deja por lo menos un metro de suelo entre los cortes de perforación y el nivel freático. Es recomendable que al momento de iniciar la construcción de las piscinas se tome en cuenta el espacio para las celdas para no tener problemas a futuro en el tapado.

- Las celdas deben contar con un puerto de comunicación con la piscina (canal), por donde fluyen dichos lodos que generalmente son licuados.
- Una parte de los cortes que contiene sólido secos producto del proceso de deshidratación y los cortes de perforación obtenidos de la utilización de la centrífuga de alta velocidad (sólidos de baja gravedad o LGS), se mezclan o remueven con los demás cortes mas húmedos o licuados en la piscina para darle mayor consistencia y facilita el tapado de la misma.
- Un porcentaje de silicatos o material secante se envía hacia la piscina para luego remover en su interior hasta homogenizar todos los cortes, a éstos se los deja decantar por un tiempo considerable, en donde por densidades y gravedad el más pesado va al fondo y el más liviano forma un lodo licuado superficial.
- El agua producto del proceso anterior es evacuada hacia los tanques horizontales o verticales para su tratamiento físico-químico y posterior

evacuación de la misma teniendo en cuenta que debe cumplir con las normas vigentes.

- La tierra nativa retirada anteriormente, producto de la excavación en la construcción de las piscinas se adiciona alrededor de la misma para su posterior taponamiento que inicia por el lado contrario a la celda siempre mezclando al 100%; para que por el empuje natural sea desplazado el lodo licuado hacia la celda para ser estabilizado mediante una mezcla con silicatos o aditivos para control de pH y por último la tierra nativa producto de la excavación siempre y cuando sirva, en proporciones que dependen de la humedad de los cortes. Luego es devuelto a la piscina en un proceso repetitivo hasta lograr obtener el secado de los cortes y cumplir con los parámetros exigidos. En caso de que existan trazas de crudo en los cortes de perforación se utilizan piscinas impermeabilizadas con geo-membranas.
- El proceso anterior se lleva a cabo las veces que sea necesario hasta que el nivel de la piscina sea manejable y permita tapar manteniendo un nivel adecuado respecto a la plataforma, es decir que los muros laterales de la piscina siempre tendrán un rango entre 30 y 50 cm, esta sobreelevación debe tener forma cóncava y además es necesaria para prever el proceso de consolidación del material tratado a través del tiempo, luego de la cual se asienta y baja el nivel.
- Para finalizar el tapado de las piscinas se nivela toda el área sobre la cual se trabajó, se compactan y se peinan los taludes y por último se construyen canales alrededor de la zona para evitar la acumulación de aguas lluvias.

Ventajas del método:

- Es un método sencillo de aplicar sin mayor labor ingenieril, es más bien mecánico y de aplicación rápida, es decir no se debe esperar mucho tiempo para que los parámetros se regulen.

- Excelente para pozos direccionales por lo que abarca en una sola piscina los cortes de todo un pozo.

Desventajas del método: existen algunas limitantes para obtener un tapado uniforme y a un nivel aceptable respecto a la plataforma. Entre los cuales se puede mencionar los siguientes:

- Tipo de suelo: existe arcillas plásticas bastante difíciles de manejar, cuando se intenta hacer la mezcla para estabilizar los cortes; esto constituye un reto porque el material se pega a la cuchara de la excavadora complicando su labor, sin embargo se buscan formas de trabajar que permitan cumplir con los objetivos como es el de llevar tierra de otros lugares para poder taponar con facilidad.
- Espacio disponible para la construcción de celdas: en algunas locaciones no se dispone del espacio mínimo requerido para construir las celdas que ayudan a manejar de forma óptima los cortes (volúmenes pequeños) y obtener un tapado con niveles aceptables respecto al de la plataforma.
- Este método es solo aplicado para cortes base agua.

3.7.2. Incineración controlada de cortes de perforación. Los tratamientos térmicos están diseñados para destruir los componentes orgánicos de los residuos. A través de la destrucción de la fracción orgánica y su conversión a dióxido de carbono y vapor de agua, los tratamientos térmicos reducen el volumen de los residuos y ayudan a disminuir la amenaza al medio ambiente, ya que los compuestos orgánicos incluyen componentes peligrosos.

Una buena combustión representa una buena oxidación de los componentes orgánicos (sólidos, líquidos y gases). Para conseguirlo, el aire, que contiene 21% de oxígeno, debe mezclarse perfectamente con carbono y el hidrógeno del combustible (residuo) para producir estequiométricamente dióxido de carbono y

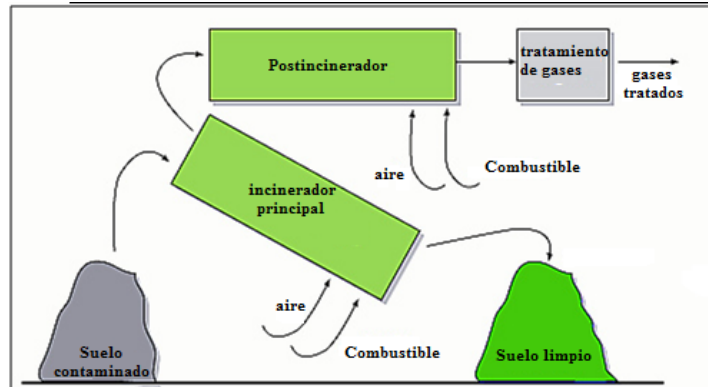
agua. En un sistema completamente homogéneo (un reactor bien agitado) que requiere tanto tiempo como turbulencia, la oxidación completa del carbono e hidrógeno ocurrirá a una temperatura determinada.

Metodología. Se introduce el material contaminado en el incinerador y a fin de aumentar la cantidad de químicos nocivos destruidos, los técnicos controlan la cantidad de calor y aire en su interior. A medida que los contaminantes se calientan, se transforman en gases que pasan a través de una llama. Gracias a la llama, los gases alcanzan una temperatura lo suficientemente elevada que provoca su descomposición en componentes de menor tamaño. Éstos se combinan con oxígeno para formar gases menos nocivos y vapor de agua (combustión). (Ver figura 10)

Los gases producidos en el incinerador pasan a través de un equipo de control de contaminación de aire donde se elimina cualquier metal, ácido y partícula de ceniza remanente. Tales desechos son nocivos y deben desecharse en forma adecuada en un vertedero autorizado. Los otros gases más limpios, como el vapor de agua y el dióxido de carbono, se liberan al aire a través de una chimenea.

El suelo o la ceniza remanente después de la incineración se pueden eliminar en un vertedero o enterrar en el sitio. La cantidad de material que requiere eliminación es muy inferior a la cantidad de material contaminado.

Figura 10. Proceso de incineración



Fuente: Técnicas de recuperación de suelos contaminados –Vigilancia Tecnología

Ventajas:

- Los residuos incinerados reducen su volumen 10 veces
- 1000 Kg de residuos reducen su peso a 333 Kg lo que significa 1/3 del peso original.

Desventajas:

- Requiere tratamiento posterior de agua proveniente de los procesos de enfriamiento y neutralización que generan aguas de lavado residuales.

3.7.3. Estabilización de cortes con cal viva. La cal viva es utilizada en el tratamiento de cortes de perforación par encapsular los cortes y evitar el arrastre de lixiviados.

Metodología. Los cortes se estabilizan con cal viva, ya que esto permite que se retire humedad y el material quede encapsulado con carbonato de calcio. Este proceso de estabilización es útil para cortes base agua y pequeñas cantidades de contenido de aceite o ACPM. No se recomienda usar cal viva para cortes base

aceite ya que el proceso con el tiempo no es estable y se produce lixiviación de hidrocarburos. El criterio básico del proceso de estabilización consiste en que los cortes se mezclen fuertemente y continuamente con la cal (1 ton/100 Bls aprox.) hasta que el óxido de calcio pase a carbonato de calcio. En este proceso se toma CO_2 atmosférico y se hace reaccionar con la cal viva (CaO) para obtener carbonato de calcio. En campo una indicación clara de que el proceso es completo es que después del tratamiento de mezcla y aireación, el material lixivia agua limpia de manera espontánea.

Sistemas de mezclado. Los cortes generados son llevados a superficie por el lodo de perforación, el cual hace su descarga en equipos de control de sólidos. Este equipo está conformado básicamente por zarandas que separan los cortes más grandes, limpiadores de lodo que separan los cortes que no pudieron ser liberados de baja gravedad y recuperación de material pesante. El procedimiento más adecuado para mezclar los cortes con la cal viva es aquel que permite continuidad y evita cuellos de botella en la operación. Esto significa que debe tener el mínimo número de pasos en el proceso para hacerlo más eficiente, evitando la acumulación de cortes en el área de trabajo para no verse en la obligación de sacrificar caudal de penetración especialmente en formaciones geológicas blandas por el alto volumen de cortes. Además el riesgo de accidentes disminuye cuando el proceso involucra menos pasos.

Figura 11. Proceso de solidificación / estabilización



Fuente: Autores

Parámetros de calidad para la cal viva. La cal viva usada para la fijación de cortes base agua y fluidos residuales debe estar deshidratada y ser por lo menos ochenta por ciento (80%), óxido de calcio activo, características que deben controlarse en campo mediante la prueba de óxido de calcio activado. La cal viva no debe contener metales pesados ni concentraciones mayores a las que aparecen en la tabla 2.

Tabla 2. Concentración máxima de metales pesados en la cal viva

Contaminante	Concentración máxima mg/L
Arsénico	5,0
Cromo	5,0
Mercurio	0,1
Plata	5,0
Plomo	5,0
Selenio	1,0

Fuente: <http://www.lalibriariadelau.com>

Proporciones de mezcla. El proceso de fijación de cortes base agua con la cal viva no retira los hidrocarburos contenidos en los cortes de perforación, pero sí los logra estabilizar. La estabilización del aceite contenido en los cortes se logra por adsorción en el producto reaccionado de cal hidratada. Los cortes deben estar fijados con cal viva hasta el punto de que estén estabilizados por la reacción de la cal viva y del agua para formar cal hidratada.

Para cada porcentaje de aceite se requiere un porcentaje de agua, con el fin de que la cal reaccione con el aceite y lo fije por adsorción. Los porcentajes de cal viva y agua más utilizados con respecto al porcentaje de aceite en los cortes aparecen en la tabla 3, como guía en el momento de calcular la cantidad de cal que se debe utilizar en las mezclas.

Tabla 3. Proporciones de mezcla (todos los porcentajes son en peso)

Contenido de aceite (%)	Cal viva al 80 % requerida	Agua requerida (%)
<5	15-20	7
5-10	20-25	8
10-20	40-45	15
20-30	60-65	21
30-40	80-85	28

Fuente: <http://www.lalibreriadelau.com>

4. GENERALIDADES DE LOS POZOS ESTRATIGRÁFICOS¹⁹

Para la perforación de un pozo estratigráfico se realizan los mismos procesos de perforación de un pozo convencional, desde superficie hasta una profundidad planeada. Los pozos ANH-PATÍA-1-ST-P Y ANH-BVTURA-1-ST-P fueron perforados a una profundidad total de 12.100 pies con el cual se pretendió obtener información directa, precisa y de alta calidad de la cobertura sedimentaria, que define el sistema petrolífero potencial de la cuenca, mediante un conjunto de registros de pozos, cortes de perforación y corazones (núcleos continuos de roca).

Objetivos de los pozos: Tomar 2.000 pies de corazón en diferentes intervalos mediante la perforación de un pozo vertical en cada uno de los prospectos hasta una profundidad final de 12.100 pies, registrarlo y abandonarlo ya que es un pozo exploratorio.

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL POZO ANH-PATÍA-1-ST-P

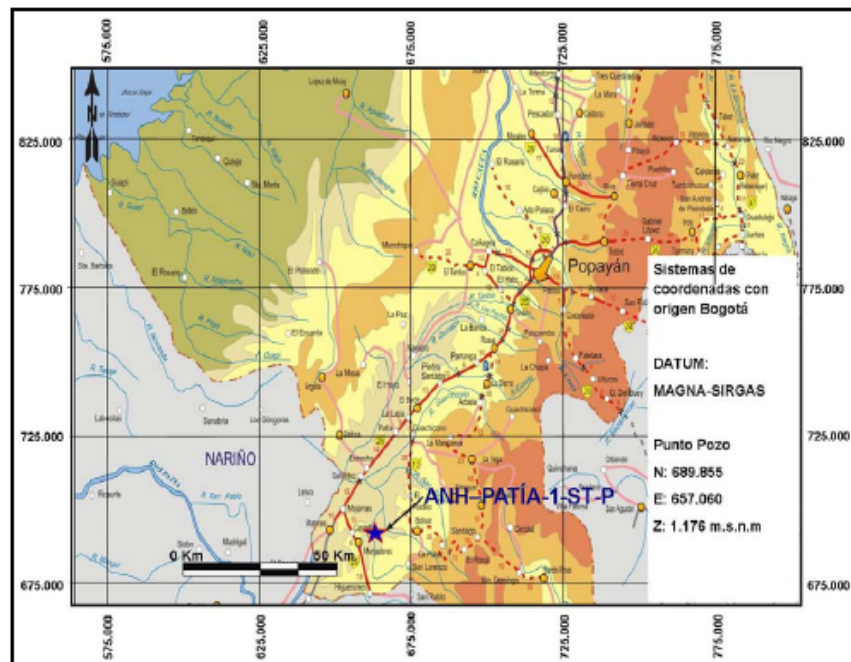
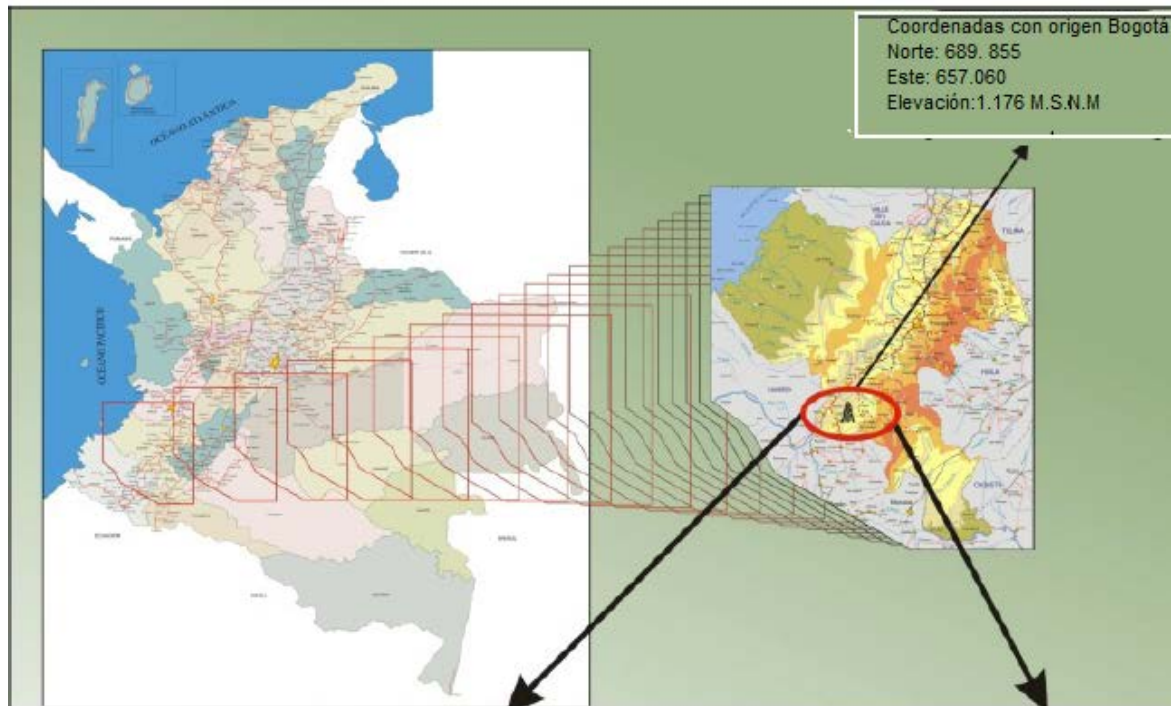
El Pozo ANH PATIA 1–ST-P, está ubicado en jurisdicción del municipio Mercaderes (Depto. Del Cauca), en La Cuenca Cauca–Patía, la cual es una cuenca inexplorada que tiene un área de 12.823 Km², es un pozo estratigráfico, con profundidad final programada a 12.100 pies.

El prospecto se localiza en el municipio de Mercaderes, Departamento del Cauca, aproximadamente a 1.400 metros desde el carretable que conduce de Mercaderes al corregimiento de San Joaquín (ver figura 11).

¹⁹ VALENCIA ORTIZ, Joaquín Andrés. Análisis facial y caracterización de ambientes y sub ambientes de los pozos estratigráficos de la cuenca Cauca-Patía región del bordo, Cauca; Tesis de grado UIS 2011

El área para la perforación del pozo, se encuentra localizada en jurisdicción del municipio de Mercaderes – vereda Canto Llano, en el departamento del Cauca.

Figura 12. Localización del pozo estratigráfico ANH-PATÍA -1ST-P



Fuente: Proyecto pozos profundos UIS-ANH

Las condiciones meteorológicas generales de la zona de ubicación del proyecto son:

- Temperatura media: 22°C
- Altura sobre el nivel del mar: 1.167 m
- Precipitación anual: 2700 mm²⁰

4.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE LA CUENCA PATÍA

La Cuenca Cauca-Patía (CCP) es una depresión intermontaña que describe la fase final del ciclo de Wilson, donde se presenta un estado de colisión y levantamiento de un sistema orogénico con múltiples fallas de tipo inverso de cabalgamiento producto de los eventos compresivos del sistema, generando un orogéno que delimita áreas subsidentes que lo rodean. Estas áreas que quedan morfológicamente deprimidas con respecto a zonas adyacentes que se alimentan o presentan materiales de los productos de la denudación de los relieves montañosos adyacentes. Después de finalizado el desplazamiento lateral y antes del inicio del depósito se presentan una deformación (fractura, plegamiento y elevación), de manera que la sedimentación en estas áreas subsidentes, se inició de una manera discordante sobre materiales con edades depositacionales diferentes a cada unidad geológica.

Para la cuenca Cauca-Patía se presenta una tasa de sedimentación muy alta por su morfología la cual comprende un área de aproximadamente 13.000 Km² entre las cordilleras Central y Occidental de Colombia, está limitada estructuralmente por el sistema de fallas del Patía al occidente y el sistema de fallas del Romeral al Oriente.

²⁰ VALENCIA ORTIZ, Joaquín Andrés. Análisis facial y caracterización de ambientes y sub ambientes de los pozos estratigráficos de la cuenca Cauca-Patía región del bordo, Cauca; Tesis de grado UIS 2011

Para la subcuenca Patía la diferencia de la del Cauca al Norte y Sur por el alto paleo geomorfológico de Popayán-El Tambo y el nudo de los pastos, respectivamente.

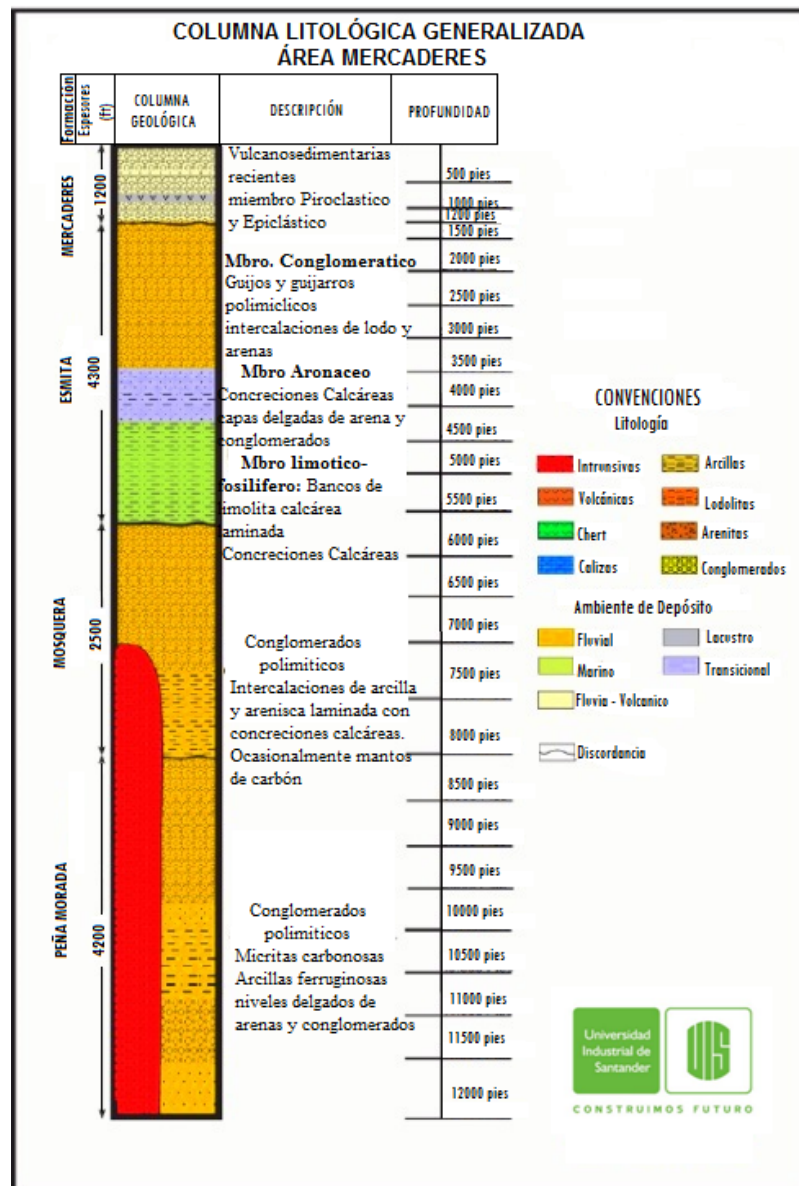
La cuenca tiene una edad Terciaria y la actividad sedimentaria inició en el Eoceno medio (± 40.4 millones de años) y se extiende hasta el Pleistoceno ($\pm 0,126$ millones de años) con influencia de aportes de tipo piroclástico en los estratos más jóvenes. Estas rocas fueron afectadas por la intensa actividad hipo abisal, dacítico-andesítica, especialmente durante el Mioceno Superior ($\pm 5,322$ millones de años), de esta fuerte actividad se han encontrado dos importantes discordancias, en el intervalo Paleoceno-Eoceno inferior a consecuencia de la Orogenia Calima (BARRERO, 1979) y en el Mioceno superior, a causa de la etapa principal de la orogenia Andina, este proceso se da por la colisión entre el arco de islas y la placa Sudamericana e indica la fase final del ciclo de Wilson que es el inicio del modelo depositacional y tectónico de la cuenca.

Estos incidentes son la culminación del evento Calima, en la zona de subducción dan un alto definitivo al Oeste de la fosa Nariño –Atrato. La subducción en esta zona de compresión se insinuó posiblemente desde el Coniaciano-Santoniano (± 85.8 millones de años) con el progreso de la expansión del arco de islas de la cordillera occidental. Dicho evento, simultáneamente con la acreación, determinó el desplazamiento de intrusivos de composición ácida a intermedia a lo largo de la joven cordillera; igualmente de las rocas ultramarinas de Guayabillas a través de fracturas del sistema de fallas de Romeral y la recién abandonada subducción del alto Patía. (Ver figura 12). Esta actividad sedimentaria se inició en el Eoceno medio con una transgresión seguida por sedimentación cíclica, marina somera y transicional hacia la parte superior.

Concluida la depositación del miembro arenoso de la formación Esmita, (Mioceno Superior) (± 7.246 millones de años), sobrevino la primera conmoción importante de la orogenia Andina que determino la regresión del mar y el evento hipo abisal regional.

El desarrollo del proyecto se enfoca sobre la subcuenca Patía que presenta una extensión de 3700 km², esta contiene una secuencia sedimentaria y piroclástica de edad Cenozoica de espesor aproximado de 2500 a 3800 m. los instructivos Terciarios cubren una superficie de unos 200 km²; esta información es basada en estudios realizados por GROSSE (1935); HUBACH Y ALVARADO (1934).

Figura 13. Columna estratigráfica en el pozo ANH-PATÍA-ST-P



Fuente: Proyecto Pozos Profundos UIS-ANH

4.2.1 Formaciones geológicas. Las formaciones geológicas: Esmita, Mosquera y Mercaderes presentes en la cuenca de Cauca- Patía se muestran a continuación (ver tabla 4).

Tabla 4. Formaciones geológicas de la cuenca ANH-PATÍA-1-ST-P

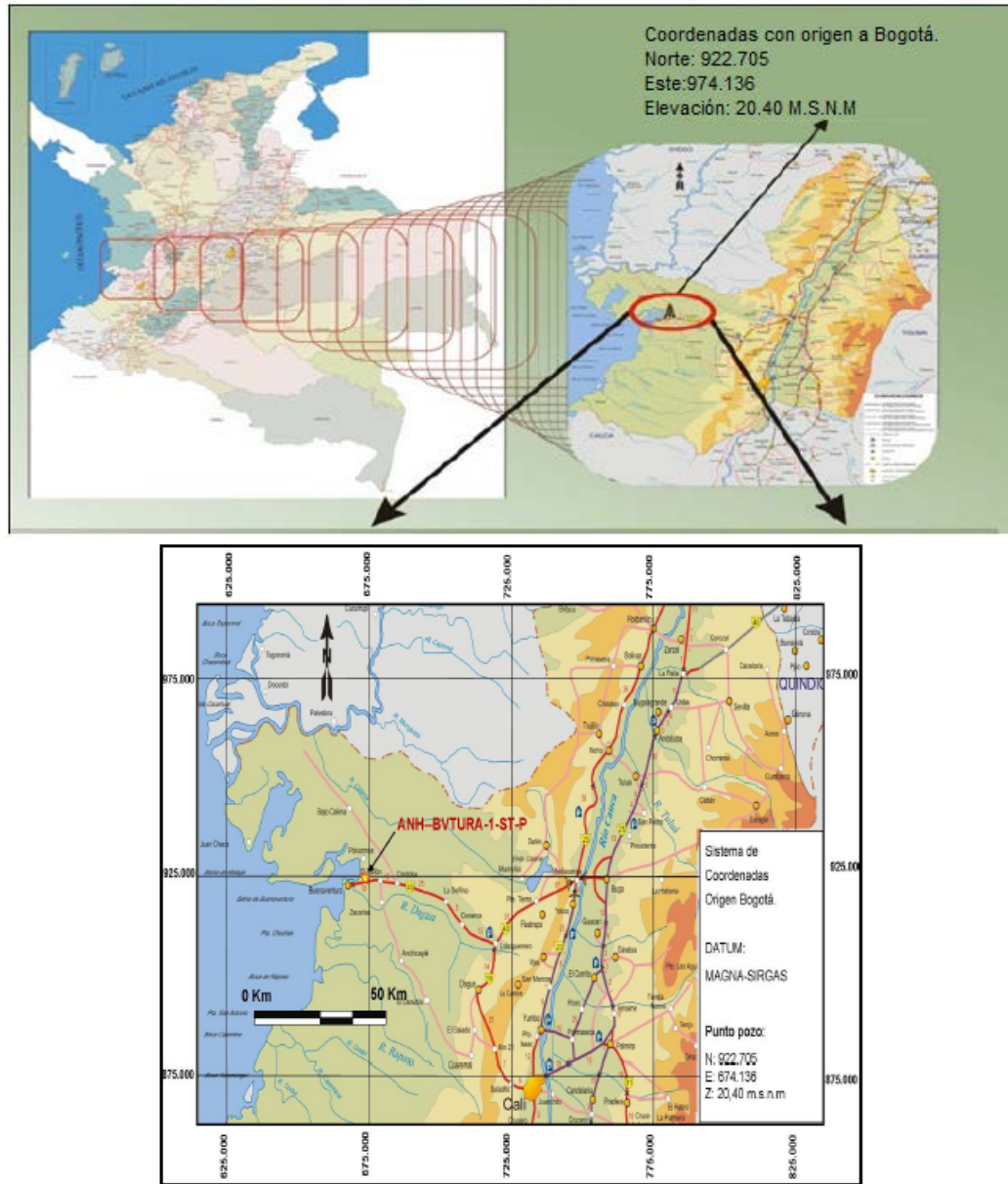
FORMACIÓN	INTERVALO A CORAZONAR		LONGITUD
	Tope (ft)	Base (ft)	(ft)
ESMITA – CONGLOMERADO	2.000	2.500	500
ESMITA –LIMOLITICO	4.500	5.000	500
MOSQUERA	7.200	7.700	500
PEÑA MORADA	8.000	8.350	350
PEÑA MORADA	10.000	10.150	150
TOTAL DE PIES A CORAZONAR			2000

Fuente: Proyecto Pozos Profundos UIS-ANH

4.3 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL POZO ANH-BVTURA-1-ST-P

El pozo estratigráfico ANH-BVTURA-1-ST-P, se encuentra localizado aproximadamente a 6,5 kilómetros del casco urbano principal del municipio de Buenaventura, departamento del Valle del Cauca (ver figura 13), en el barrio Isla de la Paz, perteneciente a la comuna 6. El pozo se ubica en la margen izquierda tomando la ruta que lleva a Buenaventura a Cali, en el barrio Isla de Paz, a unos 6,5 Km del casco urbano de Buenaventura, desde este punto se construyó un pequeño acceso de 60 metros para el ingreso a la localización del pozo.

Figura 14. Localización de pozo estratigráfico ANH-BVTURA-1-ST-P



Fuente: Grupo de Proyecto Pozos Profundos UIS-ANH

Las condiciones meteorológicas generales de la zona de ubicación de proyecto son:

- Altura promedio (cabecera urbana): 7msnm.
- Temperatura media: 29°C

4.4 INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE LA CUENCA TUMACO

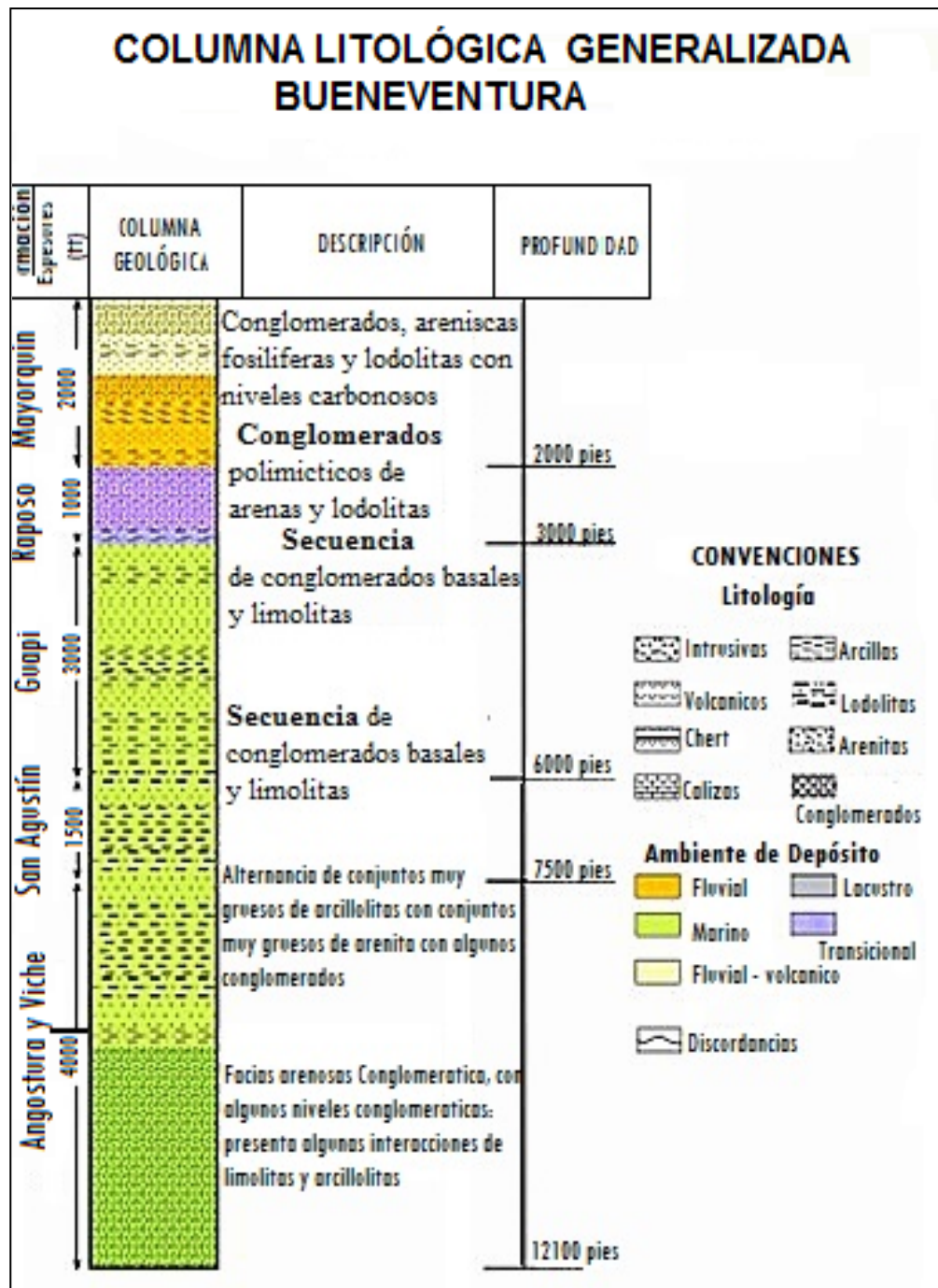
La cuenca Tumaco *on shore* se encuentra en la región Suroeste de Colombia. Sus límites son al Norte el sistema de fallas de Garrapatas, al sur la frontera con el Ecuador, al Oeste limita con el Océano Pacífico y al Este con el límite Occidental de la Cordillera Occidental.

La cuenca Antearco Tumaco está compuesta por una megasecuencia Premiocénica y tres secuencias posteriores al Mioceno Inferior, las cuales fueron depositadas en ambientes marinos de plataforma y talud. A pesar de que esta información estratigráfica obtenida de los cinco pozos exploratorios perforados en esta cuenca no ha permitido la definición formal de unidades litoestratigráficas, se logró identificar espesores de depósitos clásticos separados por inconformidades que puede alcanzar hasta 9 Km de espesor. Las unidades diferenciadas son: Mioceno Tardío a Plioceno Temprano, Mioceno Medio Alto a Mioceno Tardío, Mioceno Medio y Oligoceno Medio Basal.

La cuenca Tumaco tiene una longitud aproximada de 150 Km en su dimensión más extensa, orientada N-NE y tiene apenas 30 Km de ancho en promedio. Su flanco Occidental está afectado por al menos un alto estructural que controla la geometría de la cuenca y la separa en dos aéreas, una predominante costa adentro (*on-shore*) y otra totalmente costa afuera (*off shore*).

Con las descripciones realizadas por diferentes autores se estima de una forma muy general la situación litológica presente en el pozo estratigráfico ANH-BVTURA-1-ST-P y que se compila en la columna estratigráfica (ver figura 14). En esta describen los espesores que se encontraran en la perforación, así como las diferentes capas litoestratigráficas.

Figura 15. Columna estratigráfica y espesores aproximados en el pozo estratigráfico ANH-BVTURA-1-ST-P



Fuente: Proyecto Pozos Profundos UIS-ANH

4.4.1 Prognosis geológica. El objetivo del pozo ANH-BVTURA-1-ST-P era atravesar las formaciones Mallorcaín, Raposo; Guapi, San Agustín, Chagüí, Angostura y Viche. Esta secuencia descrita para la zona de Tumaco, se presenta en los pozos perforados Tambora-1, Chagüí-1, Majagua-1, Remolino Grande-1 y Sandi-1.

Tabla 5. Prognosis geológica pozo ANH-BVTURA-1-ST-P

Formación	Prof. Aprox. (topes, pies)	Elevación sobre el nivel del mar		Espesor (pies)
		m	pies	
Mayorquin	0	20,40	67	900
Raposo	-900	-254	-833	1.100
Guapi	-2.000	-589	-1.933	1.000
San Agustín	-3.000	-918	-2.933	3.000
Chagüí	-6.000	-1.808	-5.933	1.500
Angostura y Viche	-7.500	-2.265	-7.433	4.600

Fuente: Grupo de Geología proyecto Pozos Profundos UIS-ANH

5. NORMATIVIDAD

Como consecuencia de cada una de las actividades de la industria petrolera (exploración, explotación, tratamiento, almacenamiento y transporte), se hace necesario el ejercer un constante control sobre los residuos generados por estas actividades, los cuales implican no solo la vulnerabilidad al medio ambiente sino también un riesgo para la salud humana.

Antes de entrar en detalle a cada uno de los decretos, normas y leyes preestablecidas por el ministerio del medio ambiente y el gobierno colombiano, se hace necesario dar la definición de lo que es un residuo, y dar a conocer su clasificación dentro del marco legal colombiano.

5.1 DEFINICIÓN DE RESIDUO

- Todo material (sólido, semisólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir, que ha sido abandonado, reciclado o considerado inherentemente residual.²¹
- Cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación se divide en aprovechable y no aprovechable. Igualmente, se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas.²²

²¹ Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

²² Normatividad Colombiana

5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS²³

Todos los residuos deben ingresar a un sistema de gestión que incluye manejo, tratamiento, transporte y disposición final. El sistema de gestión depende del tipo de residuo que se considere, debiéndose prestar especial atención a la gestión de los residuos peligrosos por su capacidad inherente de provocar efectos adversos. Es por esta razón que debe quedar clara la clasificación de residuos utilizada, a fin de minimizar los riesgos derivados de un residuo peligroso.

Los residuos pueden ser clasificados utilizando diferentes criterios, así se tiene por ejemplo: estado, origen, tipo de tratamiento al que serán sometidos o potenciales efectos derivados del manejo.

5.2.1 Clasificación por Estado. El residuo es definido de acuerdo al estado físico en que se encuentra, los grupos que pertenecen a este caso son: sólidos, semisólidos, líquidos y gaseosos.

5.2.2 Clasificación por Origen. Se refiere a una clasificación sectorial y no existe límite en cuanto a la cantidad de categorías o agrupaciones que se pueden realizar. A continuación se mencionan algunas categorías:

- Domiciliarios, urbanos o municipales
- Industriales
- Agrícolas, ganaderos y forestales
- Mineros
- Hospitalarios o de Centros de Atención de Salud
- De construcción
- Portuarios
- Radiactivos

²³ Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos. Capítulo 2. Páginas 16-18.

5.2.3 Clasificación por tipo de tratamiento al que serán sometidos. Este criterio de clasificación es útil para orientar la gestión integral de residuos de un país y particularmente útil cuando el objetivo es definir la infraestructura que se necesita para el tratamiento y la disposición final de los residuos. Es así que se pueden definir entre otros:

- Residuos asimilables a residuos urbanos y que por lo tanto se pueden disponer en forma conjunta.
- Residuos para los cuales la incineración es el tratamiento idóneo.
- Residuos que se deben disponer en rellenos de seguridad.
- Residuos generados en grandes cantidades y que por lo que requieren tratamiento particular.

5.2.4 Clasificación por los potenciales efectos derivados del manejo. Dentro de este tipo de residuos se encuentran:

- Residuos peligrosos
- Residuos peligrosos no reactivos.
- Residuos inertes.
- Residuos no peligrosos

5.3 RESIDUOS PELIGROSOS²⁴

Un residuo peligroso se define como "Un residuo en cualquier estado físico que debido a su cantidad, concentración y sus características físicas, químicas o infecciosas puede:

- Causar o contribuir significativamente a incrementar la mortalidad o las enfermedades serias, irreversibles o que produzcan incapacitación.
- Poseer un peligro substancial o potencial para la salud humana o el ambiente

²⁴ Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos. Bases conceptuales. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial Republica de Colombia

cuando son tratados, almacenados, transportados o dispuestos inadecuadamente.

5.3.1 RESIDUOS PELIGROSOS CONFORME LA RESOLUCION 2309 DE 1986

DE COLOMBIA²⁵. Dentro de la figura 15 mostrada a continuación se hace resaltar los residuos especiales, debido a que dentro de esta clasificación como se puede detallar en su definición, se encuentran los lodos de perforación y los cortes de perforación, siendo estos últimos la materia de estudio del proyecto.

Figura 16. Clasificación De Los Residuos Peligrosos



Fuente: Autores

²⁵ Ley 99 de 22 de diciembre de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

Residuos especiales: corresponde a las basuras con características especiales a que se refiere el artículo 31 de la Ley 9 de 1979. Para los efectos de esta resolución se denominan Residuos Especiales, los objetos, elementos o sustancias que se abandonan, arrojan, desechan, descartan o rechazan y que sean patógenos, tóxicos, combustibles, inflamables; sin dejar de lado los empaques y los envases que los hayan contenido, como también los lodos, cortes de perforación, cenizas y similares.

5.4 LEYES Y NORMAS AMBIENTALES QUE RIGEN EN COLOMBIA

En Colombia se han aplicado ciertos modelos basados en normativas extranjeras, sin embargo como iniciativa propia del pueblo colombiano para velar por el bienestar del medio ambiente, en la constitución política de Colombia de 1991, se introdujo un capítulo en busca del equilibrio de las acciones llevadas a cabo por el hombre y la integridad del medio ambiente, consagrando derechos individuales y colectivos en cabeza de los individuos y de las empresas, relacionadas con la protección de los recursos naturales y creando entes de vigía para el cumplimiento de las normas en pro de la preservación, restauración y defensa del medio ambiente.

5.4.1 LEY 99 DE 1993²⁶ Fundamentada en la concepción del desarrollo sostenible y apoyada en los conceptos de la cumbre de Rio de Janeiro.

Esta ley establece como competencia de las autoridades ambientales y de los organismos fiscalizadores, vigilar que toda actividad se desarrolle bajo el concepto de Desarrollo sostenible, haciendo indispensable que en todo proceso de

²⁶ Ley 99 de 22 de diciembre de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

planeación de actividades se tenga en cuenta medidas o acciones contempladas en los respectivos Estudios de Impacto Ambiental (EIA), Planes de Manejo Ambiental (PMA), Requerimientos Ambientales y Planes de Gestión Ambiental Institucional.

Los Planes de Manejo Ambiental-PMA son una alternativa de manejo ambiental para proyectos y/o actividades que no ocasionan mayores daños o impactos al medio ambiente (proyectos de bajo y mediano impacto), mediante los que se establece de manera detallada las acciones que se requieren para prevenir, mitigar, controlar, compensar y corregir, los posibles efectos o impactos ambientales negativos causados en desarrollo de un proyecto, obra o actividad; incluyendo además los planes de seguimiento, evaluación, monitoreo y contingencia.

5.4.2 Ley 99 de 1993 y Decreto 2820 del 5 de Agosto de 2010. En Colombia, la ley 99/93, en su artículo 1, estableció los principios generales que rigen la política Ambiental Colombiana y que, por tanto, orientan la gestión ambiental de las actividades industriales.

El decreto 2820 emitido por el MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL “Por el cual se reglamenta el Título VII de la ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales”

5.4.3 Decreto – Ley 2811 de 1974²⁷ Contiene las normas técnicas de manejo, uso, aprovechamiento, explotación, conservación, preservación, protección y

²⁷ El Decreto 2820 del 5 de agosto de 2010 emitido por el MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL “Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales”

restauración de los recursos naturales renovables, armoniza la normatividad en materia de aguas, suelos, bosques y fauna buscando de esta manera un manejo integral de los recursos naturales.

5.4.4 Decreto 4741 de 30 de Diciembre DE 2005²⁸ Es uno de los decretos más importantes, en cuanto a la normatividad colombiana que trata los residuos o desechos peligrosos. Este decreto tiene por objeto prevenir la generación de residuos o desechos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos o desechos generados, con el fin de proteger la salud humana y el ambiente.

Las disposiciones del presente decreto se aplican en el territorio nacional a las personas que generen, gestionen o manejen residuos o desechos peligrosos.

Este decreto concibe en sus 28 artículos y respectivos párrafos las responsabilidades, deberes que debe tener el generador, receptor y quien transporta los residuos peligrosos; y todo lo concerniente al manejo adecuado de estos residuos. A continuación se mencionaran dos de los artículos más relevantes de este decreto para el presente tema de estudio:

- **Artículo 4. Principios.** El respectivo decreto se rige por los siguientes principios: Gestión Integral, ciclo de vida del producto, responsabilidad integral del generador, producción y consumo sostenible, precaución pública, internalización de costos ambientales, planificación, gradualidad y comunicación del riesgo.

- **Artículo 5°. Clasificación de los residuos o desechos peligrosos.** El generador podrá demostrar ante la autoridad ambiental que sus residuos no presentan ninguna característica de peligrosidad, para lo cual deberá efectuar la caracterización físico-química de sus residuos o desechos. Para tal efecto, el generador podrá proponer a la autoridad ambiental los análisis de

²⁸ Decreto 4741 del 30 de diciembre de 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

caracterización de peligrosidad a realizar, sobre la base del conocimiento de sus residuos y de los procesos que los generan, sin perjuicio de lo cual, la autoridad ambiental podrá exigir análisis adicionales o diferentes a los propuestos por el generador.

La mezcla de un residuo o desecho peligroso con uno que no lo es, le confiere a este último, características de peligrosidad y debe ser manejado como residuo o desecho peligroso

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial podrá mediante acto administrativo, incorporar nuevos residuos o desechos peligrosos a las listas establecidas en el Anexo I y en el Anexo II del presente decreto.

5.4.5 Decreto 1609 de 2002.²⁹ Este decreto se basa en la Norma Técnica Colombiana NTC 1692, tiene como objetivo establecer los requisitos técnicos y de seguridad para el manejo y transporte de mercancías peligrosas por carretera en vehículos automotores en todo el territorio nacional, con el fin de minimizar los riesgos, garantizar la seguridad y proteger la vida y medio ambiente. Aplica al transporte terrestre y manejo de mercancías peligrosas, los cuales comprenden todas las operaciones y condiciones relacionadas con la movilización de estos productos, la seguridad de los envases y embalajes, la preparación, envío, carga, segregación, trasbordo, trasiego, almacenamiento en tránsito, descarga y recepción en el destino final.

5.4.6 Ley 430 de 1998³⁰ La presente ley, tiene como objetivo regular la prohibición de introducir desechos peligrosos al territorio nacional, según lo establecido con el Convenio de Basilea. Así mismo regula la infraestructura de la que deben ser

²⁹ Decreto 1602 de 31 de Julio de 2002. Por el cual se reglamenta el manejo y transporte automotor de mercancías peligrosas por carretera.

³⁰ Ley 430 de 1998. Por la cual se dictan normas prohibitivas, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.

dotadas las autoridades aduaneras y zonas francas portuarias, con el fin de detectar de manera técnica y científica la introducción de estos residuos.

Por otra parte, establece la obligación del generador o productor de residuos peligrosos a realizar la caracterización físico- química de los mismos a través de laboratorios acreditados e informar a las personas naturales o jurídicas que se encarguen del almacenamiento, recolección y transporte, tratamiento o disposición final de los mismos.

5.5 NORMATIVIDAD EXTRANJERA COMO MODELO DE APLICACIÓN EN LA LEGISLACIÓN COLOMBIANA

En Colombia las normas pertinentes al manejo ambiental están basadas en la norma estadounidense Louisiana 29B, esta norma es la pionera de las reglamentaciones dadas a todas las actividades industriales que afectan el medio ambiente. Específicamente en el reglamento de Louisiana en su título 43, parte XIX, orden estatal 29B. En el capítulo 3 están contemplados todos aquellos criterios y parámetros tenidos en cuenta para el manejo y disposición final de todos los residuos ocasionados por actividades de la industria, pertinentes al control de contaminación, almacenamiento in situ, tratamiento y disposición de residuos de las actividades de exploración y producción petrolera que se generan en la perforación y producción de petróleo y gas.

En la norma, las fosas que contienen residuos no peligrosos en campos petroleros se pueden enterrar mediante la mezcla de suelo con los residuos, siempre y cuando el material a ser enterrado cumpla con los siguientes criterios descritos a continuación en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Parámetros objeto de monitoreo en cortes de perforación

PARÁMETROS	LÍMITES PERMISIBLES
Ph	6-9
Contenido de humedad	< 50%
Conductividad eléctrica	< 4 Mmhos/cm
Grasas y aceites	< 1% (peso seco)
Relación de adsorción de Sodio (RAS)	< 12
Porcentaje de sodio intercambiable	< 15%
Tope de la mezcla	Se debe enterrar mínimo 5 ft bajo el nivel del suelo y luego ser cubierta con 5 ft de tierra nativa
Base de la mezcla	La parte inferior de la mezcla debe estar por lo menos 5 ft por encima de la lámina de agua en época de lluvias.

Fuente: Tomado de Norma 29B del estado de Lousiana, Estados Unidos de América. (Sep. 1999). [Modificada por autores]

Tabla 7. Límite del contenido total de metales (ppm) en los residuos mezclados con la tierra

METAL	CONTENIDO TOTAL DE METALES (PPM)
Arsénico (Ar)	10
Cadmio (Cd)	10

Tabla 7. Continuación

METAL	CONTENIDO TOTAL DE METALES (PPM)
Cromo (Cr)	500
Plomo (Pb)	500
Mercurio (Hg)	10
Plata (Ag)	200
Selenio (Se)	10
Zinc (Zn)	500

Fuente: CASTELBLANCO CASALLAS, Iván. NINO AVENDANO, Jhon. Manejo Y Tratamiento Actual De Residuos Aceitosos En La Industria Petrolera Colombiana. Tesis de pregrado.UIS. 2011

Tabla 8. Nivel de regulación de una sustancia contaminante

CÓDIGO EPA	CONTAMINANTE	NIVEL DE REGULACIÓN (MG/L)
D004	Arsénico (As)	0,5
D005	Bario (Ba)	100
D018	Benceno	0,5
D006	Cadmio (Cd)	1
D007	Cromo (Cr)	5
D008	Plomo (Pb)	5
D010	Selenio (Se)	1
D011	Plata (Ag)	5

Fuente: <http://www.ehso.com/cssepa/TCLP.htm>

6. ESTUDIO DE LA BIORREMEDIACIÓN

En las últimas décadas, entre las técnicas empleadas para contrarrestar los efectos de los contaminantes, se comenzó a utilizar una práctica llamada Biorremediación. El término Biorremediación fue acuñado a principios de la década de los '80, y proviene del concepto de *remediación*, el cual hace referencia a la aplicación de estrategias físico-químicas para evitar el daño y la contaminación en suelos.

Es de esta manera que nace la posibilidad de aplicar estrategias de remediación biológicas, basadas esencialmente en la observación de la capacidad de los microorganismos de degradar en forma natural la concentración y la contaminación de distintas sustancias como el petróleo, hidrocarburos policíclicos y aromáticos, solventes industriales, pesticidas y metales.

La biorremediación surge como una rama de la biotecnología que busca resolver los problemas de contaminación mediante el uso de seres vivos (microorganismos y plantas) capaces de degradar compuestos que provocan desequilibrio en el medio ambiente, ya sea suelo, sedimento, fango o mar.³¹

En otras palabras, la Biorremediación puede ser definida como el conjunto de operaciones y procesos destinados a controlar y optimizar los parámetros que influyen sobre la degradación microbiológica, a fin de acelerar el proceso de biodegradación natural en ambientes contaminados. Se aplica a derrames accidentales de petróleo y sus derivados, pero también en el tratamiento de efluentes y a residuos peligrosos (DECHEMA, 1992; Vecchioli et al., 1995).³²

³¹ O.R. Costanza, G.I. Vecchioli, M.T. Del Panno, I.S. Morelli, M.T. Paineira Técnicas de biorremediación ensayos de tratabilidad - *NIVEL II*

³² LÓPEZ LAFUENTE, Antonio. Biorremediación y Fitorremediación en suelos contaminados

6.1 TIPOS DE BIORREMEDIACION

De la biorremediación se derivan otras técnicas que, según las variables involucradas en los suelos, sitios a descontaminar y mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes, se puede hacer la siguiente clasificación.

Tabla 9. Técnicas de biorremediación

BIORREMEDIACIÓN	Según las variables involucradas en el suelo y técnicas de descontaminación	Electrobioreclamation (Electrobiorremediación)
		Bioslurping
		Biopile (Biopilas)
	Según la mezcla de microorganismos o plantas	Degradación enzimática
		Fitorremediación
		Remediación microbiana

Fuente: Autores

6.1.1 Electrobioreclamation (Electrobiorremediación). Utilizada en suelos de baja permeabilidad, puesto que esta propiedad del suelo es una de las condiciones básicas para una biorremediación exitosa debido a que involucra el transporte de nutrientes y oxígeno molecular.

La permeabilidad es muy baja en suelos arcillosos, para lo cual se crea esta técnica basada en la aplicación de un potencial eléctrico al terreno provocando un transporte cinético.

6.1.2 Bioslurping. Este método se basa en colocar tuberías para la extracción de vapores, donde el hidrocarburo debe ser liviano; en este método se extrae agua contaminada o líquidos no absorbidos que taponan los capilares e impiden el flujo de aire y nutrientes necesarios en la biorremediación.

El “bioslurping” es utilizado en sedimentos finos a medios finos y muy fracturados.

6.1.3 Biopile (Biopilas). Este tipo de biorremediación se aplica a hidrocarburos volátiles. Este método es considerado como “ex situ”, por usar bioceldas que permiten la extracción de vapores que pueden ser almacenados o tratados posteriormente.

6.1.4 “Bioventing” (Bioaireación). Es una técnica de remediación “in situ” que combina la aireación convencional con la biodegradación. El proceso de ventilación del suelo toma ventaja de la alta volatilidad natural de los componentes que componen la mezcla de hidrocarburos. La biodegradación tiene la capacidad de degradar los componentes menos volátiles de compuestos de hidrocarburos de alto peso molecular, como también a los más volátiles, los microorganismos los pueden remover durante la ventilación natural. La integración de estos dos procesos permite un mayor rango de productos combustibles a ser remediados “in situ”³³

³³ GOMEZ, Orlando Aparicio. PORTILLA, Hellmuth Esteban. Biorremediación de suelos contaminados con derrames de crudos. Bucaramanga 1997

6.1.5. Degradación enzimática³⁴ Este tipo de degradación consiste en el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas enzimas se obtienen en cantidades industriales por bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas por las empresas biotecnológicas.

Por ejemplo, existe un amplio número de industrias de procesamiento de alimentos que producen residuos que necesariamente deben ser posteriormente tratados.

En estos casos, se aplican grupos de enzimas que hidrolizan (rompen) polímeros complejos para luego terminar de degradarlos con el uso de microorganismos. Un ejemplo lo constituyen las enzimas lipasas (que degradan lípidos) que se usan junto a cultivos bacterianos para eliminar los depósitos de grasa procedentes de las paredes de las tuberías que transportan los efluentes. Otras enzimas que rompen polímeros utilizados de forma similar son las celulasas, proteinasas y amilasas, que degradan celulosa, proteínas y almidón, respectivamente.

Además de hidrolizar estos polímeros, existen enzimas capaces de degradar compuestos altamente tóxicos. Estas enzimas son utilizadas en tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes. Por ejemplo, se emplea la enzima peroxidasa para iniciar la degradación de fenoles y aminas aromáticas presentes en aguas residuales de muchas industrias.

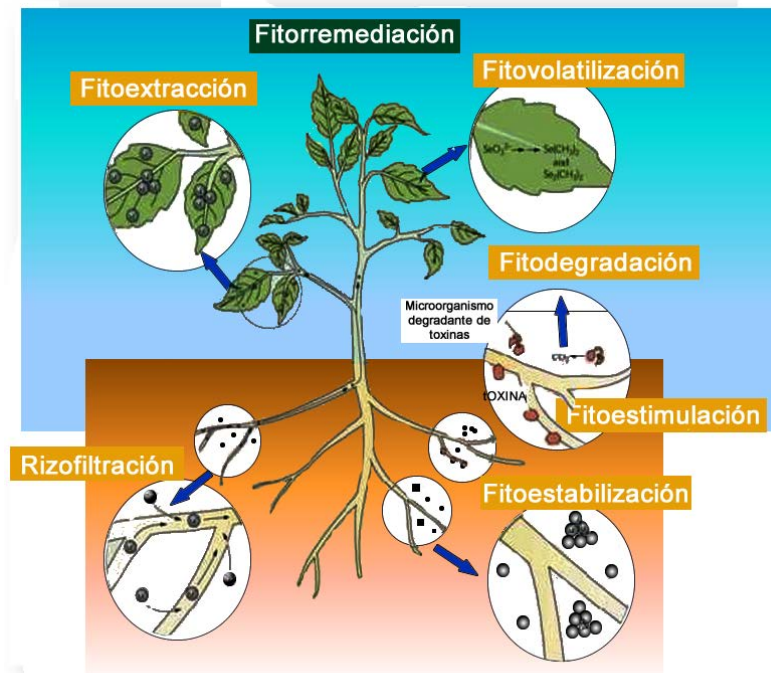
6.1.6. Fitorremediación o remediación con plantas. La fitorremediación constituye una variación de las técnicas de biorremediación, pero se concreta en el *«uso de plantas verdes y los microorganismos asociados a ellas, así como las*

³⁴ VERACIERTA ALFARO, Luis Emilio. Evaluación de las técnicas realizadas por el centro de tratamiento y recuperación de desechos en el Campo Hamaca, Estado Anzoátegui". Maturín, Febrero De 2006

enmiendas del suelo y técnicas agronómicas dirigidas a liberar, contener, o transformar en compuestos inocuos a los contaminantes del suelo»³⁵

En otras palabras, la fitorremediación consiste básicamente en el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados (ver figura 15). Aunque se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos. Esta técnica comprende tanto los procesos dirigidos a liberar el contaminante de la matriz del suelo (descontaminación), como los encargados de secuestrarlos en dicha matriz (estabilización).

Figura 17. Procesos en la Fitorremediación



Fuente: [EcologiaLapampa.gov.ar/temas ambientales/bioremediacion.html](http://EcologiaLapampa.gov.ar/temas_ambientales/bioremediacion.html)

³⁵ CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. and HSU, F. C. (1996): Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agron.* **56**: 55-114.

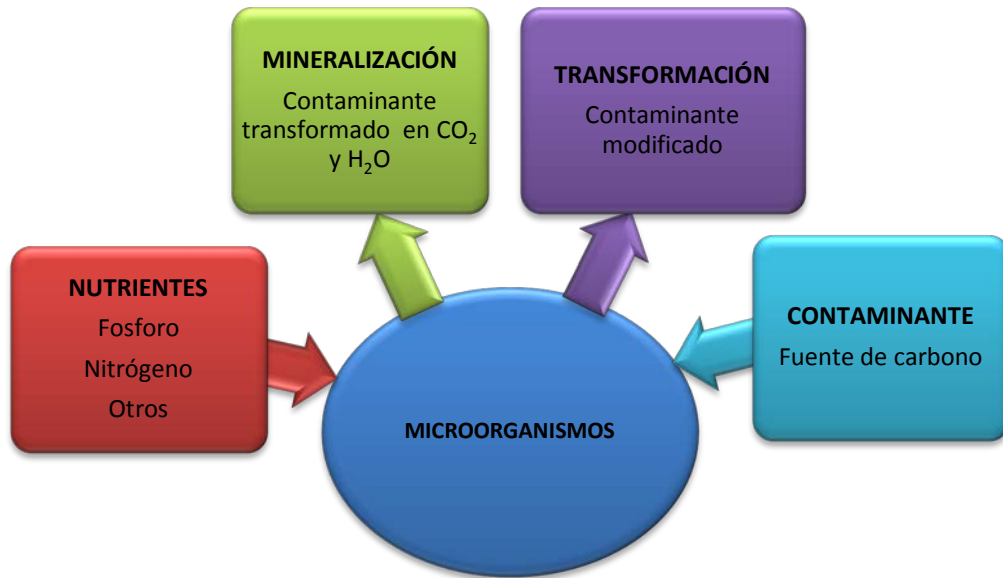
6.1.7 Remediación microbiana. En este tipo de remediación se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en Biorremediación pueden ser los ya existentes (autóctonos) en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser agregados o inoculados.

La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas. El hombre ha aprendido a aprovechar estos procesos metabólicos de los microorganismos. De esta forma, los microorganismos que pueden degradar compuestos tóxicos para el ambiente y convertirlos en compuestos inocuos o menos tóxicos, se aprovechan en el proceso de Biorremediación. De esta forma, reducen la polución de los sistemas acuáticos y terrestres.

Existen bacterias y hongos que pueden degradar con relativa facilidad el petróleo y sus derivados, benceno, tolueno, acetona, pesticidas, herbicidas, éteres, alcoholes simples, entre otros. Los metales pesados como uranio, cadmio y mercurio no son biodegradables, pero las bacterias pueden concentrarlos de tal manera que logran su aislamiento para posteriormente lograr eliminarlos más fácilmente.

Las actividades microbianas en el proceso de la biorremediación se pueden resumir en la figura 18.

Figura 18. Metabolismo Microbiano



Fuente: Ecologialapampa.gov.ar/temas-ambientales/bioremediacion.html.

[Modificada por autores]

6.2 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA BIORREMEDIACIÓN³⁶

VENTAJAS:

- Generalmente solo origina cambios físicos en el medio.
- Cuando se usa correctamente no produce efectos adversos significativos.
- Evita la liberación de gases dañinos al aire y se generan muy pocos residuos.
- Puede ser útil para retirar algunos de los compuestos tóxicos del petróleo.
- Ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas.
- No requiere tanto equipamiento ni trabajo como la mayoría de los métodos alternativos. Por lo tanto, suele resultar más económica.

³⁶ RINCÓN LIZCANO, Martha Cecilia. Estudio De La Biorremediación Como Una Alternativa En La Mitigación De La Contaminación Ambiental. Especialización En Química Ambiental UIS. 2004

LIMITACIONES:

- Para muchos tipos de contaminante su efectividad no ha sido determinada
- Muy difícil aplicación en el mar
- El tiempo necesario para actuación es largo
- Su implementación es específica para cada lugar contaminado
- Su optimización requiere información sustancial acerca del lugar contaminado y las características del vertido³⁷
- la etapa limitante de la biodegradación o detoxificación de la mayoría de compuestos en el medio ambiente se relacionan con la biodisponibilidad

³⁷ PARPATIYAR. Treatment of trichloroethylene (TCE) in Membrane Biofilter, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 50. P57-64. 1996

7. MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN

Cuando se aplica el término de microorganismos para referirse a células de vida libre, se está incluyendo a todos los procariotas (bacterias) y a los eucariotas unicelulares (protozoos, algas y hongos). Los microorganismos están presentes en los medios naturales y son responsables de la mayor parte de los ciclos compuestos como carbono, nitrógeno, azufre y fósforo. Todos estos microorganismos juegan un papel muy importante en los procesos de Biorremediación.

Este selecto grupo está integrado por las bacterias, algas, hongos, protozoos, los cuales cumplen con los cinco principios característicos de las células vivas³⁸:

1. **Autoalimentación o nutrición:** las células toman las sustancias químicas del ambiente, las transforman, liberan energía y productos de desecho.
2. **Autoduplicación o desarrollo:** las células son capaces de dirigir su propia síntesis. Al crecer se dividen dando dos células cada una idéntica a la original.
3. **Diferenciación:** la mayor parte de las células pueden presentar cambios en su forma o función. La diferenciación suele ser parte del ciclo de vida celular: se forman estructuras especializadas comprometidas con la reproducción sexual, la dispersión, la sobrevivencia en condiciones desfavorables (esporas, cistos, etc.)
4. **Señalamiento químico:** interactúan o se comunican con otras células, por señales químicas.
5. **Evolución:** es la introducción de cambios hereditarios como resultado de la selección natural. Consecuencia de estos cambios (que ocurren a baja velocidad pero regular en todas las células) es la selección de los organismos mejor capacitados para vivir en determinado ambiente.

³⁸ FRIONI, Lilian. Procesos microbianos. Editorial de la fundación universidad nacional de rio de cuarto Argentina. 1999

7.1 BACTERIAS

Debido a su diversidad, las bacterias se encuentran en comunidades heterogéneas, algunas son degradadores primarios, esto es, inician la degradación de los compuestos orgánicos en los suelos, y otras especies crecen en los compuestos resultantes de una primera degradación parcial.

Los actinomicetos son un grupo intermedio entre las bacterias procariontas más primitivas y los hongos eucariotas. Aunque taxonómicamente estos organismos son clasificados como bacterias, los actinomicetos son similares a los hongos, producen filamentos muy ramificados llamados «hifas», que se desarrollan dentro del micelio. Los actinomicetos son muy abundantes en los suelos, toleran un intervalo amplio de pH y temperatura, y son capaces de crecer en condiciones muy limitadas de nutrientes y agua. Su presencia favorece la degradación de fenoles, compuestos aromáticos, aromáticos clorados y lignocelulosas. En el suelo los géneros más frecuentes son: *Streptomyces* y *Nocardia*.³⁹

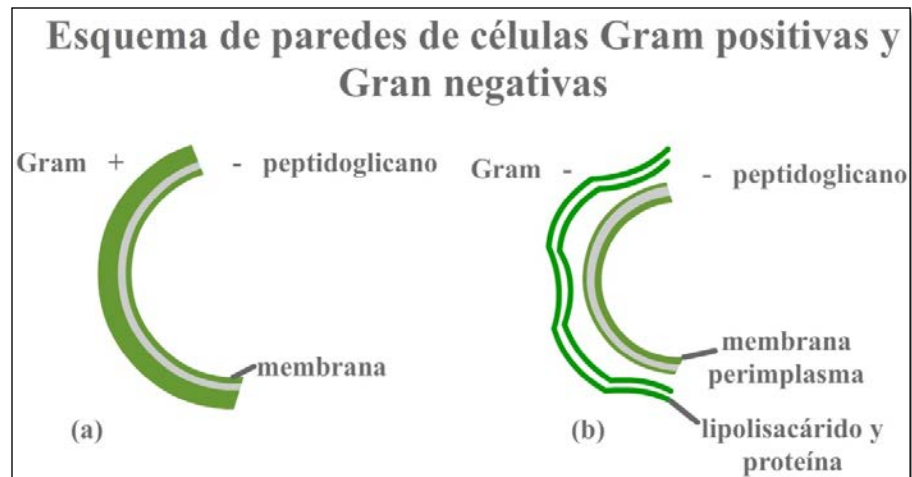
Las bacterias se clasifican como Gram positivas y Gram negativas según su respuesta a la técnica de tinción de GRAM como se muestra en la figura 17. Este procedimiento denominado así por el histólogo Christian Gram quien desarrollo el procedimiento, en el cual aparecen unas bacterias coloreadas con el colorante violeta de genciana (Gram-positivas) y otras que se decoloran al agregarles el alcohol acetona y toman el colorante de contraste safranina (Gram-negativas); esto es debido a diferencias estructurales y químicas de la pared, en las Gram-negativas está compuesta por varias capas y es más compleja su composición (Lipopolisacaridos, proteínas, lipoproteínas y Péptidoglucano), además algunas de estas bacterias tienen una membrana fuera del complejo de la pared celular

³⁹ EWEIS, J. B.; ERGAS, S. J.; CHANG, D. P. Y. and SCHROEDER, E. D. (1999): Principios de Biorrecuperación. McGraw Hill, New York, p. 327.

³⁹ AUSR, S.; FERNANDO, T.; BROCK, B.; TUISEL, H. and BUMPUS, J. (1988): Biological Treatment of Hazardous Wastes by *Phanerochaete Chrysosporium*. G. Lewandowski et al. (Eds.), Engineering Foundation, New York.

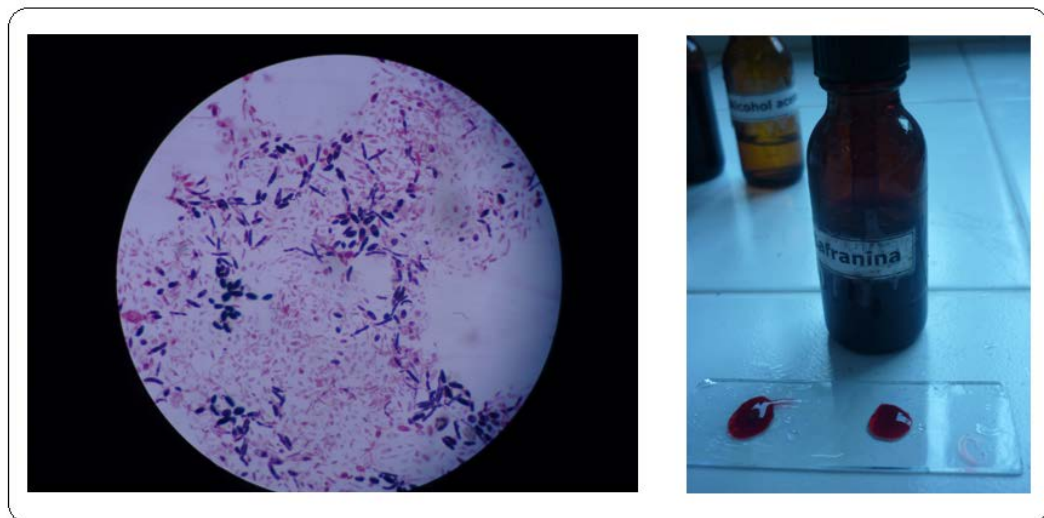
formada por un lipopolisacárido conocido como Endotoxina. Las Gram-positivas están formadas por Péptidoglicano el cual está en mayor proporción.

Figura 19. Esquema de paredes de células Gram-positivas y Gram-negativas



Fuente: FRIONI, Lilian. Procesos microbianos. Editorial de la fundación universidad nacional de rio de cuarto Argentina. 1999

Figura 20. Coloración de Gram y tinción de microorganismos



Fuente: Autores

7.1.1 Crecimiento bacteriano⁴⁰ El crecimiento se mide por el número de bacterias que se forman en determinado tiempo y dan origen a una población de cultivo. Este complejo proceso depende de las clases y concentración de sustancias nutrientes como de la disponibilidad de la misma y una fuente continua de energía requerida para la reacción endotérmica de síntesis.

Si se introduce una bacteria en un recipiente cerrado con los nutrientes necesarios de temperatura, pH, oxígeno; conocido como medio de cultivo, se puede presentar gráficamente el crecimiento de dicha bacteria con una curva (ver figura 19), en la que se muestra varias fases de dicho desarrollo: de latencia o adaptación, exponencial, estacionaria y de muerte.

- 1. Fase de Adaptación o Latencia:** periodo de ajuste a las nuevas condiciones del medio de cultivo
- 2. Fase Logarítmica (Fase Exponencial)**⁴¹: tras un intervalo durante el cual la tasa de crecimiento celular se incrementa gradualmente, las células crecen con una velocidad constante, máxima, que puede ser descrita por la ecuación:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \mu N$$

En donde: N es la concentración de células (mg/cm³)

t es el tiempo de incubación (h)

μ es la tasa de crecimiento específico (h⁻¹)

Integrando la ecuación se obtiene:

$$X_t = X_o e^{\mu t}$$

Donde: X_o es la concentración de células al tiempo cero.

X_t es la concentración de células tras un intervalo de tiempo (t).

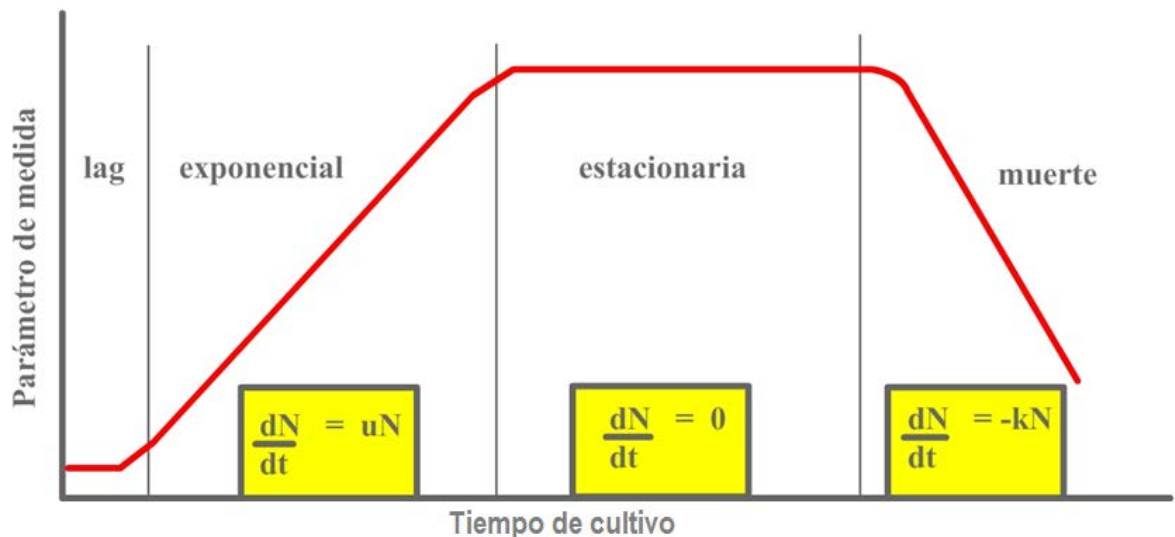
⁴⁰ TORRES CHAPARRO, Alix. URIBE, Nelson. Microbiología básica y aplicada. UIS . Bucaramanga, 2002

⁴¹ APARICIO GOMEZ, Orlando. PORTILLA RODRIGUEZ, Hellmuth. Biorremediación de Suelos Contaminados con Derrames de Crudos. Monografía.UIS.1997

La representación del logaritmo natural de la concentración celular frente al tiempo es una línea recta cuya pendiente es la tasa de crecimiento específico, máxima en condiciones estables, que se conoce como tasa de crecimiento específico máximo, o μ_{max} .

- 3. Fase Estacionaria:** en esta fase se agotan los nutrientes, aparecen productos tóxicos y la tasa de multiplicación bacteriana y la de la muerte se equilibran
- 4. Fase de Muerte o Declinación:** la falta de nutrientes fundamentales y la presencia de productos tóxicos provocan la muerte rápida.

Figura 21. Curva de crecimiento bacteriano



Fuente: TORRES CHAPARRO, Alix. URIBE, Nelson. Microbiología básica y aplicada. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, 2002

7.1.2 Nutrición y metabolismo. Las bacterias para vivir y reproducirse, deben disponer de nutrientes necesarios (fuentes de carbono, nitrógeno, azufre, fósforo y minerales), para efectuar su síntesis biológica y formar nuevos componentes celulares.

En las bacterias el metabolismo implica dos clases de transformaciones químicas: catabolismo y anabolismo. El primero constituye una serie de procesos bioquímicos por medio de los cuales los microorganismos obtienen energía a partir de compuestos químicos o lumínicos. La segunda transformación llamada también biosíntesis, equivale a procesos bioquímicos por medio de los cuales los microorganismos construyen las macromoléculas que los constituyen.

Dentro de los elementos constitutivos de las bacterias los más importantes son:

- Agua, que representa el 80-90% del peso de la bacteria
- El peso seco está representado por moléculas que contienen carbono, nitrógeno, oxígeno, fósforo, azufre e iones minerales
- Entre los iones minerales se encuentran: PO_4 , SO_4 , Ca, Na, Cl; algunas requieren otra serie de iones como Mn, Zn, Cu, Ni, B.
- Las sales minerales (sulfato de magnesio, fosfato de potasio, cloruro de calcio, carbonato de calcio), sirven para mantener el equilibrio iónico o como elementos metabólicos de grupos enzimáticos y pigmentos.

La bacteria para crecer, es decir formar poblaciones, requiere nutrientes para realizar la síntesis macromolecular, pero cada grupo de bacterias varía en cuanto a sus demandas nutricionales y las fuentes de energía metabólica. Los productos químicos exteriores a partir de los cuales se construye una célula bacteriana se denominan nutrientes. Estos son tomados por la bacteria a través de su pared y transformados en su interior en constituyentes celulares.

7.1.3 Clasificación de las bacterias. Las bacterias del suelo pueden ubicarse en dos grandes grupos: las especies nativas o autóctonas que son residentes verdaderos y los organismos invasores o alóctonos. En el primer caso estas poblaciones pueden presentarse en estados resistentes y perdurar por largos períodos sin tener actividad metabólica, pero en determinado momento estas

formas nativas proliferan y participan en las funciones bioquímicas de la comunidad. Por el contrario, las especies alóctonas, no participan inicialmente de manera significativa en las actividades de la comunidad; entran y permanecen inactivas por cortos periodos de tiempo, seguidamente si se dan las condiciones necesarias entran en acción.

Para entender el comportamiento de las bacterias resulta mejor desde el punto de vista de su clasificación: según la fuente de carbono, energía y según la tolerancia de oxígeno, mostrado en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Clasificación de las bacterias según fuentes de carbono y energía

CLASIFICACIÓN DE LAS BACTERIAS SEGÚN LA FUENTE DE CARBONO	
NOMBRE	CARACTERÍSTICA
Autótrofas	Utilizan el CO ₂ como única fuente de carbono
Heterótrofas	Utilizan compuestos orgánicos como fuentes de carbono
CLASIFICACIÓN DE LAS BACTERIAS SEGÚN LA FUENTE DE ENERGÍA	
Fotótrofas	Utilizan las radiaciones solares (energía luminosa) como fuente de energía. Algunas utilizan la energía lumínica y la transforman en energía química (ATP)
Fotolitótrofas	Si el radical dador de electrones es un compuesto inorgánico como el azufre
Quimiótrofas	Si la fuente de energía es de carácter químico por reacciones de oxidación-reducción
Quimiolitótrofa	Si el radical dador de electrones es un compuesto mineral
Quimioorganótrofas	Si el radical dador de electrones es un compuesto orgánico

Fuente: TORRES CHAPARRO, Alix. URIBE, Nelson. Microbiología básica y aplicada. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. [Modificada por autores]

Tabla 11. Clasificación de las bacterias según la tolerancia de oxígeno

CLASIFICACIÓN DE LAS BACTERIAS SEGÚN LA TOLERANCIA DE OXÍGENO	
NOMBRE	CARACTERÍSTICA
Oxigénica o aerobia	Utilizan el oxígeno para su desarrollo, pueden tolerar concentraciones más altas al oxígeno del aire que es del 21%
Anoxigénicos o anaerobias	No pueden utilizar el oxígeno como aceptor final de electrones. Crecen en ambientes libres de oxígeno.
Microaerófilas	Emplean el oxígeno en concentraciones menores que la del aire.
Las bacterias que pueden utilizar ambas formas (aerobia y anaerobia) se denominan FACULTATIVAS	

Fuente: TORRRES CHAPARRO, Alix. URIBE, Nelson. Microbiología básica y aplicada. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. [Modificada por autores]

7.1.4 Condiciones físico-químicas de las bacterias.⁴²El desarrollo de microorganismos depende de determinadas condiciones presentes en el medio como son: concentraciones de H^+ , temperatura, presión osmótica, presencia de oxígeno y de CO_2 , humedad y presencia de luz, nutrientes, nitrógeno y estructura del suelo.

7.1.4.1 Concentraciones de H^+ . Los valores de pH del suelo seleccionan los microorganismos presentes. La mayoría de las bacterias comensales y patógenas crecen mejor en medio neutro o ligeramente alcalino (pH: 7.2-7.6). algunas sin embargo se desarrollan en pH ácido (acidófilas) como por ejemplo la

⁴² TORRRES CHAPARRO, Alix. URIBE, Nelson. Microbiología básica y aplicada. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, 2002. [Modificada por autores]

Lactobacillus, otras en cambio, son sensibles a los medios ácidos y toleran los álcalis, un ejemplo de ello es el *Vibrio cholerae*.

7.1.4.2 Temperatura. Este factor es de gran importancia para llevar a cabo los procesos de biodegradación. La condición de temperatura varía para las bacterias entre los límites extremos e intermedios. Las bacterias del suelo y del agua, viven a temperaturas entre los 20° y 40°C. Generalmente, a temperaturas superiores, a los 40° C se empieza a producir la desnaturalización de enzimas y proteínas de los microorganismos, así como por debajo de 0° C muchos pierden su actividad.⁴³ Aunque se puede dar el caso de que sean eficientes a altas temperaturas como es el caso de las bacterias termófilas y las hipertermofílicas.

Según la temperatura a la cual se desarrollan las bacterias se clasifican como:

- Bacterias Mesófilas, se desarrollan a temperaturas entre 20° y 40°C
- Bacterias Psicotrópicas, se desarrollan a temperaturas entre 5° y 20°C
- Bacterias Psicrófilas, se desarrollan por debajo de 5°C
- Bacterias Termófilas, sobreviven a temperaturas mayores de 40°C hasta 55° u 80°C
- Bacterias Hipertermofílicas, sobreviven por encima del punto normal de ebullición del agua.

7.1.4.3 Presión osmótica. En general las bacterias son bastante tolerantes a soluciones con contenido de sales entre 0,1% a 1%. Las bacterias Halófilas crecen a altas concentraciones de sales incluso a saturación.

⁴³ SIMS, R. C. (1993): Site characterization requirements pp. 3.1-3.8. In: Bioremediation of hazardous waste sites: Practical approaches to implementation. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.

7.1.4.4 Humedad y desecación. Estos microorganismos necesitan en general ambiente húmedo, pero aquellos que producen esporas son muy resistentes a la desecación, siendo ejemplo de ello las *Bacillus anthracis*, que pueden sobrevivir de 5 a 6 años en el suelo. Además el porcentaje de humedad influye sobre la tasa de biorremediación, debido a que la desecación inhibe la actividad microbiana.

En la tabla 12, se muestra el efecto de la humedad sobre la densidad de bacterias de un suelo

Tabla 12. Humedad del suelo y número de bacterias

% Humedad	% de la capacidad de campo	Bacterias totales (miles/g)	% relativo a la microflora total
6,5	30	9.980	33
10,0	50	11.890	40
16,1	65	16.410	55
17,4	70	29.960	100
21,7	100	25.280	84

Fuente: FRIONI, Lilian. Procesos microbianos. Editorial de la fundación universidad nacional de rio de cuarto Argentina. 1999

7.1.4.5 Presencia de luz. La oscuridad favorece el buen desarrollo de la comunidad microbiana, ya que ciertos rayos como los ultravioleta suministrados directamente las destruyen o en otros casos, inhiben su actividad de biodegradabilidad.

7.1.5 Las bacterias y la ecología. La materia orgánica es uno de los factores que más incide en la distribución de las bacterias del suelo, como resultado, suelos ricos en humus poseen mayor densidad bacteriana y la incorporación de restos frescos (abonos verdes) o pajas inicia una rápida estimulación microbiana, muy marcada en los primeros meses, pero disminuyendo a medida que el sustrato se degrada.

La tabla 13 presenta resultados de recuentos de varios grupos microbianos, en el perfil del suelo, y se observa que la materia orgánica es uno de los principales factores que explican la disminución de los grupos heterótrofos, con la profundidad.

La tabla 14 en otro estudio en el suelo, se observa el efecto de los mismos factores sobre la población bacteriana.

Tabla 13. Grupos microbianos en el perfil del suelo

Horizonte (cm)	Bacterias		Actinomicetos	Hongos	Algas	Protozoos
	Aerobias	Anaerobias				
A0 (0-10)	1.116.915	1.000	11.335	303.000	500	640
A1 (10-12)	1.111.000	70.000	16.000	165.000	5.000	320
A2 (12-20)	317.640	181.000	11.950	77.500	100	40
B (20-49)	19.750	700.000	7.250	14.740	100	10
C (50-100)	463	10.000	197	1.850	0	0

Fuente: FRIONI, Lilian. Procesos microbianos. Editorial de la fundación universidad nacional de rio de cuarto Argentina. 1999

Tabla 14. Efecto de la materia orgánica sobre las bacterias

Horizonte (cm)	Materia Orgánica %	Bacterias	
		Aerobias	Anaerobias
A1 (0-6)	8,00	149,2	1,0
A2 (6-12)	3,11	131,8	1,8
B1 (12-24)	2,41	108,3	10,0
B2 (26-48)	1,70	45,3	1,0
C (48-80)	0,80	6,0	0,01

Fuente: FRIONI, Lilian. Procesos microbianos. Editorial de la fundación universidad nacional de rio de cuarto Argentina. 1999

7.2 ALGAS

Las algas, igual que los hongos, son inmóviles, protistas, con pared celular, algunas son unicelulares y otras son filamentosas o coloniales, tienen estructura similar a plantas con crecimiento multicelular pero no tienen diferenciación real entre las células. La mayoría de ellas son acuáticas, aunque hay géneros que crecen en el suelo. El dióxido de carbono (CO_2) y/o aniones bicarbonatados (HCO^{-3}) sirven como fuente de carbono para el crecimiento, por lo que la energía proviene de la adsorción de la luz por pigmentos fotosintéticos, dando como producto el oxígeno.

Los principales factores que inciden en la distribución de las algas en el suelo son: la humedad, los nutrientes minerales, el CO_2 y la luz. Los dos primeros factores no son limitantes pero la luz determina la distribución de los organismos fotótrofos: las algas son más numerosas en los 5-10 cm del perfil del suelo y disminuyen

marcadamente con la profundidad. Se pueden encontrar en horizontes más profundos ($10^3/g$) llevadas por las prácticas culturales (arrastre mecánico), por la fauna o el agua (nutrición heterótrofa o permanecen en estado latente).

Las algas son poco sensibles a las variaciones del pH. Los valores próximos a la neutralidad o ligeramente alcalinos, son más favorables para su desarrollo.

7.3 PROTOZOOS⁴⁴

Los protozoos son protistas que carecen de pared celular, pueden ser móviles o no, cuyo tamaño varía entre algunas micras hasta centímetros; se alimentan por predación de bacterias u otros organismos como levaduras, hongos, e incluso de otros protozoos. Requieren de un medio húmedo para su proliferación, su fisiología y desplazamientos, pero pueden resistir la desecación enquistándose.

En cuanto a la influencia del ambiente en estos microorganismos, uno de los factores que limita el desarrollo de este grupo en el suelo es la distribución discontinua de la materia orgánica y de la microflora (nutrientes para los protozoos) en la solución del suelo dentro de los poros. Comportamiento diferente es el que muestran a los cambios de pH del suelo, debido a que poco afecta el espectro de especies, los hay en ambientes ácidos y también en extremos alcalinos.

Su carácter depredador se ha puesto de manifiesto en estudios de laboratorio, donde se ha podido comprobar que un solo protozoo consume en algunas ocasiones entre varios cientos y varios cientos de miles de células bacterianas por hora, este número depende del tipo de protozoo y del tipo de bacteria.

⁴⁴ FRIONI, Lilian. Procesos microbianos. Editorial de la fundación universidad nacional de rio de cuarto Argentina. 1999

7.4 HONGOS

Los hongos son organismos heterótrofos eucariotas, no tienen movimiento y emplean la materia orgánica como fuente de carbono y energía, pueden presentarse en forma unicelular, aunque generalmente tienen forma filamentosa. Estos filamentos miscelares o hifas están aislados o agrupados en verdaderos cordones (rizomorfos) que van de un sustrato nutritivo a otro. Los contaminantes inorgánicos, caso de existir, son incorporados dentro del tejido celular en cantidades estequiométricas, parecido a como se realiza en el crecimiento de bacterias. Mohos, levaduras y setas son los hongos más abundantes en el suelo, aunque están en menor número que las bacterias. Tienen un crecimiento más lento, y un proceso metabólico menos diverso.⁴⁵

Los hongos están muy distribuidos en todos los ecosistemas, soportan temperaturas desde 0 a 25°C, y con un máximo de 50 °C, en el caso del suelo, la temperatura óptima se ubica entre 20-30°C. El pH óptimo para este grupo se encuentra cerca a 6, resaltando el hecho de que dominan ambientes ácidos, debido a la falta de competencia por parte de las bacterias.

Su función principal en el suelo es la mineralización de fuentes complejas de carbono, atacando gran volumen de residuos con poco nitrógeno. Es de esta manera que predominan en suelos pobres, sobre restos vegetales frescos y sobre todo en plantas maduras donde la relación C/N puede ser muy alta.

⁴⁵ Ecología microbiana y microbiología ambiental. Ronald M. Atlas, Richard Bartha.1998

8. DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de este capítulo es describir los diferentes procesos y elementos utilizados en la presente investigación para desarrollar una biorremediación estimulada a muestras de cortes de perforación tomadas de las locaciones de Cauca-Patía y Buenaventura.

Para el desarrollo de la técnica empleada (biorremediación) y debido a la disponibilidad de muestra de cortes de perforación, se implementan 12 biorreactores oxigénicos y 12 anoxigénicos; de los cuales se hace la selección de 6 biorreactores control, es decir, aquellos a los cuales no se les realiza ningún tipo de dosificación de microorganismos y como tal servirán como parámetro de comparación entre:

- 6 muestras dosificadas con microorganismos oil free
- 6 muestras dosificadas con microorganismos nativos
- 6 muestras dosificadas con mezcla (oil free + nativos)

Antes de realizar cualquier proceso de recuperación o biorremediación se debe examinar la magnitud del problema, el tipo de contaminantes que lo provoca y la cantidad de suelo a tratar. Todo lo anterior requiere de un estudio detallado de las características del suelo como la conductividad, porcentaje de humedad y de pH, los cuales deben estar en un rango adecuado para el crecimiento y reproducción microbiana.

Las muestras de los cortes de perforación del presente tema de estudio se tomaron de las locaciones anteriormente mencionadas, del convenio ANH-UIS, donde se perforaron dos pozos estratigráficos profundos (12.100 ft) desde su primera fase con lodo de perforación base agua. Los cortes generados de esta actividad se adecuaron en piscinas con una capacidad de 8139 Bls en el caso de

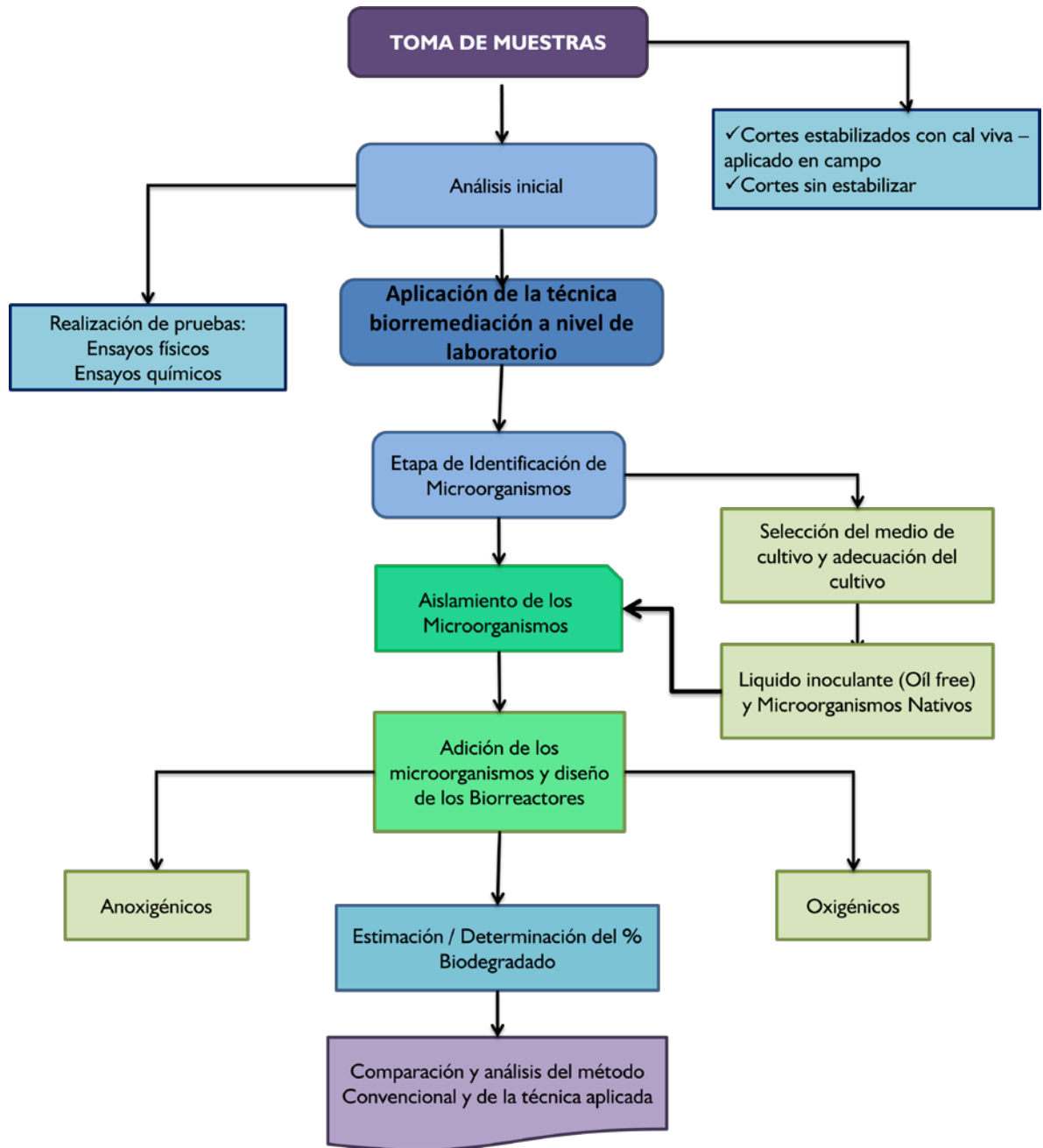
Cauca- Patía y de 10.673 Bls para Buenaventura, donde según los resultados de análisis iniciales, dichos cortes tenían un pH entre 10,5 y 11,2 con un valor de humedad entre 57 y 61%; para su posterior tratamiento mediante la adición de cal viva.

El desarrollo del proyecto se fundamenta esencialmente en 4 etapas:

- Una etapa de caracterización de los cortes sin tratamiento.
- Una segunda etapa de identificación de los microorganismos presentes tanto en las muestras, como en el inóculo líquido a experimentar.
- Una tercera etapa de diseño experimental.
- Una etapa final de comparación de los métodos y análisis de resultados.

El procedimiento llevado a cabo se ilustra a través de un diagrama de flujo que se muestra en la figura 22.

Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de implementación de biorremediación



Fuente: Autores

8.1 ETAPA DE CARACTERIZACIÓN DE LOS CORTES SIN TRATAMIENTO

Antes de iniciar el estudio con la técnica seleccionada, se identifican los parámetros físico-químicos de las muestras de cortes sin la aplicación de cal viva, con el fin de establecer si dichos parámetros se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por la Norma Luisiana 29B y cumplen con las políticas ambientales de la Universidad y lo contenido en el Plan de Manejo Ambiental (PMA) del proyecto.

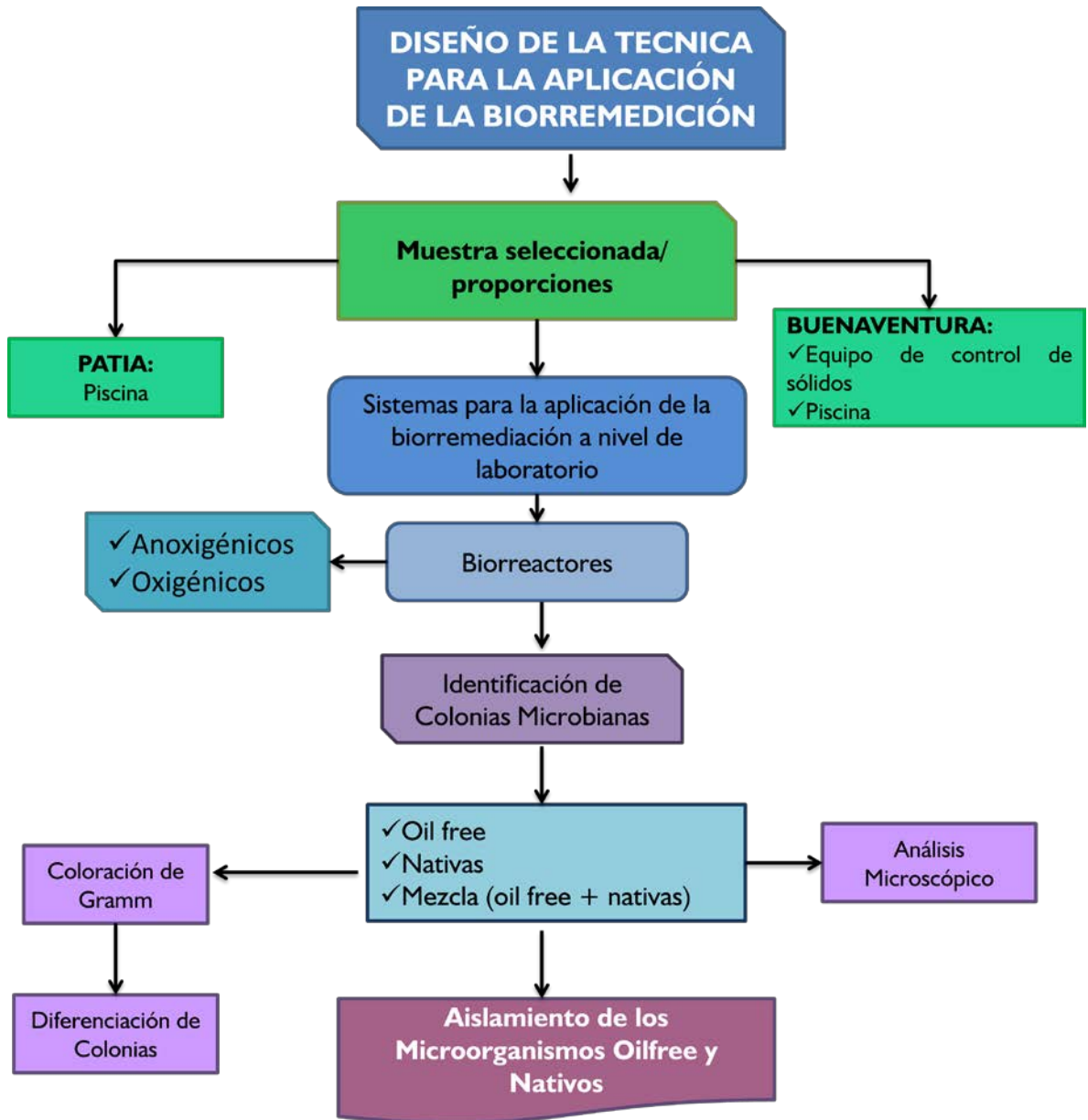
8.2 ETAPA DE IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS

Seguidamente de realizar un análisis a los cortes de perforación de cada una de las locaciones, para obtener un análisis preliminar de los parámetros químicos, se dispone a la selección de muestras procedentes de las piscinas y de los equipos de control de sólidos (dewatering, shaker, centrífuga).

A continuación se dispone a efectuar la selección del medio de cultivo (sólido o líquido). Para este caso específico de estudio, se empleó Agar-Agar, que cuenta con los nutrientes necesarios para permitir, en condiciones favorables de pH y temperatura, el crecimiento de virus, microorganismos, células, tejidos vegetales o incluso plantas pequeñas.

Para lograr una mejor comprensión de este procedimiento se llevo a cabo la metodología mostrada en la figura 23.

Figura 23. Identificación/Caracterización de microorganismos



Fuente: Autores

8.2.1 Preparación del Agar-Agar. Se disuelven 22,5 gr del cultivo Agar-Agar (muestra en polvo) en un (1) litro de agua desmineralizada, luego se procede al

calentamiento en un baño de agua hirviendo o en corriente de vapor; se lleva a la autoclave, para su descontaminación/esterilización (15 min a 121 ° C).

Figura 24. Procedimiento de preparación Agar-Agar



Fuente: Autores

8.2.2 Preparación y siembra de cultivo. Sembrar es colocar una muestra de inóculo, en un medio de cultivo para obtener el crecimiento de los microorganismos. Para ello se extiende la muestra sobre caja de Petri, que contiene un gel (Agar-Agar) al que se han añadido las sustancias que necesitan los microorganismos para crecer. A esto se le llama medio de cultivo.

8.2.2.1 Condiciones para la preparación del medio de cultivo. Se procede con la siguiente metodología:

1. Esterilización de los instrumentos de trabajo y de los medios de cultivo:
 - Los medios de cultivo se esterilizan con calor húmedo en la autoclave.
 - Los materiales de vidrio se esterilizan con calor seco en el horno Pasteur.

- Objetos metálicos, como el asa de siembra, que se esterilizan en el momento de su utilización, se mantienen en la llama hasta que se pongan al rojo, teniendo la precaución de enfriarlos antes de su uso.
- 2. Que el inóculo no se contamine, modifique o destruya para lo cual se utiliza calor directo, flameando las bocas de los tubos de ensayo, matraces, la pipeta y demás elementos antes y después de su utilización.
- 3. Esterilización del área de trabajo: se utiliza un mechero Bunsen que, debido a la fuerza de circulación del aire en sentido vertical y hacia arriba, es capaz de crear un ambiente semiésteril en la zona inmediata alrededor y debajo de la llama, de forma que los riesgos de contaminación disminuyen considerablemente.

8.2.2.2 Preparación de cultivo para muestras líquidas (oil free). Inicialmente se recomienda marcar la caja Petri con fecha y número de grupo

- Para crear un ambiente de esterilidad se debe encender el mechero y trabajar siempre al lado de él.
- Con una pipeta se toma 2 gotas de la muestra (oil free).
- Esterilizar el asa de argolla en la flama y dejarlo enfriar, luego rayar sobre el Agar-Agar, tal como se muestra en las figura 25 y 26.

Figura 25. Siembra de microorganismos Oil free



Fuente: Autores

Figura 26. Métodos de rayado para la siembra



Fuente: Aula virtual.usual.es

8.2.2.3 Preparación de cultivo para muestras sólidas (cortes de perforación).

Para inocular los microorganismos nativos, es decir los que están en los cortes de perforación de Buenaventura y Patía se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- Las muestras tomadas en campo se mezclan de forma homogénea y se toma una pequeña cantidad, la cual es llevada a una caja de Petri.
- Se prepara un caldo (Agua de peptona)

Forma de actuación del agua de peptona: el caldo rico en sustancias nutritivas provoca una alta cuota de sobrevivencia de bacterias subletalmente dañadas y un crecimiento intenso. El tampón de fosfato evita una variación de pH perjudicial para las bacterias.

8.2.2.4 Preparación del caldo (agua de peptona). Disolver 25,5 gr de agua de peptona (muestra en polvo) en un (1) litro de agua desmineralizada, eventualmente introducir (15 ml) en recipientes pequeños; tratar en autoclave.

- Teniendo listo el caldo, se agrega una pequeña cantidad de muestra (corte de perforación), siempre teniendo el medio estéril.
- Posteriormente es llevado al horno Pasteur y se deja por 45 – 60 min. a una temperatura de aprox. 35-40 °C

Figura 27. Dilución de la muestra en agua peptonada



Fuente: Autores

- Se hace el mismo procedimiento para la inoculación de los microorganismos nativos de las muestras de los cortes de perforación.
- En cajas Petri listas con el Agar–Agar, se procede tomando aproximadamente de 2 a 3 gotas de la muestra preparada en caldo (agua de peptona) y se hace el rayado tal y como se hizo con el oil free.
- Se empaca en papel aluminio y se espera hasta 48 horas para hacer los respectivos análisis.

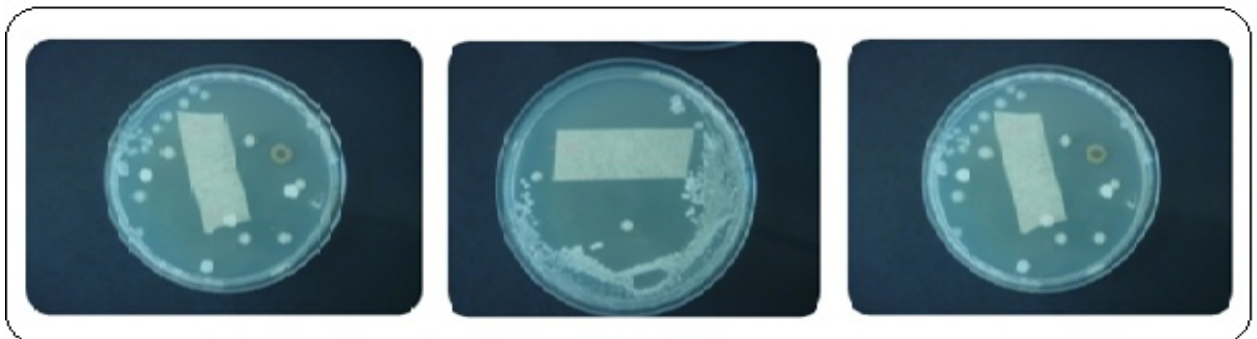
Figura 28. Siembra de las muestras sólidas diluidas en agua peptonada



Fuente: Autores

8.2.3 Identificación de colonias microbianas. Los cultivos de microorganismos oil free se diferencian de las colonias y/o microorganismos nativos por el color, ya que observa un blanco opaco y un blanco más brillante, así mismo por el tamaño y forma influyen en su identificación; el círculo oscuro corresponde a un hongo.

Figura 29. Muestras de microorganismos (hongos y bacterias)



Fuente: Autores

8.2.3.1 Caracterización de los microorganismos. Las colonias formadas en el medio de cultivo de Agar-Agar se caracterizan mediante la técnica de tinción de

Gram, el cual es un tipo de tinción diferencial para visualizar de una forma global que tipo de bacterias se encuentran (Gram-positivas y Gram-negativas).

Este procedimiento se utiliza tanto para poder referirse a la morfología celular bacteriana como para lograr realizar una primera aproximación a su diferenciación, considerándose Bacteria Gram positiva a las bacterias que se visualizan de color moradas y Bacteria Gram negativa a las que se visualizan de color rosa o rojo o grosella.

➤ **Procedimiento de frotis o extendido del cultivo microbial.**

- ✓ Se marca detrás de la caja Petri las colonias.
- ✓ Se toma una pequeña parte de la colonia con el asa de argolla.
- ✓ En láminas se agrega una gota de agua desmineralizada y se esparce la muestra tomada de la colonia.

El procedimiento anteriormente mencionado, se puede visualizar gráficamente a continuación (figura 30)

Figura 30. Frotis o extendido del cultivo microbial



Fuente: Autores

- **Aplicación de la técnica de tinción: cloración de Gram.** Posterior a la tinción de las láminas, se deja secar a temperatura ambiente la dilución entre el agua mineralizada y el extendido de los microorganismos. Una vez lista la dilución, se procede a secar la muestra a calor (flameando máximo 5 veces) y finalmente, se aplica la coloración de Gram siguiendo los pasos correspondientes:
- ✓ Se agrega azul violeta, se aguarda por un minuto, y luego se agrega agua suficiente para lavar la muestra.
 - ✓ A continuación se adiciona Lugol y se espera durante un minuto, nuevamente se procede a lavar la muestra.
 - ✓ Se agrega acetona (alcohol) y se espera de 8 a 15 segundos, enjuagar con agua
 - ✓ Se agrega safranina y en este caso se aguarda de 30 a 45 segundos. Enjuagar con agua.

Figura 31. Aplicación de la técnica de tinción.

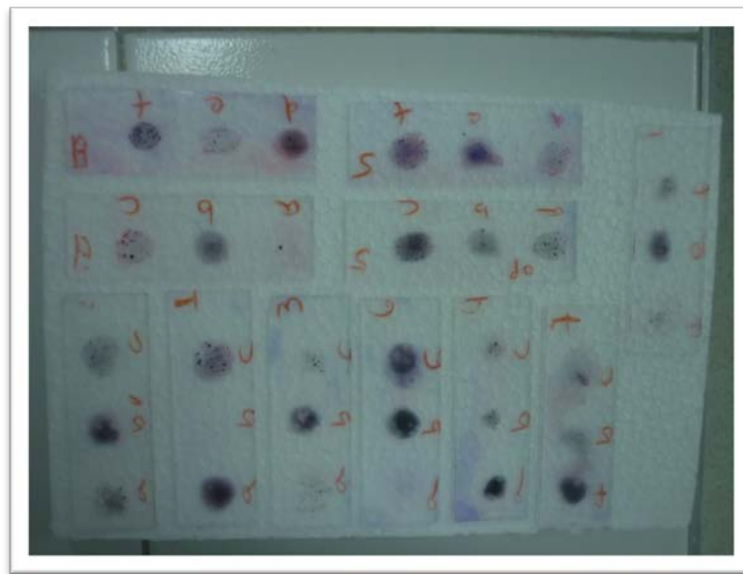


Fuente: Autores

- **Finalidad de la coloración de Gram.**
- ✓ El cristal violeta (colorante catiónico) penetra en todas las células bacterianas (tanto Gram positivas como Gram negativas) a través de la pared bacteriana.

- ✓ El Lugol hace que el cristal violeta se fije con mayor intensidad a la pared de la célula bacteriana.
- ✓ El alcohol-acetona realiza la decoloración. Los organismos Gram positivos no se decoloran, mientras que los Gram negativos sí lo hacen.
- ✓ La safrina se utiliza para poner de manifiesto las células Gram negativas.

Figura 32. Coloración de Gram sobre las láminas



Fuente: Autores

Identificación de los microorganismos con el microscopio. Efectuado todo el procedimiento anterior de manera rigurosa y adecuada, se procede finalmente a examinar en el microscopio (resolución 100 x), cada una de las láminas resultantes de la tinción de Gram, añadiéndoles aceite de inmersión para que la refracción de éste optimice el enfoque y, de esta manera lograr la identificación de las colonias de microorganismos presentes en los cortes de perforación, como las

presentes en el inóculo seleccionado para este trabajo de investigación, en este caso el oil free.

Como resultado de estas pruebas de laboratorio se logró identificar que la comunidad de microorganismos predominante en los cortes y en el oil free son las bacterias, más específicamente, se encontraron bacilos y cocos como se puede apreciar en las figuras 33 y 34.

Figura 33. Microorganismos en oil free

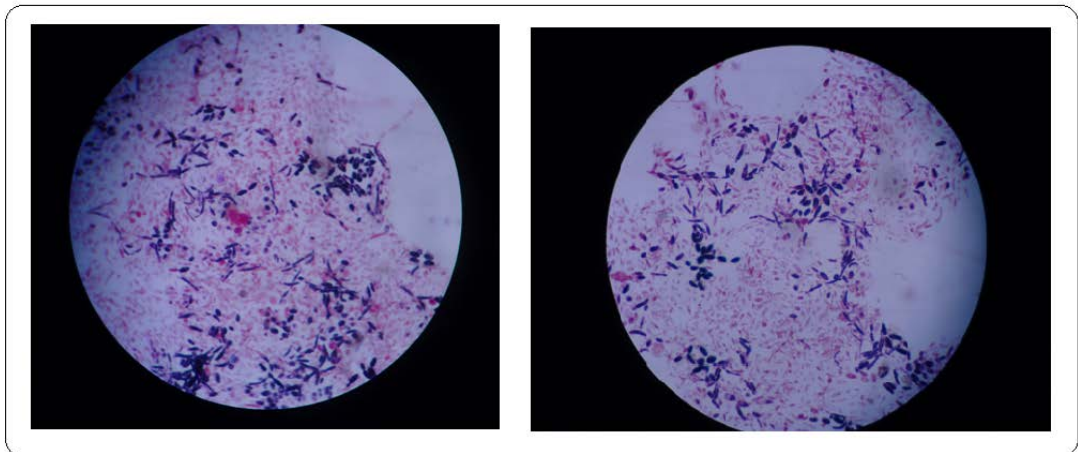
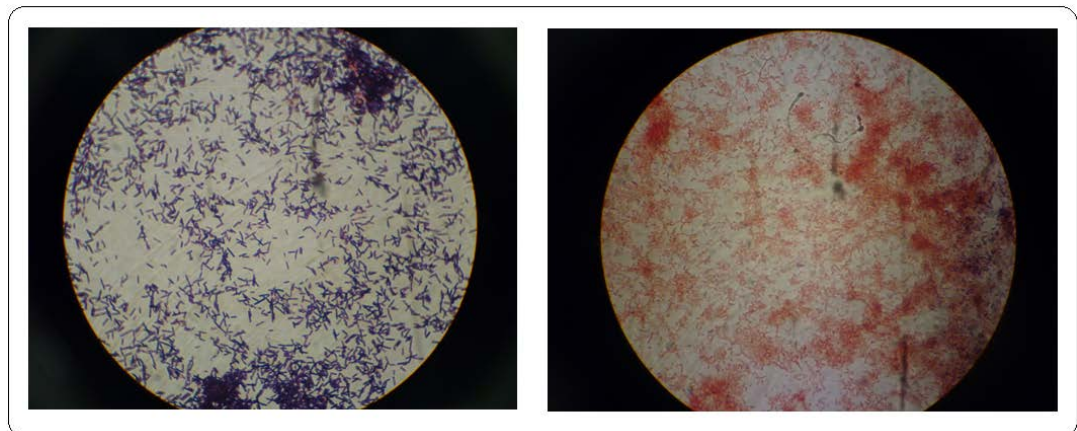


Figura 34. Microorganismos en cortes de perforación



Fuente: Autores

8.2.4 Aislamiento de microorganismos oil free y nativos. Para aislar los microorganismos, se utiliza el medio BHB (BRAIN HEART BROTH) (caldo de cerebro-corazón), el cual es un medio de cultivo para microorganismos exigentes. Es muy rico en nutrientes y proporciona un adecuado desarrollo microbiano. La infusión de cerebro de ternera, la infusión de corazón vacuno y la peptona, son la fuente de carbono, nitrógeno y vitaminas. La glucosa es el hidrato de carbono fermentable y el cloruro de sodio mantienen el balance osmótico.

8.2.4.1 Preparación del medio BHB. Se disuelven 37 gramos de cultivo en un litro de agua desmineralizada, luego se calienta hasta que la mezcla quede completamente homogénea y se lleva al autoclave, para eliminar cualquier tipo de contaminación. Las mezclas se llevaron a cabo con las siguientes proporciones:

- **Oil free** : 600 ml de agua desmineralizada y 22,2 gr de BHB
- **Muestras Patía y B/vtura** : 250 ml de agua desmineralizada y 9,25 gr de BHB

8.2.4.2 Raspado o extracción de microorganismos. Se extrae con el asa de argolla todos los cultivos que crecieron en las cajas de Petri (*oil free*, *Patía* y *B/vtura*) y se introduce en cada uno de los caldos respectivamente. A las 48 horas de haberse realizado la extracción de los cultivos, se procede a la dosificación.

Figura 35. Extracción de los microorganismos



Fuente: Autores

8.3 DISEÑO Y MONTAJE DE LOS BIORREACTORES

Debido a que la cantidad de muestras recogidas de las locaciones de Patía y Buenaventura no eran suficientes para realizar un estudio detallado de cada una, se debió realizar una mezcla, conservando las muestras provenientes de las piscinas y de los equipos.

Para la aplicación de la técnica de biorremediación se recurrió al sistema de los biorreactores, los cuales constan de un recipiente de vidrio, dos tubos de vidrio que permiten la entrada y salida de aire; una manguera y una bomba élite 802 de dos salidas y con una potencia de 3,5 Watts/hora.

Figura 36. Diseño de los biorreactores



Fuente: Autores

Una vez arreglado el montaje de los 24 biorreactores, se seleccionaron 12 biorreactores a los cuales se les suministraría aire (sistema oxigénicos) y 12 montajes que tendrían un sistema anoxigénicos. Para el desarrollo de todo el sistema se llevo a cabo la siguiente metodología:

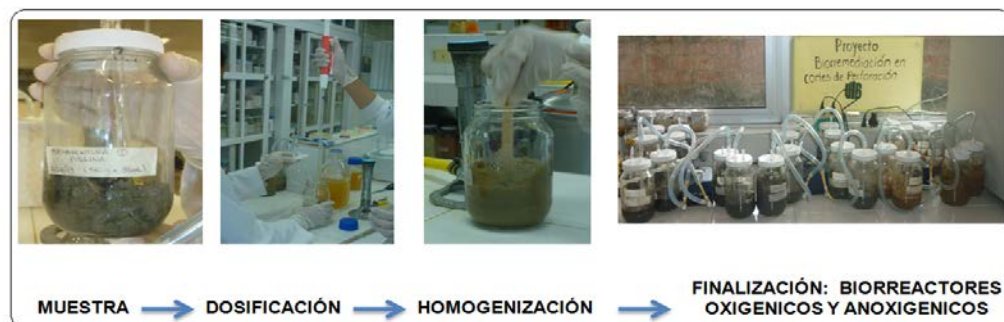
Para cada biorreactor se utilizó la proporción 75/25; es decir 75 % muestra y 25% agua, entonces:

- Cantidad de corte : 140 gr
- Cantidad de agua: 35 ml
- Dosificación: 5 ml de microorganismo(s)
- Cantidad de dosificaciones establecidas: 2

8.3.1 Adición de los microorganismos. Teniendo listos los biorreactores con su respectiva proporción (muestra + agua) se procede a escoger las muestras de corte más representativas de cada locación así como su disponibilidad, debido a que la cantidad de estas muestras fueron una limitante. Por tal motivo para el análisis en Patía se utilizaron cortes provenientes de la piscina y para Buenaventura se emplearon muestras tanto de la piscina como de los equipos (shaker, dewatering, centrífuga).

Finalmente, para lograr realizar un modo de comparación y efectividad de la biorremediación en un medio oxigénico y un medio anoxigénico se adecuaron seis biorreactores tipo control, es decir, aquellos a los cuales no se les realizó ninguna adición de microorganismos; seis biorreactores con oil free, seis con microorganismos nativos y seis con una mezcla de comunidad microbiana nativa y de oil free.

Figura 37. Proceso de adición de microorganismos



Fuente: Autores

1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la efectividad de la biorremediación como una técnica de tratamiento para cortes de perforación en lodos base agua, se basan en la comparación de aquellas muestras recogidas de las locaciones de Patía y Buenaventura y las muestras tratadas a nivel de laboratorio con los microorganismos presentes tanto en el oil free como en la microbiota nativa.

Otra manera de comprobar que la biorremediación no solo es aplicable para el tratamiento de cortes de perforación en lodos base aceite es la realización de un cotejamiento físico-químico entre cortes estabilizados con cal viva y cortes de perforación que no han sufrido ninguna alteración.

Para aplicar los microorganismos presentes en el oil free y los nativos a los cortes, se efectuó un previo aislamiento de éstos en un caldo nutritivo, el cual permite realizar una bioestimulación que garantice una óptima metabolización y degradación de los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en los cortes de perforación. Por consiguiente los microorganismos presentes, más específicamente las bacterias, que fueron el objeto de estudio, requieren de la cantidad de oxígeno apropiado y de nutrientes, para permitir su crecimiento y así mismo lograr una mayor asimilación de sustancias químicas.

Realizando el estricto procedimiento mencionado en el capítulo 8 se hace la comparación con el método convencional (adición de cal viva) y la bioestimulación con microorganismos, es de esta manera que se llega a obtener las siguientes gráficas de resultados y su respectivo análisis.

Tabla 15. Análisis físico-químico de cortes de perforación. Pozo ANH-PATIA 1

PARÁMETRO	MUESTRAS					
	Unidades	Zarandas (Shaker)	Centrífugas	Piscinas	Corte Estabilizado	Límite Permissible
pH	Adim	10,47	9,93	10,5	12,8	6--9
Humedad	(%)	59	45	61	46	<50

Fuente: Autores

Tabla 16. Análisis físico-químico de lixiviados. Pozo ANH-PATIA 1

PARAMETROS	UNIDADES	MUESTRAS		LIMITES PERMISIBLES	
		Piscinas	Corte estabilizado con cal viva	Rango de valores moderados	Rango de valores elevados
Bario	mg/L	15	3	1,5	5
Calcio	mg/L	480	600	500	800
Carbonato de Calcio	mg/L	1200	1200	1250	2000
Cloruros	mg/L	500	600	600	1300
Fluoruros	mg/L	0,05	0,14	5	10
Hierro	mg/L	0,07	0,12	1	2,5
Aluminio	mg/L	0,14	10,48	NE	NE
Nitrógeno	ppm	385	196	NE	NE
Potasio	mg/L	730	406	140	320
Sulfuro-Sulfatos	mg/L	50	50	150	700
Conductividad	ms/cm	2450	2320	2000	2500
TDS	mg/L	1225	1160	1300	1800
Pf	Adim	0	0	NE	NE
Mf	Adim	0,65	0,7	NE	NE
pH	Adim	10,2	10,5	6,5	8

Fuente: Autores

Tabla 17. Biorremediación en cortes de perforación de Patía 1

Parámetros	Unidad	PATIA ANOXIGÉNICOS				PATIA OXIGÉNICOS			
		Oil free	Nativas	Mezcla	Control	Oil free	Nativas	mezcla	Control
Bario	(ppm)	15	16	15	12	16	9	15	15
Nitrógeno	(ppm)	128	190	131	200	138	45	73	90
Hierro total	(mg/L)	0,21	0,22	0,2	0,15	0,15	0,1	0,27	0,16
Aluminio	(mg/L)	2,75	11	11	11	1,77	2,73	0,72	3,78
(Ca ⁺⁺)	(ppm)	20	40	40	80	40	20	60	60
Sulfuro-sulfato	(ppm)	50	50	25	50	40	50	50	50
(NaCl)	(ppm)	825	825	990	660	825	577,5	825	907,5
(CaCO ₃)	(ppm)	50	100	100	200	100	50	150	150
(Cl ⁻)	(ppm)	500	500	600	400	500	350	500	550
pH		9,16	11,2	9,8	10,8	8,7	9	8,8	9,5
Conductividad	(ms/cm)	2,59	2,39	2,76	2,31	2,48	1,78	1,92	1,55
TDS	(g/L)	1,18	1,19	1,38	1,11	1,22	0,89	0,97	0,82
% Vol.		76	59	72	7	58	46	47	4
Potasio	(ppm)	-	-	-	-	127	31	-	-

Fuente: Autores

Tabla 18. Análisis físico-químico de cortes de perforación. Pozo ANH-BUENAVENTURA 1

PARAMETRO	UNIDADES	MUESTRAS		
		Piscinas	Corte Estabilizado	Límite Permissible
pH	Adim	10,7	11,9	6--9
Humedad	(%)	57	43	<50
Conductividad	mS/cm	1060	6740	2500
TDS	mg/L	580	3370	1300

Fuente: Autores

Tabla 19. Análisis físico-químico de cortes de perforación. Pozo ANH-BUENAVENTURA 1

PARAMETROS	UNIDADES	MUESTRAS		LIMITES PERMISIBLES	
		Piscinas	Corte estabilizado con cal viva	Rango de valores moderados	Rango de valores elevados
Bario	mg/L	32	9	1,5	5
Calcio	mg/L	160	240	500	800
Carbonato de Calcio	mg/L	400	400	1250	2000
Cloruros	mg/L	500	800	600	1300
Fluoruros	mg/L	0,01	0,02	5	10
Hierro	mg/L	1,35	0,59	1	2,5
Potasio	mg/L	375	35	140	320
Nitrógeno	ppm	435	300	NE	NE
Aluminio	mg/L	0,12	2,41	NE	NE
Sulfuro-Sulfatos	mg/L	50	50	150	700
Conductividad	ms/cm	1740	1620	2000	2500
TDS	mg/L	870	810	1300	1800
Pf	Adim	0	0	NE	NE
Mf	Adim	0,35	0,4	NE	NE
pH	Adim	7,8	8,1	6,5	8

Fuente: Autores

Tabla 20. Biorremediación en cortes de perforación de B/vtura 1

Parámetros	Unidad	BUENAVENTURA 1 ANOXIGÉNICOS				BUENAVENTURA 1 OXIGÉNICOS			
		Oil free	Nativas	Mezcla	Control	Oil free	Nativas	Mezcla	Control
Bario	(ppm)	32	24	29	21	24	26	27	13
Nitrógeno	(ppm)	140	110	154	92	51	43	108	50
Hierro total	(mg/l)	0,47	0,3	0,39	1,04	0,29	0,33	0,8	0,21
Aluminio	(mg/l)	1,71	0,32	1,45	0,09	0,02	1,58	0,78	0,89
Sulfuro-sulfato	(ppm)	50	45	50	17	38	48	40	50

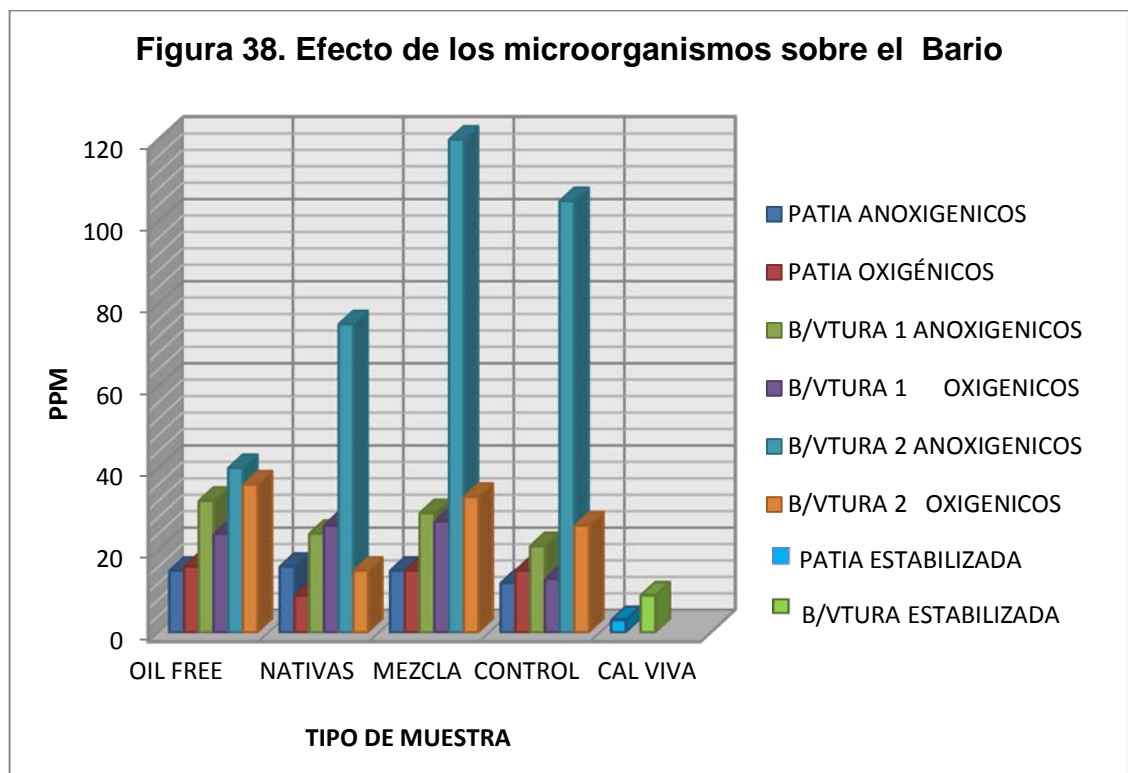
Parámetros	Unidad	BUENAVENTURA 1 ANOXIGÉNICOS				BUENAVENTURA 1 OXIGÉNICOS			
		Oil free	Nativas	Mezcla	Control	Oil free	Nativas	Mezcla	Control
(Ca ⁺⁺)	(ppm)	80	20	60	60	40	20	80	220
(Cl ⁻)	(ppm)	660	495	577,5	577,5	577,5	577,5	742,5	330
(NaCl)	(ppm)	400	300	350	350	400	600	450	500
(CaCO ₃)	(ppm)	200	50	150	150	100	50	200	550
pH		8,5	8,5	8,5	8,8	7,64	8,5	8,3	9
Conductividad	(ms/cm)	2,68	1,54	1,89	1,79	1,74	2,17	2,52	2,1
% Vol.		66	68	75	59	64	76	8	38
TDS	(g/l)	1,31	0,76	0,82	0,89	0,84	1,07	0,94	0,96
Potasio	(ppm)	-	-	-	-	-	54	-	-

Tabla 21. Biorremediación en cortes de perforación de B/vtura 2

Parámetros	Unidad	BUENAVENTURA 2 ANOXIGENICOS				BUENAVENTURA 2 OXIGENICOS			
		Oil free	Nativas	Mezcla	Control	Oil free	Nativas	Mezcla	Control
Bario	(ppm)	40	75	120	105	36	15	33	26
Nitrógeno	(ppm)	97	258	195	154	130	62	98	104
Hierro total	(mg/l)	0,17	3,3	1,8	3,3	0,35	0,33	0,61	0,44
Aluminio	(mg/l)	0,02	0,27	0,09	0,12	1,64	0,43	1,79	2,2
Sulfuro-sulfato	(ppm)	25	50	42	50	21	50	50	26
(Ca ⁺⁺)	(ppm)	40	60	80	80	40	120	60	60
(NaCl)	(ppm)	660	990	742,5	825	660	825	412,5	495
(CaCO ₃)	(ppm)	100	150	200	200	100	300	150	150
(Cl ⁻)	(ppm)	400	600	450	500	400	500	250	300
pH		8,5	8,5	8,5	9	8,2	8,3	8,5	9,56
Conductividad	(ms/cm)	4,28	4,3	1,53	3,32	2,56	2,53	2,31	1,03
TDS	(g/l)	2,08	2,14	0,86	1,67	1,17	1,24	1,14	0,51
% Vol.		62	66	64	-	66	22	62	1,6
Potasio	(ppm)	-	-	-	-	-	51	-	-

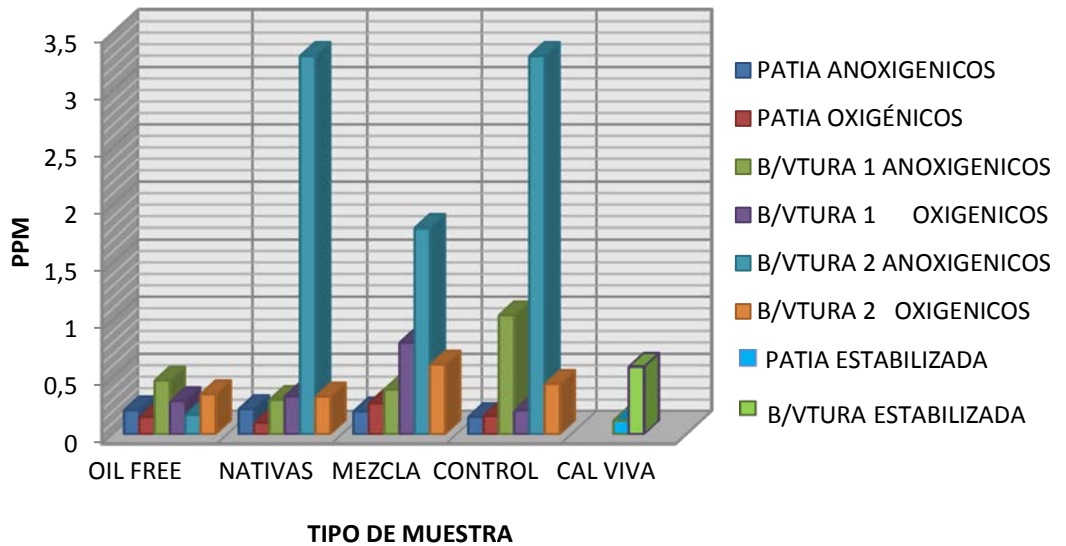
Fuente: Autores

Para lograr una mayor apreciación de los efectos de los microorganismos del inóculo de estudio (oil free) sobre los parámetros evaluados en las tablas anteriores en los pozos de Patía y Buenaventura, se mostraran en diagramas de barra los niveles de cada parámetro en los cuales se puede observar en detalle el comportamiento de las bacterias en el medio oxigénico y en el medio anoxigénico; y a modo de comparación con respecto a una muestra control, los resultados del trabajo de investigación.



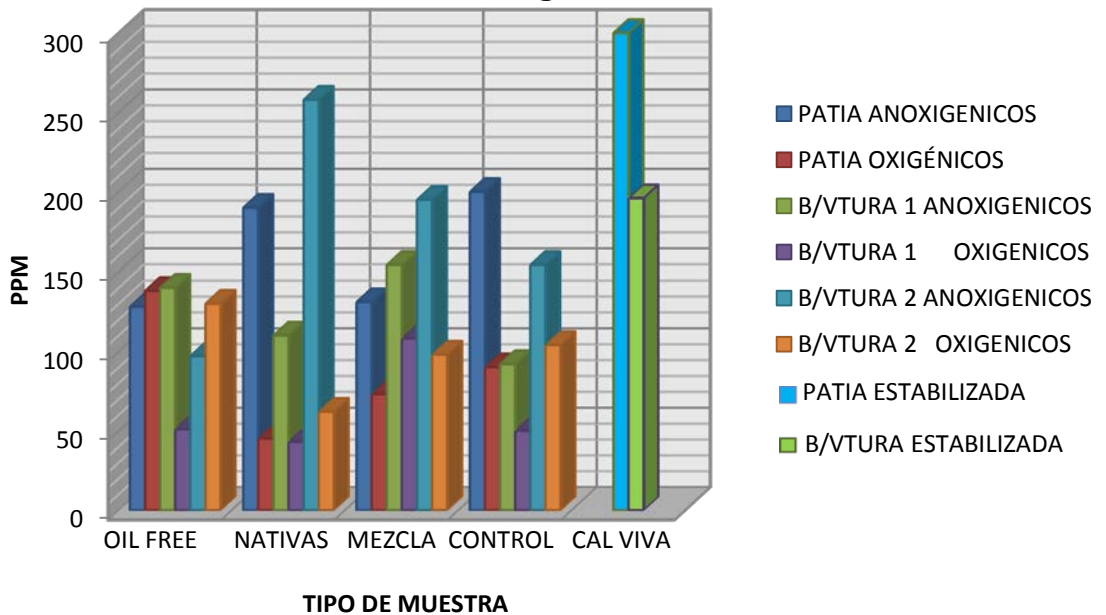
Fuente: Autores

Figura 39. Efecto de los microorganismos sobre el Hierro total



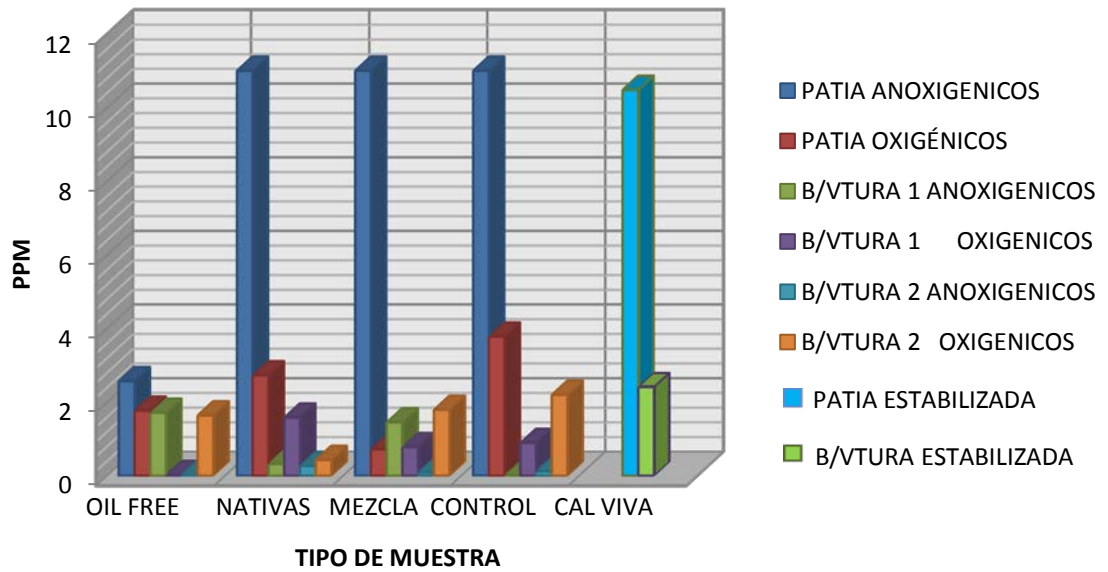
Fuente: Autores

Figura 40. Efecto de los microorganismos sobre el Nitrógeno



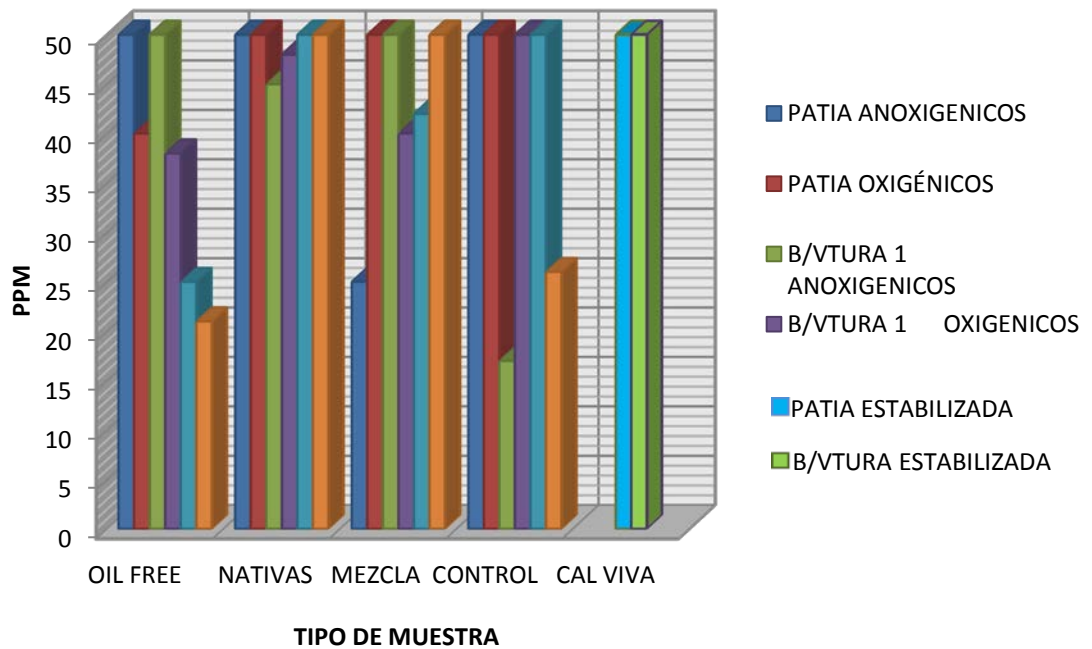
Fuente: Autores

Figura 41. Efecto de los microorganismos sobre el Aluminio



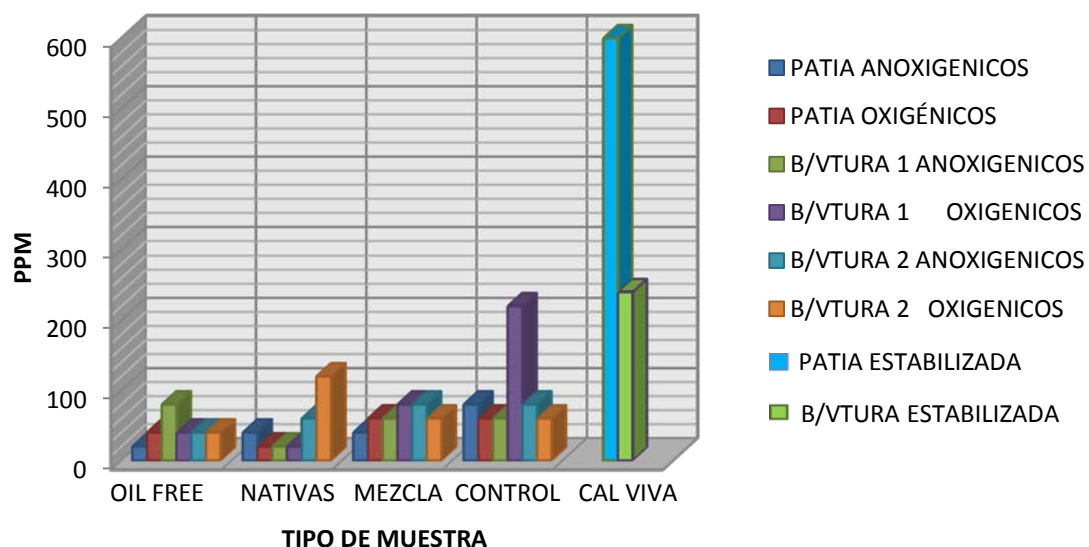
Fuente: Autores

Figura 42. Efecto de los microorganismos sobre el Sulfuro -Sulfato



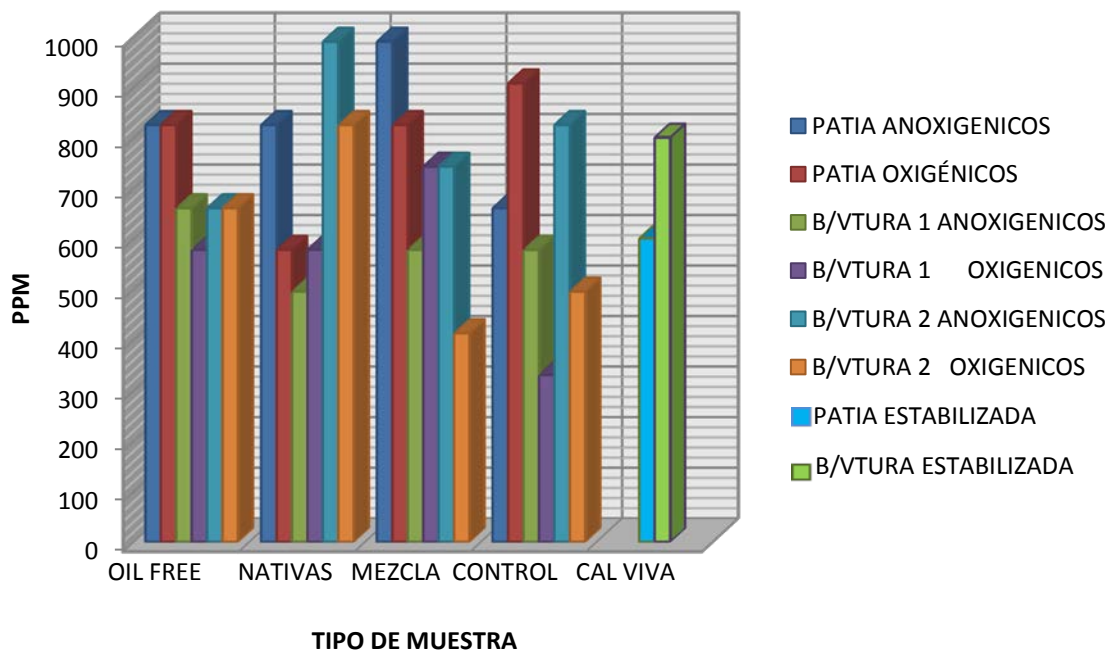
Fuente: Autores

Figura 43. Efecto de los microorganismos sobre el Ca⁺⁺



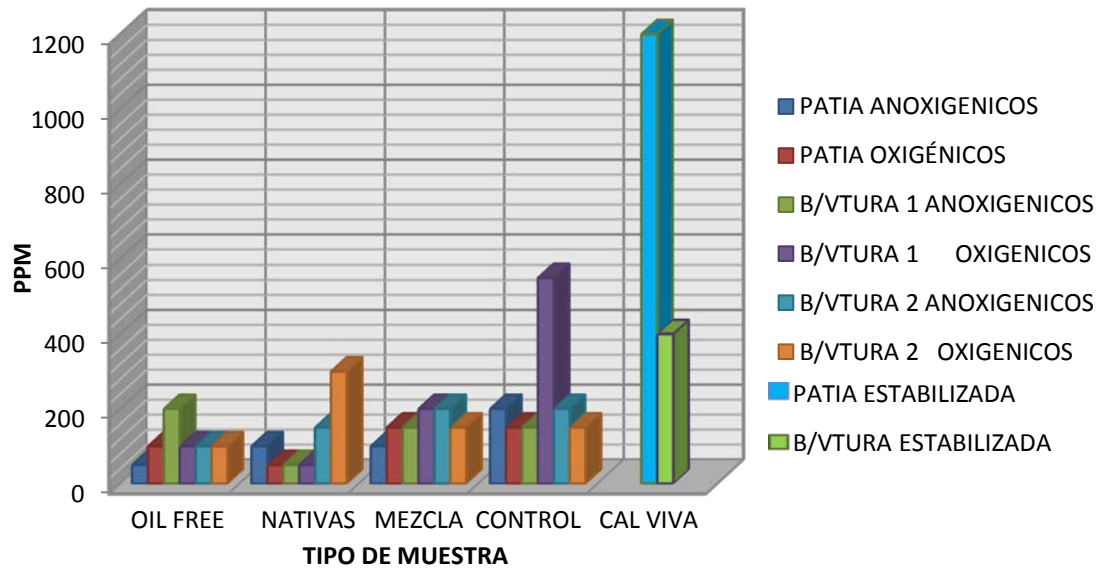
Fuente: Autores

Figura 44. Efecto de los microorganismos sobre el NaCl



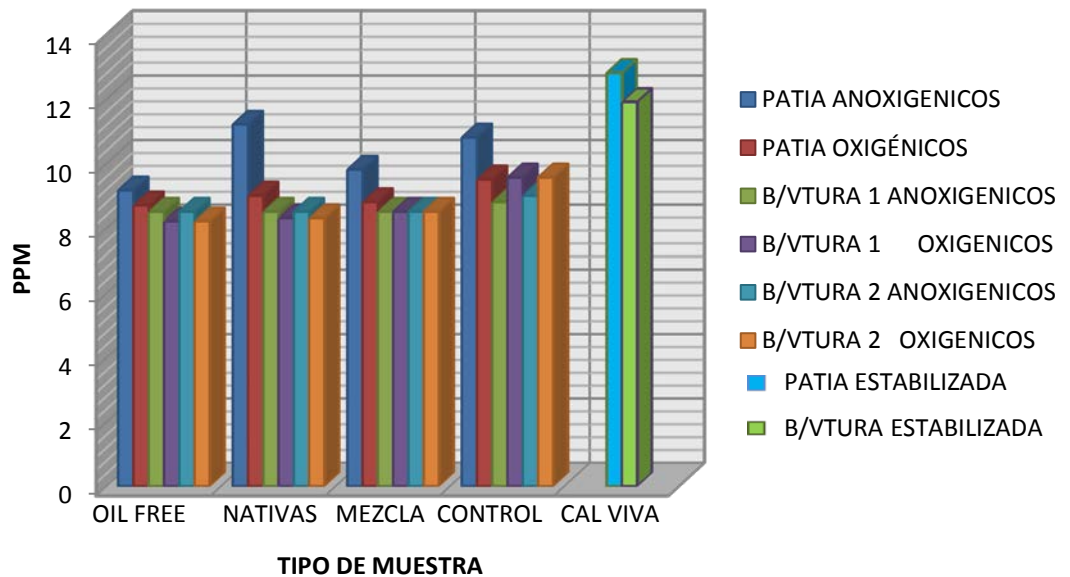
Fuente: Autores

Figura 45. Efecto de los microorganismos sobre el CaCO₃

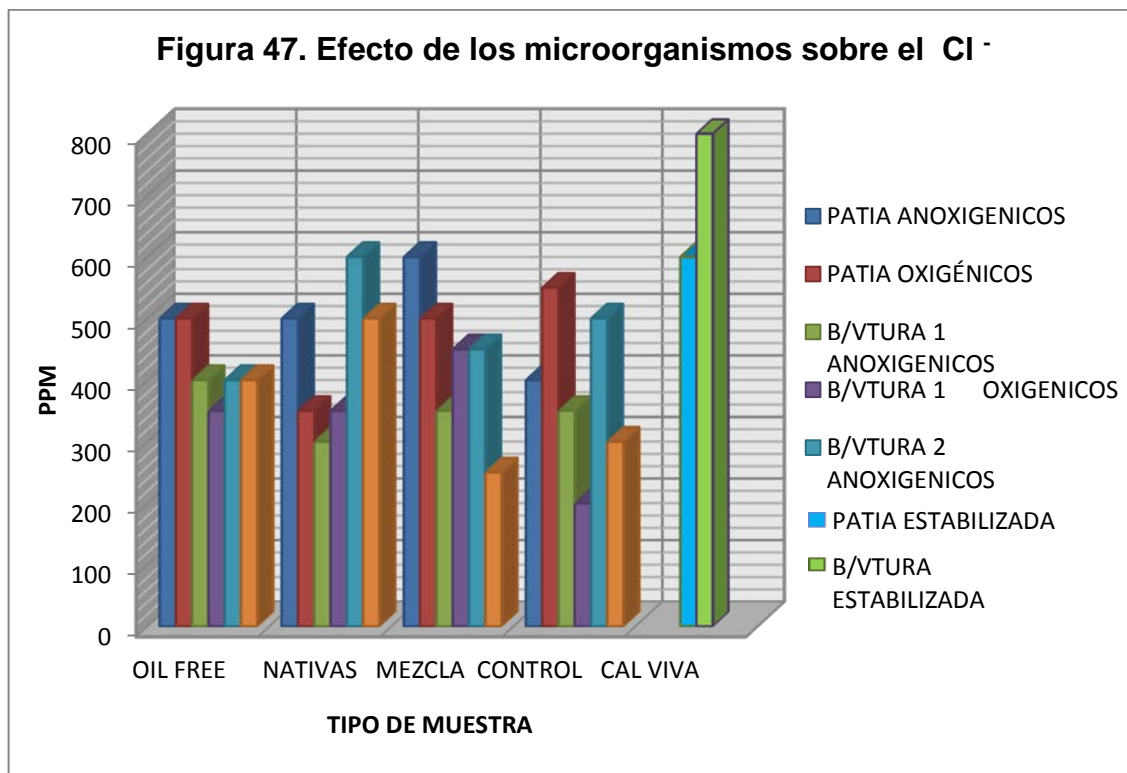


Fuente: Autores

Figura 46. Efecto de los microorganismos sobre el pH



Fuente: Autores



Fuente: Autores

De manera general, en las gráficas se puede observar que el comportamiento predominante en los parámetros analizados: Aluminio, Sulfuro-Sulfatos, Calcio, Dureza ($CaCO_3$), pH, es la disminución de sus concentraciones y/o niveles en el medio oxigénico, esto se debe a que los productos finales de los procesos metabólicos llevados a cabo por los microorganismos; donde se efectúa la degradación o desintegración de las moléculas contaminantes (catabolismo), producen compuestos estables de baja energía, que en su mayor parte es almacenada en el material celular de los microorganismos como fuente de energía (ATP) para la conversión de un sustrato en productos finales.

El catabolismo se encuentra directamente involucrado con la actividad enzimática presente en los microorganismos, por esta razón, el hecho de que las enzimas no sean consumidas en el proceso metabólico es verdaderamente afortunado, ya que

esto permite que los microorganismos destinen sus energías y recursos a la construcción de un nuevo material celular en lugar de destinarlo a una reconstrucción constante de enzimas.

En contraste, la mayor parte de la energía liberada en el catabolismo anoxigénico permanece en los productos de desecho, debido a que no se presenta una bioestimulación que haga que las reacciones de oxidación sean más eficientes.

Sin embargo, en el medio oxigénico los parámetros de Bario, Nitrógeno, la Conductividad y el TDS mostraron un aumento después de la aplicación del oil free, lo cual se debe a que los microorganismos del inóculo realizaron un proceso anabólico, donde se lleva a cabo la síntesis o construcción de moléculas de estos compuestos.

Por otra parte al enriquecer las muestras de los cortes de perforación con los microorganismos nativos en el medio oxigénico, se aprecia la bioestimulación y la adaptación que tienen estos microorganismos con el oil free, ya que los biorreactores en los cuales se hace el análisis conjunto (oil free + nativos), los resultados son favorables, mostrando una leve disminución de los valores.

El análisis de estos compuestos, altos o bajos niveles, lleva consigo efectos sobre los suelos y su posterior aprovechamiento; con la biorremediación se busca mitigar los daños y restaurar aquellos terrenos que fueron empleados como lugares para la disposición final de cortes de perforación. De acuerdo con lo anterior se hace conveniente, el dar a conocer la influencia de cada uno de los compuestos sobre el suelo y su entorno.

➤ **Aluminio:** en altos niveles es tóxico, inhibe el desarrollo de las raíces de las plantas, y afecta negativamente el rendimiento de los cultivos.

La hidrólisis del aluminio es el encargado de producir iones H_3O^+ , siendo ambos negativos para el crecimiento normal de las raíces de las plantas. El

Aluminio interfiere en la división celular de las raíces de las plantas, se da un crecimiento atrofiado y pobremente desarrollado.

- **Calcio:** El calcio es muy importante para el suelo porque:
- ✓ Es necesario para la nutrición de plantas y microorganismos.
- ✓ Permite aumentar la velocidad de descomposición de la materia orgánica.
- ✓ Actúa sobre procesos de fijación de N_2 .
- ✓ Es necesario para una buena estructura (floculante del complejo arcillo-húmico)
- ✓ Aumenta la ligereza de los suelos pesados
- ✓ Regula las posibilidades de solubilización del resto de los elementos del suelo.

Cantidades muy elevadas de calcio asimilable en el suelo originan problemas importantes en la fisiología de la planta por su interacción con otros macro y microelementos, como el antagonismo con el potasio que se presentan en los suelos calizos o después de fuertes encalados, donde pueden producirse carencias de potasio.

- **pH:** afecta la disponibilidad de los nutrientes, la actividad de microorganismos, y la solubilidad de minerales del suelo. Factores importantes que afectan el pH edáfico son temperatura y precipitaciones, que controlan la intensidad del lixiviado y la meteorización de los minerales del suelo. La acidez por lo general está asociada con suelos lixiviados; la alcalinidad mayormente aparece en regiones más secas. Sin embargo, prácticas agrícolas, tales como el encalado o el agregado de fertilizantes de amonio, puedan alterar el pH.

Comúnmente, valores de pH entre 6.0 y 7.5 son óptimos para el crecimiento de la mayoría de los cultivos. Las interpretaciones específicas para un sitio, con respecto a la calidad del suelo, dependerán del uso específico y la tolerancia de los cultivos.

- **Hierro:** la reversibilidad de la reacción de oxidación-reducción de este elemento juega un papel muy importante en su comportamiento en los suelos. Bajo condiciones anoxigénicas, los microorganismos pueden utilizar los óxidos de Fe^{3+} como aceptores finales de electrones para realizar la descomposición oxidativa de la materia orgánica, lo que da lugar a la reducción del Fe^{3+} a Fe^{2+} , que generalmente es más soluble y facilita la solubilidad de los óxidos.
- **Potasio:** El potasio difícilmente cambiante se encuentra incluido en los espacios interlaminares de las arcillas, lo que representa una retrogradación que depende de la naturaleza de aquellas, de los espacios interlaminares y de que éstos no estén ocupados por otros cationes.

El calcio y el magnesio presentan un claro efecto antagónico frente al potasio que puede dar lugar a situaciones de deficiencia potásica por excesos de calcio activo o de magnesio asimilable.

- **Nitrógeno:** Es esencial para la vida de las plantas porque estimula el crecimiento por encima del suelo, y contribuye al brillante color verde característico de las plantas saludables. La tasa de crecimiento de las plantas, generalmente, es proporcional a la tasa a la cual se provee el nitrógeno. Si el suelo tiene deficiencia de nitrógeno, las plantas se vuelven altas y débiles, raquíticas y pálidas.

La mayor parte del nitrógeno en el suelo se ha de hallar en los horizontes superiores de los suelos, y, como consecuencia, el nitrógeno puede drenarse fácilmente de los suelos cuando ocurre alguna perturbación.

- **Bario:** es un metal de tierra alcalina que se presenta en la naturaleza en forma combinada. Se ha reportado que el bario inhibe el crecimiento y los procesos celulares en los microorganismos y que además afecta el desarrollo de las

esporas germinales. El bario en altas concentraciones puede resultar toxico para la salud humana.

- **Conductividad eléctrica:** Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución, por tanto la CE refleja la concentración de sales solubles en la disolución.

Se acepta que las plantas empiezan a ser afectadas de manera adversa cuando el contenido en sales excede del 1%. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de 2 dS/m como límite para el carácter salino, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil del suelo quedan fuertemente influenciadas por el carácter salino.

La conductividad eléctrica de un suelo cambia con el contenido en humedad, así disminuye en capacidad máxima (se diluye la solución) y aumenta en el punto de marchitamiento (se concentran las sales).

Con más detalle se podrá observar el efecto que tiene el inóculo líquido (oil free) sobre las muestras de Patía y Buenaventura con respecto a una muestra control (cortes de perforación sin tratamiento), donde el signo negativo (-) indica la biodegradación de los compuestos en partículas más simples, es decir, que el parámetro evaluado tiende a disminuir su nivel en la muestra de corte de perforación; en cambio los valores con valor positivo (+) en los diagramas, muestra aquellos parámetros que por anabolismo de los microorganismos aumenta su nivel de concentración en los cortes de perforación.

Figura 48. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio oxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-PATIA-1-ST-P

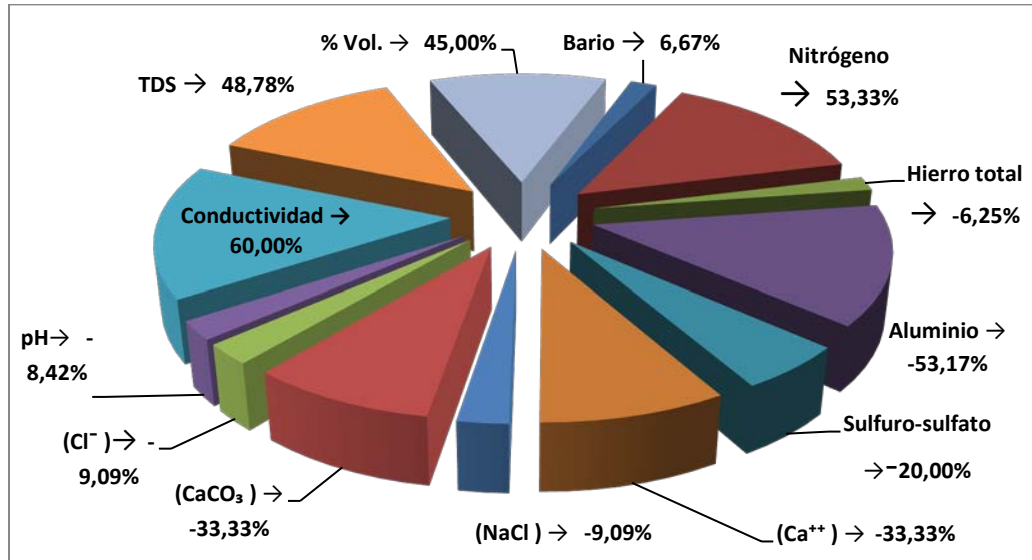
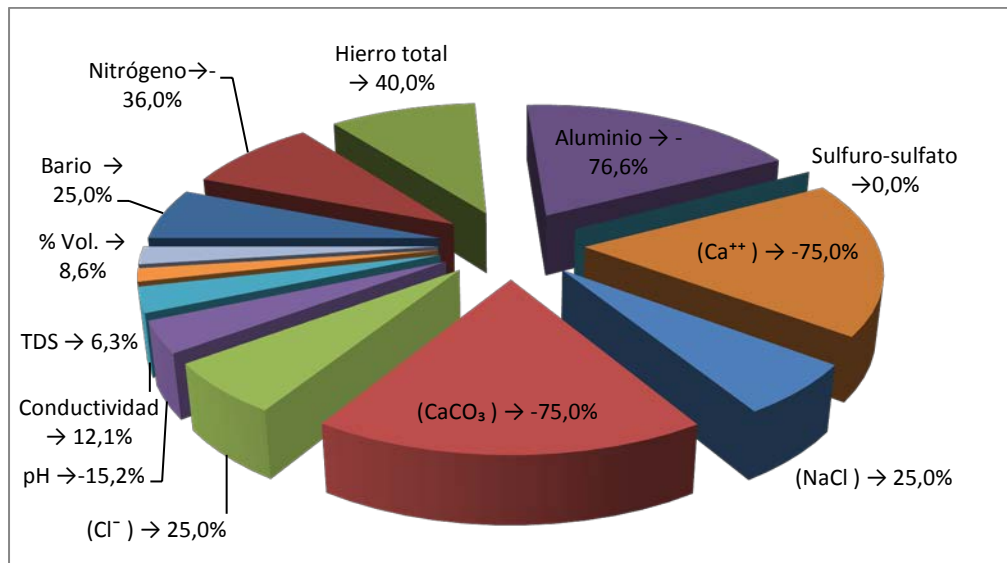


Figura 49. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio anoxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-PATIA-1-ST-P



Fuente: Autores

Figura 50. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio anoxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA-1-ST-P (1)

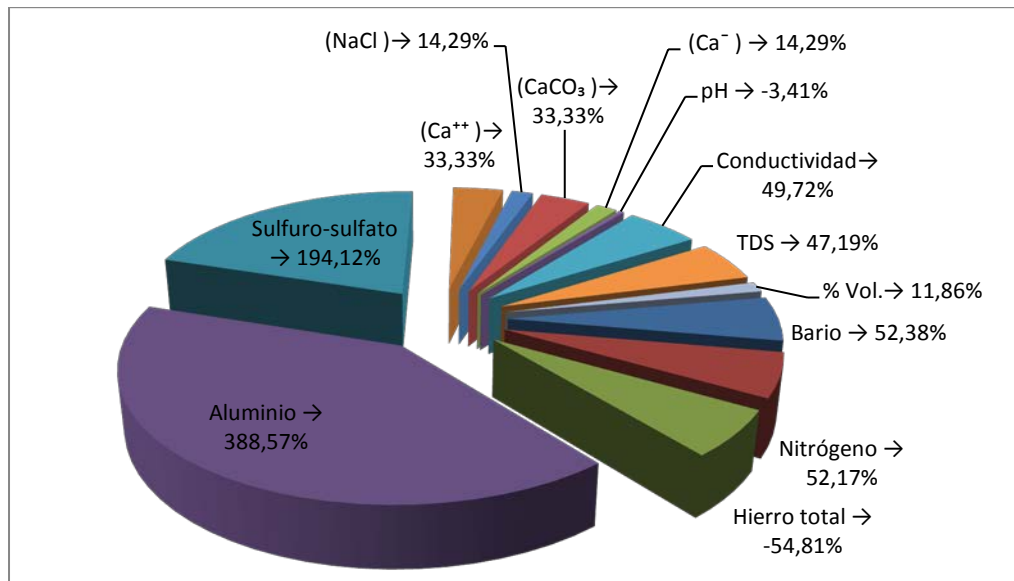
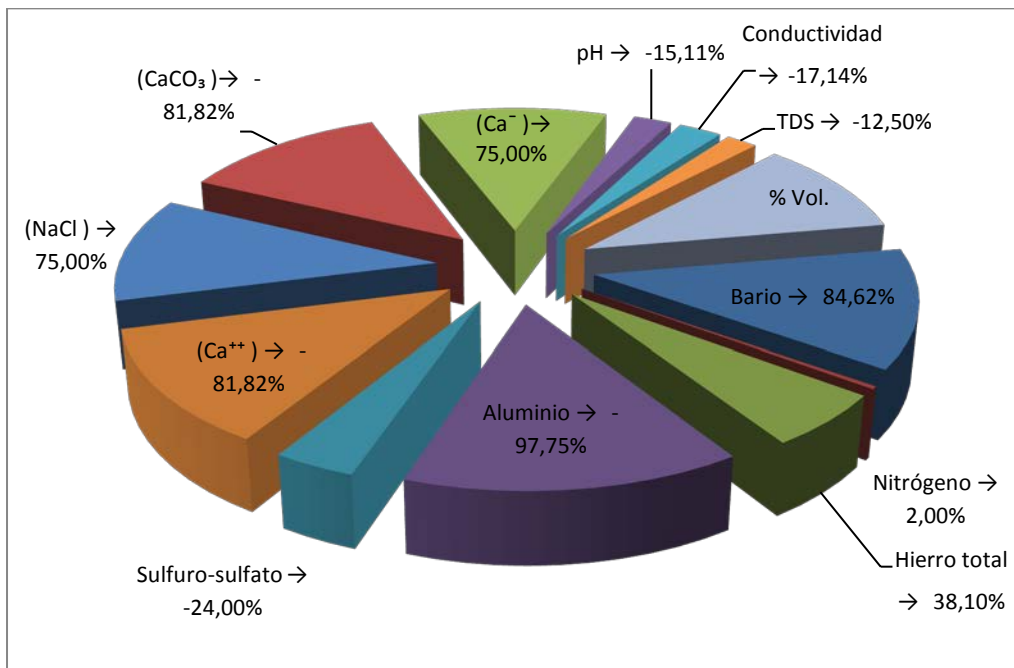


Figura 51. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio oxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA -1-ST-P (1)



Fuente: Autores

Figura 52. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio anoxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA -1-ST-P (2)

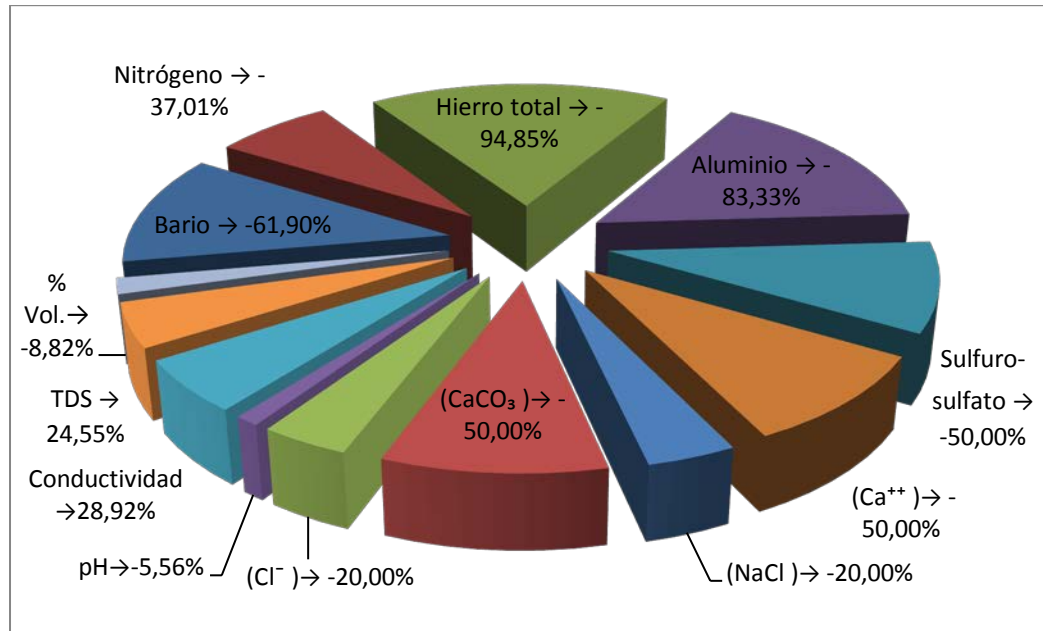
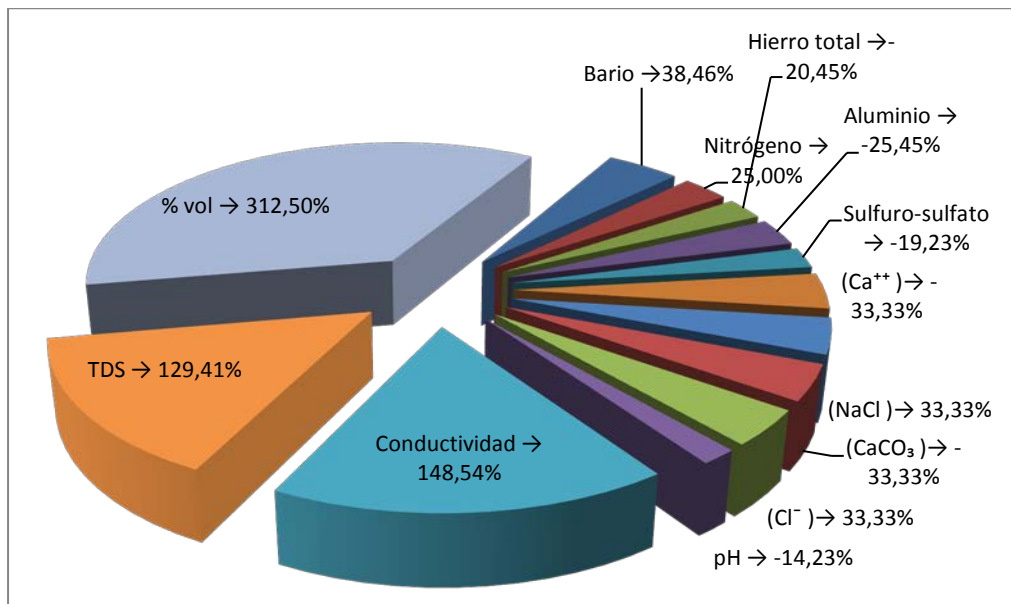


Figura 53. Efecto del oíl free con respecto a una muestra control en un medio oxigénico aplicado en cortes de perforación de ANH-B/VTURA -1-ST-P (2)



Fuente: Autores

10. CONCLUSIONES

El suelo hace parte de un sin número de procesos tanto físicos, químicos como biológicos, en el cual se ven involucradas actividades de microorganismos, ciclos biogeoquímicos, concentraciones de metales, y procesos orgánicos. Actividades como la perforación, generan alteraciones en el suelo como producto del vertimiento de sustancias químicas como polímeros, surfactantes, densificantes que aunque no representan un riesgo potencial, no significa que el medio esté libre de contaminación y que no requiera un mecanismo de tratamiento para su posterior aprovechamiento.

El empleo de métodos alternativos como los biológicos en la industria petrolera, aunque implique un poco más de esfuerzo y de tiempo para ver sus resultados, se hace cada día más conveniente, ya que lo que se busca es aplicar técnicas que sean más amigables con el medio ambiente, que posean diversidad de aplicaciones y que no generen efectos adversos en tiempos futuros.

La biorremediación muestra resultados alentadores, en los cuales a través de pruebas de laboratorio y utilizando un inóculo para tratamiento de lodos base aceite, se logra la reducción del nivel de concentración de parámetros y compuestos, de la misma manera como se disminuyen al realizar una estabilización con cal viva en las piscinas de los cortes de perforación.

Al realizar la comparación de resultados de los proyectos ANH-PATIA 1 ST-P y ANH-BVTURA 1 ST-P el estudio de laboratorio demostró mejores resultados en el proyecto ANH-PATIA 1 ST-P en el cual el medio oxigénico cumple con las condiciones óptimas para reforestar y aprovechar el suelo como un recurso natural en la siembra de cultivos, ya que los macronutrientes como el nitrógeno y el bario, son elementos esenciales para la fertilidad de las plantas y de los suelos.

En un medio estimulado con aire, se aprecia el proceso metabólico llevado a cabo por los microorganismos, en donde se efectúa la degradación o desintegración de las moléculas contaminantes (catabolismo), produciendo de esta manera compuestos estables de baja energía, que en su mayor parte es almacenada en el material celular de los microorganismos como fuente de energía (ATP) para la conversión de un sustrato en productos finales.

Parámetros como el Bario, Nitrógeno y el TDS mostraron un aumento después de la aplicación del oil free en el medio oxigénico, lo cual se debe a que los microorganismos del inóculo realizaron un proceso anabólico, donde se lleva a cabo la síntesis o construcción de moléculas de estos compuestos.

El marco legal colombiano en cuanto al manejo de residuos sólidos en la industria del petróleo se refiere, se encuentra bastante limitado, puesto que sus controles se basan en normas establecidas bajo condiciones físicas y químicas de suelos de otros países.

Un factor limitante en la aplicación de la biorremediación es el porcentaje de humedad de los cortes de perforación (debe ser menor de 50%), esto se debe a que los microorganismos necesitan de un medio bastante húmedo para lograr, en primer lugar su crecimiento y en segundo lugar efectuar las actividades biodegradativas de los contaminantes.

La adición de cal viva en cortes de perforación, permite su deshidratación encapsulando los lixiviados, sin embargo genera un aumento en la alcalinidad del suelo, de la misma manera que concentra los contaminantes inherentes al lodo; haciendo de esta técnica convencional insuficiente para el posterior aprovechamiento del suelo.

11. RECOMENDACIONES

- Seguir investigando en el campo de las técnicas biotecnológicas, y su mejoramiento, de tal manera que se fomente su masiva aplicación en la industria del petróleo en cuanto al manejo de residuos sólidos y líquidos se refiere.
- A nivel de campo se propone realizar la biorremediación a medida que salga material (cortes de perforación) considerable para la aplicación y posteriormente añadir material orgánico (aserrín, tierra nativa y/o abono).
- Realizar una evaluación económica que permita determinar que tan factible será implementar la tecnología de la biorremediación en pozos tanto estratigráficos como de producción.
- Comprobar la eficiencia de la bioestimulación combinada con la aplicación de otros biotratamientos como por ejemplo la Fitorremediación

12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)
2. ALEXANDER, M. (1994): Biodegradation and bioremediation. *Academic Press*, San Diego.
3. APARICIO GOMEZ, Orlando. PORTILLA RODRIGUEZ, Hellmuth. Biorremediación de Suelos Contaminados con Derrames de Crudos. Monografía.UIS.1997
1. AUSR, S.; FERNANDO, T.; BROCK, B.; TUISEL, H. and BUMPUS, J. (1988): Biological Treatment of Hazardous Wastes by *Phanerochaete Chrysosporium*. G. Lewandowski et al. (Eds.), Engineering Foundation, New York.
2. ATLAS, Ronald M. BARTHA, Richard. Ecología microbiana y microbiología ambiental. 1998
3. BECARIA VALERO, Javier. MARTINEZ ARIAS, Carlos. Tratamiento De Ripios Producto De La Perforacion Con Lodos Base Aceite. Tesis de posgrado.UIS. 1997
4. CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. and HSU, F. C. (1996): Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agron.* 56: 55-114.
5. Decreto 1602 de 31 de Julio de 2002. Por el cual se reglamenta el manejo y transporte automotor de mercancías peligrosas por carretera.

6. Decreto 4741 del 30 de diciembre de 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.
7. El Decreto 2820 del 5 de agosto de 2010 emitido por el MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL “Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales”
8. EWEIS, J. B.; ERGAS, S. J.; CHANG, D. P. Y. and SCHROEDER, E. D. (1999): Principios de Biorrecuperación. McGraw Hill, New York, p. 327.
9. FRIONI, Lilian. Procesos microbianos. Editorial de la fundación universidad nacional de rio de cuarto Argentina. 1999
10. FUNACH-ASCAPAM Unión Temporal. EL SUELO Propiedades físicas-químicas Conservación. Mocoa, 2002
11. Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos. Bases conceptuales. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial Republica de Colombia
12. GOMEZ, Orlando Aparicio. PORTILLA, Hellmuth Esteban. Biorremediación de suelos contaminados con derrames de crudos. Bucaramanga 1997
13. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos. Capítulo 2. Páginas 16-18
14. Ley 99 de 22 de diciembre de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y

conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

15. Ley 430 de 1998. Por la cual se dictan normas prohibitivas, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.
16. LÓPEZ LAFUENTE, Antonio. Biorremediación y fitorremediación en suelos contaminados
17. M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.
18. MAROTO, María Esther. ROGER, Juan Manuel., “Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos” 2000
19. O.R. Costanza, G.I. Vecchioli, M.T. Del Panno, I.S. Morelli, M.T. Paineira Técnicas de biorremediación ensayos de tratabilidad - *NIVEL I*
20. ORTIZ BERNAD, Irene; SANZ GARCÍA, Juana; DORADO VALIÑO, Miriam; VILLAR FERNÁNDEZ, Susana. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Fundación para el conocimiento madri+d. Cap.3. P.56
21. PARPATIYAR. Treatment of trichloroethylene (TCE) in Membrane Biofilter, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 50. P57-64. 1996

22. RINCON LIZCANO, Martha Cecilia.(2004). Estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental. Especialización en química ambiental. UIS. P.91
23. RODRIGUEZ BERMUDEZ, Eliserio. Reestructuración Teórico - Práctica De La Guía De Laboratorio De Lodos Y Cementos. Tesis de pregrado. UIS.2007
24. SIMS, R. C. (1993): Site characterization requeriments pp. 3.1-3.8. In: Bioremediation of hazardous waste sites: Practical approaches to implementation. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C
25. TARBUCK E.J.; LUTGENS F.K. y Tasa, D. Ciencias de la Tierra. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed. Capitulo 6.
26. TATE, R. L. (1987): Soil Organic Matter. Biological and Ecological Effects. John Wiley and Sons, p. 291. New York.
27. TORRRES CHAPARRO, Alix. URIBE, Nelson. Microbiología básica y aplicada. UIS . Bucaramanga, 2002.
28. VALENCIA ORTIZ, Joaquín Andrés. Análisis facial y caracterización de ambientes y sub ambientes de los pozos estratigráficos de la cuenca Cauca-Patía región del bordo, Cauca; Tesis de grado UIS 2011.
29. VERACIERTA ALFARO, Luis Emilio. Evaluación de las técnicas Realizadas por el centro de tratamiento y recuperación de desechos en El Campo Hamaca, Estado Anzoátegui. Maturín, Febrero De 2006

13. ANEXOS

ANEXO A. Ficha técnica del inóculo oil free

OIL - FREE

INOCULANTE CONSORCIO MICROBIOLÓGICO PARA LA DIGESTIÓN Y REDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

OIL – FREE, es un inóculo líquido que contiene microorganismos benéficos exógenos y autóctonos; estos, debido a sus diversos procesos bioquímicos como la fermentación de tipo láctico y alcohólico, síntesis de metabolitos y exclusión competitiva, ayudan a digerir y reducir la concentración de hidrocarburos en los sustratos a tratar. Compuesto por microorganismos de tipo benéfico exógeno y autóctono, no alteran los ecosistemas donde son aplicados.

COMPOSICIÓN

OIL – FREE es un producto elaborado bajo pedido específico del cliente compuesto por diversas cepas de microorganismos vivos de los grupos: lactobacilos (*acidophilus – casei - lactis – plantarum*) y levaduras (*saccharomyces cerevisiae*) y cepas autóctonas extraídas de muestras de lodos contaminados con hidrocarburos in - situ en concentración $1 \times 10^6 - 8$ U.F.C. por ml. Aprox.

MECANISMO DE ACCIÓN

Los metabolitos sintetizados por esta combinación de bacterias benéficas y su efecto de exclusión competitiva reducen sustancialmente las poblaciones patógenas en el entorno (sustrato). La acción simbiótica de todos los microorganismos que contiene **OIL – FREE**, ayudan a la degradación rápida de sustratos contaminados con hidrocarburos reduciendo las fracciones contaminantes en subproductos biodegradables que no contaminan el medio ambiente.

CAMPOS DE APLICACIÓN

Biorremediación de lodos contaminados con hidrocarburos / Derrames de crudo

DOSIFICACION Y USO

DOSIS: (Recomendada)

1 litro de OIL – FREE por metro cubico de material contaminado con hidrocarburos a biorremediar.

DILUCION:

1 litro de OIL – FREE diluido en 200 a 400 litros de agua.

FRECUENCIA DE APLICACIÓN:

Dividir el volumen total de producto diluido para aplicaciones semanales durante 8 a 10 semanas.

PRECAUCIONES

- Almacenar en un lugar seco, fresco, protegido de la luz solar
- Su actividad y concentración prevalece por 6 meses.
- El producto es de color amarillo a marrón claro y presenta un olor afrutado.

DATOS DE SEGURIDAD

- El producto es inocuo
- No explosivo
- En caso de tener contacto con la piel y/o los ojos lavar con abundante agua
- En caso de ingestión accidental acuda inmediatamente al médico

PRESENTACION

Bidón x 30 y 60 litros

OIL – FREE ES PRODUCIDO BAJO PEDIDO ESPECIFICO DEL CLIENTE CON CARACTERISTICAS DETERMINADAS POR EL TIPO DE SUSTRATO A TRATAR.

ANEXO B. Productos adicionados al lodo para proporcionar sus características reológicas empresa Q-MAX

PRODUCTO	CONCENTRACIÓN	UNIDAD	OBSERVACIONES
BENTONITA WYOMING (NATURAL GEL)	0,82	ppb	ARCILLA
SODA CAUSTICA	2,12	ppb	NaOH
GOMA DE XHANTAN (QXAN)	0,27	ppb	POLIMERO=AGENTE QUE AUMENTA LA VISCOSIDAD
CELULOSA POLIANIONICA LV (PAC L)	2,22	ppb	CMC POLIMERICO
BACTERICIDA GLUTARALDHEIDO (Q CIDE)	0,03	ppb	FORMOL
CaCO3 M200	26,59	ppb	CARBONATOS
CaCO3 M40-100	6,83	ppb	CARBONATOS
INHIBIDOR DE ARCILLAS PLYAMINA (Q MAXDRIL)	0,96	ppb	
ASFALTO SULFONATADO	1,7	ppb	ESTABILIZADOR, RECUBRE EL HUECO
ALMIDON HT-HP (Q STAR HT)	0,89	ppb	
PHPA ENCAPSULADOR (SYNERFLOC)	2,01	ppb	
POLIMERO PARA FILTRADO HT-HP (DRISCAL)	1,1	ppb	
MEJORADOR DE ROP (Q DRILL UP)	1,07	ppb	LIQUIDO-LUBRICANTE
TANINO LIBRE DE CROMO (DESCO)	0,52	ppb	LINO-SULFONATO (ORGANICO)
CASCARA DE COCO (NUT PLUG)	2,55	ppb	
BICARBONATO DE SODIO	0,82	ppb	
CaCO3 M325	14,6	ppb	
CaCO3 M10-40	1,36	ppb	
GLICO POLIAQUILENICO (GLYMAX)	1,08	ppb	ALCOHOL-INHIBIDOR
ACIDO CITRICO	0,39	ppb	PARA BAJAR EL PH
CAL HIDRATADA	0,5	ppb	
BARITA	174,23	ppb	PARA AUMENTAR LA DENSIDAD
GRAFITO MATERIAL OBTURANTE	0,83	ppb	LUTITAS, AGENTE ESTABILIZADOR

ANEXO C. Aforo de las piscinas del pozo ANH PATIA 1 ST P

PISCINA	AFORO PISCINAS POZO ANH PATIA 1 ST P								
	AREA MAYOR			AREA MENOR			ALTURA		VOLUMEN
	L1	L2	AM	L3	L4	Am	LL	H	TOTAL
PISCINA 1 CORTES									
PISCINA 2 CORTES	18	29,3	527	12	24,3	291	3,9	2,492	1005,322
					29	390	3,9	2,492	1295,981

	AFORO PISCINAS POZO ANH PATIA 1 ST P					
	Vol. Total Real	Angulos			Altura Libre	Volumen Ocupado
	Bls		Alfa	Omega	(Mts)	Bls
PISCINA 1 CORTES	6313	0,639	33,64	56,36	0	6312
PISCINA 2 CORTES	8139	0,639	33,793	56,208	0,5	6860