

# Universidad de El Salvador

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

ESCUELA DE QUÍMICA



**“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y PÉRDIDA DE  
FILTRADO DE DISPERSIONES CON AGUA GEOTÉRMICA Y  
PALYGORSKITA (ATAPULGITA)”**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO POR:**

**JHOSELIN THAMARA JACOBO GALEANO**

**HILDA IVETH OTERO MORENO**

**PARA OPTAR AL GRADO DE**

**LICENCIADA EN CIENCIAS QUÍMICAS.**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, 12 DE FEBRERO DEL 2021**

# Universidad de El Salvador

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

ESCUELA DE QUÍMICA



**“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y PÉRDIDA DE  
FILTRADO DE DISPERSIONES CON AGUA GEOTÉRMICA Y  
PALYGORSKITA (ATAPULGITA)”**

**PARA OBTENER AL GRADO DE  
LICENCIADA EN CIENCIAS QUÍMICAS.**

**TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:**

JHOSELIN THAMARA JACOBO GALEANO

HILDA IVETH OTERO MORENO

**ASESORES:**

LICDO. RENÉ ALEXANDER ARÉVALO.

LICDO. HUGO ALEXANDER ESTRADA PÉREZ.

**CIUDAD UNIVERSITARIA, 12 DE FEBRERO DEL 2021**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR SEPTIEMBRE DEL 2019**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR**

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

**SECRETARIO GENERAL**

ING. FRANCISCO ALARCÓN

**FISCAL**

LICDO. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARIN

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICAS**

**DECANO**

LICDO. MAURICIO HERNÁN LOVO

**VI CEDECANA**

M.Sc. ZOILA VIRGINIA GUERRERO

**SECRETARIO**

LICDO. JAIME HUMBERTO SALINAS ESPINOZA

**DIRECTOR DE LA ESCUELA DE QUÍMICA**

LIC. NELSON MAURICIO COTO

## **AGRADECIMIENTOS.**

Dios, tu amor y bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son el resultado de tu protección y apoyo, te agradezco por todo este tiempo que me has llenado de bendiciones y personas que han sido luz en mi vida para poder finalizar una etapa tan importante.

A mi ángel en el cielo, mi padre Jorge Alberto Jacobo Guzmán, quien fue un pilar en mi vida, un apoyo incondicional en cada etapa, quién desde el cielo me cuida, un abrazo papi, te amaré por siempre, te extraño.

A mi madre, Maritza Galeano de Jacobo, por el amor tan sincero que me ha brindado todos los días, por el apoyo y cuidados que me dedicas, gracias, por tanto, todo esto te lo debo a ti mami, te amo.

A mis hermanos Juan Carlos Jacobo Galeano y Kelly Carolina Jacobo Galeano por todo el apoyo que me brindaron, por los consejos que me dieron, por estar a mi lado en cada momento de tropiezo y darme su mano para continuar, muchas gracias hermanos.

Al amor de mi vida, Felipe de Jesús Castellanos, quién me ha brindado días llenos de amor y felicidad. Gracias por todo el apoyo que me has brindado y por siempre estar a mi lado en cada momento sean estos buenos y malos, gracias.

A mi tía, Alicia Galeano de López quién ha estado a mi lado como una segunda madre, apoyándome siempre y brindándome un amor sincero junto a mis primos Daniel Ernesto López Galeano y Emely Aliza López Galeano, gracias.

A mi compañera y amiga Iveth Otero, por emprender este viaje juntas y poder decir: ¡Lo Logramos!, te agradezco por todo el apoyo y confianza depositada en mí para ser tu compañera, gracias.

A mi asesor de tesis, Licdo. René Alexander Arévalo, quién dedico tiempo y confianza, gracias por todo, realmente un docente ejemplar.

Y a todas esas personas que tuve la oportunidad de conocer y formaron parte de mi aprendizaje.

Atentamente,

**Jhoselin Thamara Jacobo Galeano**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Al creador de la vida, Dios todo poderoso por este nuevo triunfo, por colocar a las personas indicadas en cada etapa y proceso de mi vida para guiarme, ser luz, apoyarme, aconsejarme, lo cual ha permitido que sonría ante todos mis logros, mucho más en este del cual me siento orgullosa y segura de que con su ayuda será de provecho y prosperidad en mí provenir.

A mi madre María Santos Moreno de Otero y padre Alfredo Edgardo Otero Recinos por ser los promotores de mis sueños, confiar, creer en mí y en mis expectativas, agradezco que con gran esfuerzo me apoyaron en este proceso, por la paciencia con la que cada día se preocupaban por mi avance y desarrollo de esta tesis.

A mi tío José María Otero, el cual desempeñó un papel fundamental en la culminación de este logro ya que sin su ayuda esta meta se hubiera quedado sin culminar.

A mi madrina Orbelina Carpio por estar ahí incondicionalmente poniendo su granito de arena para que este objetivo trazado en mi vida no fracasara y fuera alcanzado.

A Thamara Jacobo Galeano mi amiga y compañera de tesis por estar siempre dispuesta a trabajar, por tener siempre la palabra indicada para darme aliento, ánimos y confianza e inspirarme a no darme por vencida.

Al asesor de tesis Rene Alexander Arévalo por ser una inspiración, haberme brindado la oportunidad de recurrir a su gran capacidad y conocimiento científico, por ser el guía perfecto para culminar con éxito el trabajo de investigación, por su esfuerzo, dedicación, paciencia, calidad como docente y persona.

Agradezco a todas las personas que han formado parte de mi vida y que de alguna forma u otra me han dejado una enseñanza que me ha forjado como la persona que soy hoy en día, la cual culmina y cierra una etapa de su vida para dar paso a muchas más.

**Hilda Iveth Otero Moreno**

## **DEDICATORIAS.**

*Dedico este trabajo de graduación a mis padres ya que sin su apoyo no lo habría logrado. Su bendición a diario me protege y guía por el camino del bien.*

*Les entrego mi dedicación y esfuerzo puesto en este trabajo como ofrenda por el amor y paciencia papi y mami.*

*Los amo por siempre y para siempre.*

*Atentamente,*

***Jhoselin Thamara Jacobo Galeano***

*Dedico este trabajo a mis padres por el apoyo que me brindaron a lo largo de mi vida universitaria, por todo el esfuerzo y sacrificio que han realizado para poder darme la oportunidad de ser una profesional, estaré eternamente agradecida, los amo.*

*Atentamente,*

***Hilda Iveth Otero Moreno***

## ÍNDICE.

<b>I. RESUMEN.</b> .....	1
<b>II. INTRODUCCIÓN.</b> .....	2
<b>III. JUSTIFICACIÓN.</b> .....	3
<b>IV. OBJETIVOS.</b> .....	4
<b>V. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.</b> .....	5
<b>VI. MARCO TEORICO.</b> .....	6
6.1 ESTADO DEL ARTE.....	6
6.2 FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	8
6.2.1 Clasificación de los Fluidos de Perforación.....	9
6.2.1.1 Lodos Base agua.....	11
6.2.1.2 Lodos Base aceite.....	11
6.2.2 Propiedades de los Fluidos de Perforación.....	13
6.2.2.1 Densidad.....	13
6.2.2.2 Reología.....	13
6.2.2.3 Ley de viscosidad de Newton.....	15
6.2.2.3.1 Fluidos Newtonianos.....	16
6.2.2.3.2 Fluidos no Newtonianos.....	16
6.2.2.4 Pérdida de Filtrado.....	16
6.2.2.5 Alcalinidad.....	17
6.2.2.6 pH del Lodo.....	17
6.2.2.7 Lubricidad.....	17
6.2.3 Propiedades fisicoquímicas de los fluidos de perforación.....	17
6.2.3.1 Transporte y suspensión de cortes generados durante la perforación.....	17
6.2.3.2 Control de presiones del subsuelo.....	19
6.2.3.3 Lubricidad y enfriamiento de la broca y sarta de perforación.....	19
6.2.3.4 Revestimiento de las paredes del pozo.....	19
6.2.3.5 Suspensión de la sarta y el revestimiento.....	20
6.2.3.6 Interpretación de registros eléctricos.....	20
6.2.3.7 Transmisión de energía hidráulica a la sarta y broca.....	21
6.2.4 Generalidades del campo geotérmico en Berlín.....	21
6.2.4.1 Ubicación geográfica.....	21
6.2.4.2 Geología del campo.....	25
<b>6.3 QUIMICA DE LAS ARCILLAS.</b> .....	28

6.3.1	Definiciones. ....	28
6.3.2	Origen de las arcillas. ....	29
6.3.3	Tipos de arcillas. ....	31
6.3.4	Composición y estructura de las arcillas. ....	32
6.3.5	Propiedades fisicoquímicas de arcillas. ....	43
6.3.5.1	<i>Superficie específica.</i> .....	43
6.3.5.2	<i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC).</i> .....	44
6.3.5.3	<i>Capacidad de absorción y adsorción.</i> .....	48
6.3.5.4	<i>Hidratación e hinchamiento.</i> .....	50
6.3.5.5	<i>Plasticidad.</i> .....	53
6.3.6	Características de un fluido base bentonita-agua. ....	56
6.3.7	Características de un fluido base Atapulgita-Agua. ....	59
<b>VII.</b>	<b>HIPÓTESIS.</b> .....	61
<b>VIII.</b>	<b>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.</b> .....	62
8.1	Materiales. ....	62
8.2	Método. ....	69
<b>IX.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b> .....	78
9.1	Resultados. ....	78
9.2	Discusión de resultados. ....	91
<b>X.</b>	<b>CONCLUSIONES.</b> .....	137
11.1	Recomendaciones. ....	138
11.2	Dificultades. ....	139
<b>XI.</b>	<b>ANEXOS.</b> .....	140
12.1	Anexos parte A. ....	140
12.2	Anexos parte B. ....	142
<b>XII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b> .....	146

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Propiedades reológicas de los fluidos de perforación. (Pérez, 2011).....	14
Tabla 2. Distribución de carga de la capa de esmectita. (Murray, 2006) .....	36
Tabla 3. Tipo de mineral con su correspondiente superficie específica.....	44
Tabla 4. Tipo de arcilla con su correspondiente Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)....	48
Tabla 5. Valores de reología, pérdida de filtrado y revoque (torta) para fluidos de perforación base bentonita-agua fresca. (Toka & Toka, 2015) .....	57
Tabla 6. Aditivos usados en fluidos de perforación con Bentonita. (Amoco Production Company., 1994).....	59
Tabla 7. Algunos parámetros reológicos de atapulgita tomados después de 24 horas (gel de arcilla en 6,4% en peso de suspensión). (Zhang et al., 2017) .....	60
Tabla 8. Materiales, equipo y reactivos (utilizando nombres comerciales). .....	63
Tabla 9. Etapa 1. Valores reológicos, pérdida de filtrado y medición de revoque (torta) tomados como referencia para bentonita-agua fresca. (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015)	75
Tabla 10. Etapa 2. Valores reológicos, pérdida de filtrado y medición de revoque (torta) tomados como referencia para bentonita-agua fresca. (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015) .....	76
Tabla 11. Etapa 3 Valores reológicos, pérdida de filtrado y medición de revoque (torta) tomados como referencia para bentonita-agua fresca. (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015) .....	76
Tabla 12. Cribado de variables.....	79
Tabla 13. Datos preliminares obtenidos para cinco muestras de lodo de perforación a diferentes concentraciones. ....	80
Tabla 14. Datos obtenidos para cada muestra del cribado de variables para lodo de perforación a diferentes concentraciones. ....	80
Tabla 15. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 26 según valores esperados para cada parámetro medido. ....	82
Tabla 16. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 27 según valores esperados para cada parámetro medido. ....	83
Tabla 17. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 28 según valores esperados para cada parámetro medido. ....	83
Tabla 18. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 29 según valores esperados para cada parámetro medido. ....	84
Tabla 19 Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 30 según valores esperados para cada parámetro medido. ....	84

Tabla 20. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 31 según valores esperados para la pérdida de filtrado.....	85
Tabla 21. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 32 según valores esperados para cada parámetro medido. ....	85
Tabla 22. Datos preliminares obtenidos para cada muestra de lodo de perforación a diferentes concentraciones. ....	86
Tabla 23. $pH_M$ obtenido para cada Aditivo con agua geotérmica. ....	88
Tabla 24. Valores de pH del agua geotérmica con R. ....	89
Tabla 25. Diseño de 2 pruebas con cantidad en masa de aditivos y temperatura máxima y mínima.....	90
Tabla 26 . Datos obtenidos para las dos muestras al máximo y mínimo de cantidad en masa de aditivos y temperatura. ....	90
Tabla 27. Comparación de parámetros reológicos, pérdida de filtrado y torta para tres etapas de referencia.....	104
Tabla 28. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas (VA).....	108
Tabla 29. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas (VP). ....	110
Tabla 30. Tabla. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas (YP). ....	112
Tabla 31. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas ( $\tau_{10s}$ ). ....	115
Tabla 32. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas ( $\tau_{10min}$ ). ....	117
Tabla 33. Comparación de parámetros reológicos, de pérdida de filtrado y pH para tres etapas de referencia.....	133
Tabla 34. Comparación de parámetros reológicos, de filtrado, pH, densidad y retorta para tres etapas de referencia. ....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Proceso de perforación de suelos. (Petruzzello, Rafferty, Bauer, & Duignan, 1994)....	9
Figura 2. Esquema de clasificación de los fluidos de perforación. (Amoco Production Company., 1994).....	10
Figura 3. Esquema de Fluidos base agua. (Amoco Production Company., 1994).....	12
Figura 4. Clasificación de los fluidos base neumáticos. (Prasetia, Salazar, & Toralde, 2010) ...	12
Figura 5. Transporte de recortes en la perforación. («Drilling through direct circulation.», 2000) .....	18
Figura 6. Revestimiento de la pared del pozo. (Caenn, Darley, & Gray, 2011b) y (Saboori, Sabbaghi, Kalantariasl, & Mowla, 2018).....	20
Figura 7. Departamento de Usulután con ubicación de la central Geotérmica. Modificada de la fuente (Artiga & Mata, 2004).....	22
Figura 8. Historia del desarrollo geotérmico de El Salvador, campo geotérmico de Berlín. (Guidos & Burgos, 2011).....	24
Figura 9. Fotos del Campo Geotérmico de Berlín («LaGeo - Energía Geotérmica en El salvador, centrales.», 1999).....	25
Figura 10. Campo geotérmico de Berlín: el rectángulo rosa muestra la referencia espacial para los mapas de distribución a escala del campo. (Ayala, 2014).....	26
Figura 11. Campo Geotérmico de Berlín. (Rodríguez, 2005).....	27
Figura 12. Fosa tectónica o graben. (Richardson, 2018). En donde las flechas indican el desplazamiento en relación a la otra. ....	28
Figura 13. Dibujo esquemático de la hoja octaédrica. (Murray, 2006).....	33
Figura 14. Dibujo esquemático de la lámina tetraédrica. (Murray, 2006).....	34
Figura 15. Esquema sobre clasificación de silicatos por Bailey (1980). (Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017).....	35
Figura 16. Diagrama esquemático de la estructura de esmectitas (Murray, 2006)(Sachs-Barrable, Darlington, & Wasan, 2014).....	36
Figura 17. Esquema de la estructura de montmorillonita de sodio. (Ubowska, 2010).....	37
Figura 18. Diferentes orientaciones de fibra: izquierda) eje a en la vertical, b) eje b en la vertical, y c) eje c paralelo a la vertical. (García-Rivas, Sánchez del Río, García-Romero, & Suárez, 2017).....	38
Figura 19. Ilustración esquemática simplificada de la estructura cristalina de atapulgita. (Vivaldi & González, 1962).....	39
Figura 20. Lámina de paligorskita trioctaédrica con grupos M1M2M2OH y sitios vacantes M1 (izquierda) y dioctaédrica que consta de grupos M2M2OH (AlAlOH, AlFe <sup>3+</sup> OH y Fe <sup>3+</sup> Fe <sup>3+</sup> OH) (derecha), sitios del borde M3 cumplen su coordinación con H <sub>2</sub> O(Chryssikos et al., 2009).....	40

Figura 21. Esquema estructural de paligorskita. (A) Lámina tetraédrica de paligorskita, con oxígenos apicales que apuntan en direcciones opuestas. (B) Lámina tetraédrica de paligorskita, la sombra gris corresponde a la lámina octaédrica y estructura de ambas láminas con sus átomos constituyentes. (C) Lámina octaédrica de palygorskita. (D) Vista esquemática de una celda de palygorskita. (Min, 2015) (Suárez & García-Romero, 2011) .....	41
Figura 22. Modelo de agregación y desagregación de barras de cristal de atapulgita. (Wang & Wang, 2016).....	42
Figura 23. Cambio de bentonita de sodio a calcio. (Egloffstein, 2001) .....	46
Figura 24. Modelo de microestructura y permeabilidad de arcilla. Lado izquierdo: arcilla dispersa, bentonita de sodio fina. Lado derecho: arcilla agregada dispersa, como bentonita de calcio gruesa. (Egloffstein, 2001) .....	47
Figura 25. Dibujo esquemático que muestra la acción de hinchamiento de montmorillonita con el aumento del contenido de humedad. (Clem & Doehler, 1960).....	51
Figura 26. A) Hidratación de montmorillonita de sodio y calcio (Amoco Production Company., 1994) .....	53
Figura 27. Representación de la resistencia al cizallamiento (corte) aparente en función del contenido de agua para un material arcilloso típico. (Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017) .....	55
Figura 28. Viscosímetro de lectura directa (reómetro, Fann, 207198, modelo 35A). (foto tomada del equipo).....	65
Figura 29. Filtro prensa API (presurizado básico, Fann, 207127, modelo 300). (foto tomada del equipo).....	66
Figura 30. Compresor de aire con tanque plano. (PORTER-CABLE, modelo C2006,). (Foto tomada del equipo).....	66
Figura 31. Agitador De Velocidad Variable Reversible (Glas-Col, modelo 099D GT31). (Glas-Col., 2014).....	67
Figura 32. pH ISE meter (Denver Instrument, modelo225). (Foto tomada del equipo) .....	67
Figura 33. Balanza Analítica (HOAUS-PIONEER, modelo 214PCA). (Foto tomada del equipo) .....	68
Figura 34. Balanza para densidad de lodos (Baroid). (Foto tomada del equipo) .....	68
Figura 35. Kit de retorta 10 mL (Fann). (Foto tomada del equipo).....	69
Figura 36. Esquema del desarrollo de la metodología experimental.....	69
Figura 37. Diseño factorial (Diseño Plackett-Burman). (Naveena, Altaf, Bhadriah, & Reddy, 2005). En la fila horizontal superior se coloca cada variable (factores) utilizada y representada en este caso por $X_1$ , $X_2$ , hasta $X_{15}$ , para un total de 16 muestras , asignando el +1 para representar concentración mayor y -1 concentración menor de factores. ....	70
Figura 38. Esquema que resume el procedimiento realizado en la parte A y B.....	77

Figura 39. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 1 preliminar para la parte A en 15 min y 1 h.....	91
Figura 40. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 2 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.....	92
Figura 41. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 3 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.....	92
Figura 42. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 4 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.....	93
Figura 43. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 5 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.....	93
Figura 44. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 6 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	94
Figura 45. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 7 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	94
Figura 46. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 8 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	95
Figura 47. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 9 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	95
Figura 48. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 10 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	96
Figura 49. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 11 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	96
Figura 50. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 12 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	97
Figura 51. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 13 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	97
Figura 52. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 14 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	98
Figura 53. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 15 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	98
Figura 54. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 16 después de 15 min y 2 h. de agitación. ....	99
Figura 55. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 17 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	99
Figura 56. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 18 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	100

Figura 57. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 19 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	100
Figura 58. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 20 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	101
Figura 59. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 21 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	101
Figura 60. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 22 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	102
Figura 61. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 23 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	102
Figura 62. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 24 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	103
Figura 63. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 25 después de 15 min y 2 h de agitación. ....	103
Figura 64. Gráfico de pérdida de filtrado y torta (antes de lavar) después de 2 h de agitación. ....	105
Figura 65. Gráfico de pérdida de filtrado y torta (antes de lavar) después de 2 h de agitación. ....	105
Figura 66. Gráfico de valores de pH obtenidos después de 15 minutos de agitación. ....	106
Figura 67. Gráfico de valores de VA después de 15 min y 2 h de agitación. ....	107
Figura 68. Gráfico de valores de VP después de 15 min y 2 h de agitación. ....	109
Figura 69. Gráfico de valores de YP después de 15 min y 2 h de agitación. ....	111
Figura 70. Gráfico de valores de $\tau_{10s}$ después de 15 min y 2 h de agitación. ....	114
Figura 71. Gráfico de valores de $\tau_{10min}$ después de 15 min y 2 h de agitación. ....	116
Figura 73. Efecto de los aditivos en el pH. ....	118
Figura 72. Gráfico de Pareto del pH. ....	118
Figura 74. . Gráfico de Pareto de la Viscosidad Aparente. ....	119
Figura 75. Efecto de los aditivos en la Viscosidad Aparente. ....	119
Figura 76. Gráfico de Pareto de la Viscosidad Plástica. ....	120
Figura 77. Efecto de los aditivos en la Viscosidad Plástica. ....	120
Figura 78. Gráfico de Pareto del Punto Cedente. ....	121
Figura 79. Efecto de los aditivos en el Punto Cedente. ....	121
Figura 80. Gráfico de Pareto para la Fuerza Gel a 10 segundos. ....	122
Figura 81. Efecto de los aditivos en la Fuerza Gel a 10 segundos. ....	122
Figura 82. Gráfico de Pareto de la Fuerza Gel a 10 minutos. ....	123
Figura 83. Efecto de los aditivos en la Fuerza Gel a 10 minutos. ....	123
Figura 84. Gráfico de Pareto para la Pérdida de Filtrado. ....	124
Figura 85. Efecto de los aditivos en la Pérdida de Filtrado. ....	124
Figura 86. Gráfico de Pareto para el tamaño de revoque. ....	125

Figura 87. Efecto de los aditivos en el revoque. ....	125
Figura 88. Diagrama de Matriz de pH, VA, VP, YP, $\tau_s$ , $\tau_{min}$ , PF, TT. ....	127
Figura 89. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 26.....	129
Figura 90. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 27.....	130
Figura 91. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 28.....	130
Figura 92. Gráfico de las Propiedades Reológicas, filtración y pH a 15 min. y 2 hrs. de la muestra 29.....	131
Figura 93. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 30.....	131
Figura 94. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 31.....	132
Figura 95 . Gráfico de las Propiedades Reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 32.....	132
Figura 96. Curva de pH vs. Gramos de R en 400mL de agua geotérmica. ....	134
Figura 97. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h, agregando a este último $\rho$ y RT. de la muestra 33.....	135
Figura 98. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h, agregando a este último $\rho$ y RT de la muestra 34.....	135
Figura 99. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado.....	140
Figura 100. Fotos del revoque obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque y d) grosor después de lavar el revoque. ....	141
Figura 101. Fotos del revoque obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque y d) grosor después de lavar el revoque. ....	141
Figura 102. Fotos del revoque obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque. ....	142
Figura 103. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado. ....	143

Figura 104. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado. .... 144

Figura 105. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado. .... 145

Figura 106. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque y d) grosor después de lavar el revoque..... 145

## I. RESUMEN.

El presente trabajo detalla el proceso de la investigación ejecutado en la parte A y la parte B de la metodología definida para estudiar las Propiedades Reológicas y pérdida de filtrado de dispersiones con agua geotérmica y Atapulgita que cumplan con los valores bibliográficos de referencia. Los resultados se analizaron según la función bibliográfica que desempeña cada aditivo usado (18) con respecto a los parámetros: viscosidad aparente (VA), viscosidad plástica (VP), punto cedente (YP), fuerza gel a 10 minutos ( $\tau_{10\text{min}}$ ) y a 10 segundos ( $\tau_{10\text{seg}}$ ) (se midieron utilizando un Reómetro), filtrado (se midió utilizando un Filtro Prensa) y tamaño de revoque (TT) (se midió utilizando un calibrador) que por medio del desarrollo de un diseño factorial de *Plackett-Burman* con máximos y mínimos de concentraciones de los aditivos, permitió obtener datos favorables sobre los parámetros reológicos y de filtrado de las suspensiones, estos resultados contribuyeron a la elaboración de gráficos de Pareto y de efectos principales para cada variable. De las 20 muestras que se realizaron según el diseño factorial (parte A) la muestra más similar a los rangos de referencia fue la 17.

La interpretación de los valores de las 20 muestras en los gráficos y realización de pruebas preliminares (parte B) demostró que no es necesaria la utilización de los 18 aditivos con los que se contaba inicialmente, según los resultados obtenidos los que mayor impacto tuvieron en las formulaciones solamente fueron 5 aditivos incluida en ésta lista la arcilla base para la formulación de las suspensiones. Esto permitió reducir la cantidad de variables (aditivos) utilizados en la parte B de 2 muestras, la cual una es la concentración al máximo y la otra al mínimo de cada aditivo.

El análisis estadístico de las 20 muestras nos indica que, de cinco propiedades, cuatro de ellas no se ven afectadas por el tiempo de agitación, siendo estas la VA, VP,  $\tau_{10\text{seg}}$  y  $\tau_{10\text{min}}$ . Entonces para la que sí importa es YP.

Se puede hacer uso de esta arcilla utilizando agua geotérmica sin que ésta pierda función de agente viscosificante, y gelificante.

## II. INTRODUCCIÓN.

Existen diferentes clases de fluidos de perforación (FP), entre los que podemos mencionar: los fluidos a base de aceite, base agua y los fluidos neumáticos. Cada uno aplicable a una situación diferente en el proceso de perforación, según las condiciones de terreno ya que deben realizar de manera simultánea múltiples funciones, como enfriar la broca, controlar las presiones, lubricar la tubería de perforación, asegurar que el revoque se forme y evitar daños a la formación. Sin embargo, si el fluido falla en alguna de sus funciones se podrían presentar graves problemas como pérdida de circulación, daños a la formación, pega de tubería, erosión de la formación, altos valores de torque y arrastre que reducen significativamente la eficiencia de la perforación. La aparición de estos problemas es más probable en condiciones de alta presión y alta temperatura, debido a que los FP experimentan la degradación de las propiedades físico-químicas del fluido, propiciando daños a la formación. En consecuencia, han sido propuestos diversos aditivos y materiales para mitigar los problemas asociados al uso de los fluidos de perforación. (Márquez, Correa, & Espinosa, 2014). Se concluye que el fluido de perforación es tan importante en la determinación de los costos de perforación como todos los demás “controlables por el hombre”. Teniendo en cuenta estos factores, “un fluido de perforación óptimo es un fluido debidamente formulado de manera que el caudal necesario para limpiar el orificio dé como resultado la potencia hidráulica apropiada para limpiar la broca y el fondo del agujero en combinación con el peso y la velocidad de rotación, son las distintas variables, que dan como resultado un pozo estable, construido de manera que se alcance los objetivos deseados”. (Caenn, Darley, & Gray, 2011a)

Esta investigación contribuirá para determinar que las dispersiones de Atapulgita-agua geotérmica presenten los parámetros reológicos adecuados para el trabajo de perforación.

Debido a la baja disponibilidad de agua fresca en los sitios de perforación y la abundancia de agua salobre (geotérmica) se empleará ésta última como base para las suspensiones. Esto implica la existencia potencial de especies químicas interferentes en las propiedades reológicas del fluido. Para abordar la problemática se empleó una metodología con uso de aditivos, que son de alta disponibilidad y que permitieron el comportamiento reológico necesario.

### III. JUSTIFICACIÓN.

Una de las necesidades más apremiantes del mundo es la energía eléctrica. En la sociedad salvadoreña son pocas las instituciones que se encargan de generar energía por medio de técnicas renovables, una de ellas es LaGeo S.A. de C.V. (en adelante le llamaremos LaGeo), dedicada a la producción de energía eléctrica utilizando los recursos geotérmicos de nuestro país con una producción neta equivalente al 23% de la energía eléctrica que se produce en El Salvador, por lo tanto para seguir contribuyendo y aumentando este logro, es necesario que se realice el estudio de suspensiones mediante evidencias de laboratorio, que cumplan con dos condiciones. En primer lugar, que sea capaz de utilizar el agua geotérmica obtenida en abundancia de los procesos de separación de fases en la perforación de los pozos ya existentes, siendo esta agua la base del fluido de perforación sin modificar de alguna manera las propiedades reológicas del lodo. Como segundo componente la Atapulgita (Paligorskita) siendo sustituto de la Bentonita sódica (Montmorillonita sódica), en dónde la Paligorskita sea capaz de funcionar con agua geotérmica, mejorando de esta manera la eficiencia del fluido, dando lugar a un mejor desempeño en el proceso de perforación comparado con la Montmorillonita sódica, ya que la fabricación del fluido de perforación haciendo uso de la antes mencionada, no cumple las propiedades reológicas requeridas y pérdida de filtrado necesario por la salinidad del agua en el proceso. (*Murray, 2006*) y (*Clem & Doehler, 1960*); evitando de esta forma retrasos en las operaciones de perforación debido a la poca disponibilidad de agua fresca en la zona y a su vez el traslado de ésta la cual es utilizada actualmente como recurso hídrico del fluido de perforación, buscando de esta manera una reducción de costos o problemas operativos de perforación.

## IV. OBJETIVOS.

### **Objetivo general.**

Preparar dispersiones aprovechando el recurso de agua geotérmica de Berlín, Usulután, empleando como mineral base Paligorskita (Atapulgita), para zonas de excavación de escaso recurso hídrico (agua fresca).

### **Objetivos específicos.**

- Diseñar un método para el estudio de las dispersiones base agua geotérmica-Atapulgita que permita el análisis de variables y comprobación de características reológicas y filtrado.
- Realizar una matriz de dispersiones a diferentes concentraciones de aditivos y arcilla que permita identificar las variables más importantes de la formulación.
- Determinar viscosidad plástica, punto cedente, resistencia de gel (parámetros reológicos) y pérdida de filtrado para cada una de las muestras de dispersiones.
- Comparar los parámetros reológicos y pérdida de filtrado de las muestras con datos de referencia utilizados en tres etapas de perforación de pozos geotérmicos para establecer relaciones, diferencias o semejanzas.

## V. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

“El lodo de perforación (Bentonita-Agua Fresca) utilizado no es favorable por la escases de agua fresca en la zona”

### **Delimitación:**

Dada la amplitud de este tema, la formulación de dispersiones de perforación con Atapulgita se realizará exclusivamente con la muestra de agua geotérmica de dos de los pozos ya existentes en la ciudad de Berlín, departamento de Usulután, con la finalidad de proporcionar dispersiones que presenten las propiedades reológicas adecuadas para el proceso de perforación y evitar que la falta de agua fresca en las zonas donde se encuentra ubicada la planta geotérmica, sea la causa de impedimento del proceso de excavación.

## VI. MARCO TEÓRICO.

### 6.1 ESTADO DEL ARTE.

**Toka y Toka (2015)** realizaron la investigación: *Preparación de composiciones de fluidos de perforación para depósitos geotérmicos*, con la finalidad de preparar composiciones de fluidos de perforación para reservorios geotérmicos basados en alcanzar el valor mínimo requerido para la viscosidad aparente ( $\geq 15$  cp) y el valor máximo requerido para el volumen de filtrado ( $\leq 15$  mL / 30 min.). En este estudio, usaron diferentes tipos y cantidades de polímeros, bentonita y carbonato de calcio para encontrar la mejor composición de fluido de perforación para pozos geotérmicos. HV CMC (carboximetil celulosa de alta viscosidad), PAC R (polímero de celulosa polianiónica), y XCD (goma de xantano) los emplearon para aumentar la viscosidad del fluido de perforación, LV CMC (carboximetil celulosa de baja viscosidad), PAC L (polímero de celulosa polianiónica), y almidón para controlar la pérdida de fluido. En estos experimentos usaron bentonita no tratada comercialmente disponible (Na-bentonita) y carbonato de calcio fino. Midieron las propiedades reológicas del fluido de perforación con viscosímetro tipo Fann Modelo 35SA y la pérdida de filtrado fue determinada usando un filtro prensa API en condiciones de temperaturas de  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las propiedades reológicas y de filtrado de los lodos de perforación los determinaron de acuerdo con la especificación API 13AISO 13500 (2010). Se calcularon a partir de lecturas de 300 y 600 rpm utilizando las siguientes fórmulas de la especificación API para materiales de fluidos de perforación los siguientes parámetros. (Toka & Toka, 2015)

$$\text{Viscosidad plástica} = \Theta_{600} - \Theta_{300} \quad [\text{Ec. 1}] \text{Viscosidad plastica}$$

$$\text{Punto de rendimiento} = \Theta_{300} - [PV] \quad [\text{Ec. 2}] \text{Punto cedente}$$

$$\text{Viscosidad aparente} = \Theta_{600/2} \quad [\text{Ec. 3}] \text{Viscosidad aparente}$$

Además, las composiciones de lodo las dejaron envejecer a diferentes temperaturas (50, 75, 100 ° C) durante 24 horas en un horno de rodillos. Las muestras envejecidas fueron enfriadas a temperatura ambiente, luego se agitaron en un mezclador durante 5 minutos. Posteriormente, midieron las propiedades reológicas. Los resultados que obtuvieron para la composición de PAC L, XCD y bentonita mostró mejor YP (13 lb / 100 ft<sup>2</sup>) y

resistencias de gel (4-8,5 lb / 100 ft<sup>2</sup>) y el valor de YP fue mayor que el valor de PV. A pesar que diseñaron diferentes tipos de composiciones poliméricas, no cumplieron las propiedades reológicas y de filtrado requeridas. Aunque la composición antes mencionada es la que presentó propiedades favorables, pudiéndose así seleccionar para pozos geotérmicos. (Toka & Toka, 2015)

**Zhang y colaboradores (2017)**, realizaron el trabajo: *Preparación y propiedades reológicas del gel de atapulgita para suspensiones acuosas* con el objetivo de preparar un gel de atapulgita para modificador reológico de fertilizantes líquidos producidos por la fermentación anaeróbica de biogás y en fluidos de perforación de pozos petroleros. Para llevar a cabo esta investigación, realizaron una comparación de parámetros reológicos entre tres minerales: asbesto (más utilizado para estos fines, pero remplazado por ser cancerígeno), bentonita y atapulgita. Además, utilizaron aditivos como: CPAM (poliacrilamida catiónica), PAA-Na (poliacrilato de sodio), FDN (alfa naftol sulfanato de sodio), STPP (tripolifosfato de sodio), SPP (pirofosfato de sodio), SHMP (hexametfosfato de sodio) y CATB (bromuro de hexadecil-trimetil-amonio), cada uno a diferentes concentraciones los fueron agregando a dispersiones de atapulgita que se encontraban a una concentración de 6.4% en peso. Estas dispersiones las agitaron mecánicamente (8000 rpm) durante 20 minutos a temperatura ambiente y la hidratación la llevaron a cabo durante 24 horas (tiempo de reacción). Los equipos que utilizaron fueron: agitador de alta velocidad, pantalla digital Gy-2S, viscosímetro rotativo de 6 velocidades (3, 6, 100, 200, 300, 600 rpm, ZNN-D6) para medir reología y un filtro prensa (ZNS-2A). Con cada muestra los siguientes parámetros fueron determinados: VA, VP, YP,  $\tau_{10seg.}$ ,  $\tau_{10min.}$  y pérdida de filtrado. A partir de esto obtuvieron que los valores bajos de PV ilustraron que las partículas de atapulgita no están bien dispersas y que YP alto indica sobre-floculación por lo que ellos confirmaron que para la aplicación en campo el gel de asbesto tiene mejor capacidad de transporte de recortes, evita el bloqueo de la bomba y la presión de sobrecarga, mientras que la bentonita posee baja dispersión, suspensión no efectiva y baja eliminación de recortes, además turbulencia, bloqueo de la bomba y presión de sobretensión (estos análisis los hicieron sin agregar ningún tipo de aditivos a estos minerales). Posteriormente a la atapulgita le agregaron los aditivos antes mencionados Obteniéndose una disminución mayor en la pérdida de filtrado con el FDN, el óxido de magnesio mostro una gran contribución a la viscosidad

aparente y plástica, el PAA-Na ayudo al comportamiento reológico y el CPAM fue efectivo en la resistencia de gel. De acuerdo a las condiciones optimizadas de estas cuatro sustancias químicas diseñaron la prueba ortogonal cuyas condiciones fueron 3.5 % de MgO, 0.75 % de PAA-Na, 0.5 % de FDN y 0.05 % de CPAM esto produjo una atapulgita modificada (muestra 8). Los análisis experimentales revelaron que esta muestra presentaba parámetros reológicos similares a los del asbesto por lo tanto esta muestra podría sustituir al asbesto como un modificador reológico. (*Zhang et al., 2017*)

Estas investigaciones se relacionan con la que llevamos a cabo al realizar una serie de muestras con aditivos y arcilla (atapulgita), determinando los parámetros reológicos, perdida de filtrado y tamaño de revoque para obtener composiciones de suspensiones para perforación que puedan ser utilizadas en pozos geotérmicos según los mejores datos obtenidos y comparados con los de bentonita. Dichos parámetros dependen de la etapa de perforación, por tanto, se manejó un rango de trabajo para el fluido. También estos datos se interpretaron según un modelo estadístico. Además, estos estudios muestran que lo mejor es dejar envejecer las muestras para su total integración, caso contrario a lo que se realizó debido a que La Geo no tarda más de 2 horas para emplear el fluido después de haberse elaborado.

## **6.2 FLUIDOS DE PERFORACIÓN.**

Uno de los componentes más importantes en el proceso de perforación son los fluidos o lodos de perforación que son todas aquellas sustancias que circulan a través de un pozo para eliminar los recortes y por las cuales se evalúa el éxito en el proceso de perforación. (*Amoco Production Company., 1994*)

Los diferentes suelos a los que se expone el lodo dificultan su funcionamiento, por ello cada uno de los fluidos debe poseer características químicas y físicas específicas que le permitan adecuarse a cada una de las situaciones (*Correía, Godoy, García, & Vega, 2015*) , logrando de esta manera solucionar problemas durante el proceso de perforación.

De forma breve el proceso de perforación se describe de la siguiente manera: el lodo de perforación es bombeado por una tubería de perforación hueca dirigida hacia la broca, donde sale de la tubería y luego se vacía de nuevo por la perforación hasta la superficie. Posteriormente el lodo filtrado y depositado en un reservorio donde se extraen muestras para los respectivos análisis. (Figura 1). (Petruzzello, Rafferty, Bauer, & Duignan, 1994)

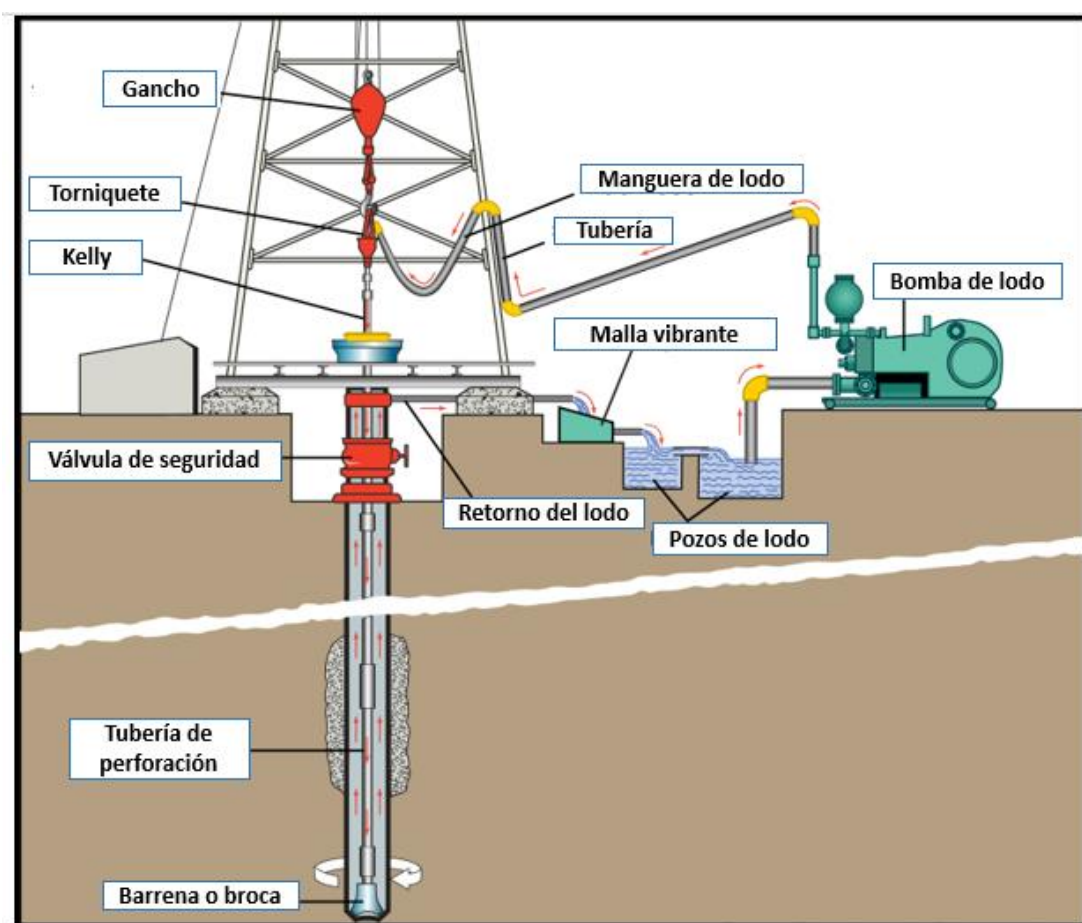


Figura 1. Proceso de perforación de suelos. (Petruzzello, Rafferty, Bauer, & Duignan, 1994)

### 6.2.1 Clasificación de los Fluidos de Perforación.

Los fluidos de perforación se clasifican para la industria petrolera de acuerdo con la figura 2. Base agua, aceite y gas son los tres tipos de fluidos más utilizados en la industria petrolera, entre ellas la más utilizada son los fluidos base agua por su bajo costo. Entre los fluidos base agua tenemos los inhibidores, no inhibidores y poliméricos que su principal diferencia radica en los inhibidores que obstaculizan el hinchamiento

de la arcilla comparados a los no inhibidores que pueden facilitar dicho hinchamiento. (Amoco Production Company., 1994)

Los poliméricos pueden clasificarse como no dispersantes o defloculante a alta temperatura difiriendo entre si el tamaño de la molécula. (Amoco Production Company., 1994)

Los fluidos base aceite son uno de los procesos más costosos debido a los diferentes materiales que se utilizan; entre ellos están: los que utilizan diésel, minerales o hidrocarburos no derivados del petrolero, es decir sintéticos. Y por último están los fluidos base neumático que pueden ser con gas seco, neblina, espuma o lodo gasificado. En la figura 2 se muestra la clasificación de los fluidos de perforación. (Amoco Production Company., 1994)

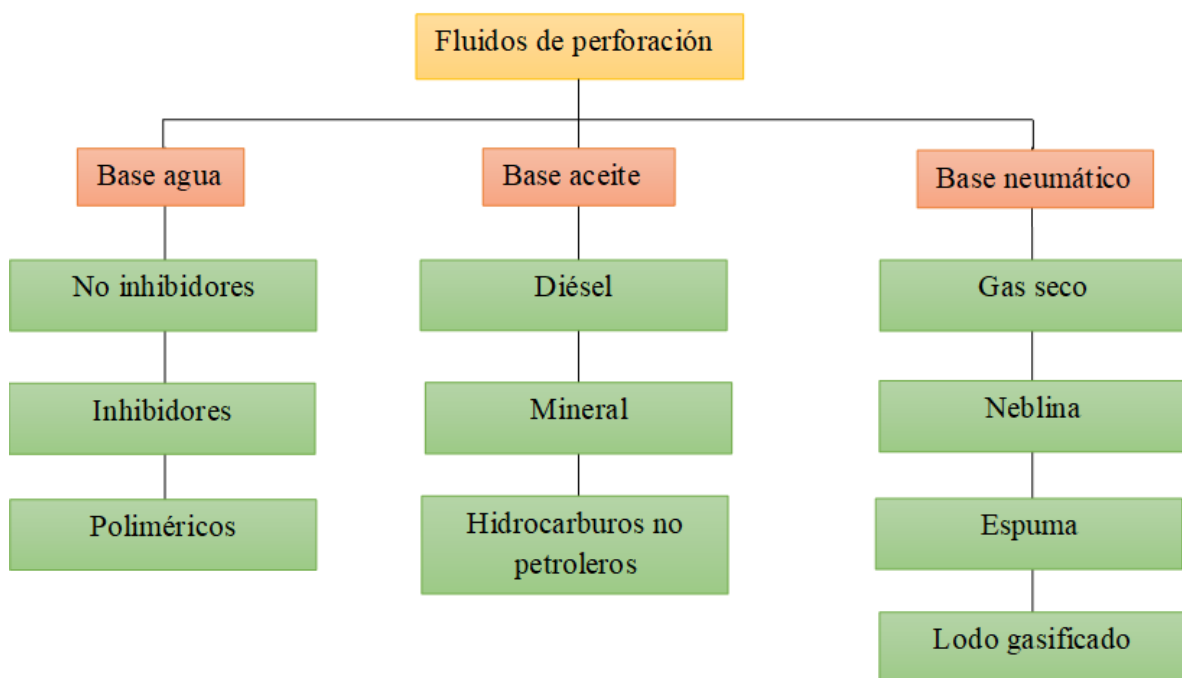


Figura 2. Esquema de clasificación de los fluidos de perforación. (Amoco Production Company., 1994)

### 6.2.1.1 Lodos Base agua.

Regularmente los fluidos que son base agua son los más utilizados en los procesos de perforación, debido a que, son mucho más económicos comparándolos con los bases aceite o neumáticos. Otra ventaja es su formulación, ya que es más sencillo de preparar y ayuda en gran medida a superar la mayoría de los problemas presentes en la perforación (*Amoco Production Company., 1994*). Estos pueden clasificarse en tres categorías que se muestran en la figura 3.

No inhibidores: Son aquellos que facilitan el hinchamiento de la arcilla y favorece la dispersión de los sólidos en todo el sistema. Este tipo de fluidos no permite que las propiedades reológicas del mismo sean alteradas por diluciones. (*Amoco Production Company., 1994*)

Inhibidores: Son aquellos que retrasan o detienen el hinchamiento o la hidratación de las arcillas en presencia de cationes como:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{K}^{+}$ . (*Amoco Production Company., 1994*)

Poliméricos: Estos pueden ser no dispersantes o defloculante a alta temperatura, pero difieren en su tamaño de partícula, ya que estos se basan en macromoléculas que pueden tener alguna interacción con la arcilla o no, esto dependerá principalmente de la presencia de algún catión. (*Amoco Production Company., 1994*)

### 6.2.1.2 . Lodos Base aceite.

Estos lodos son usados principalmente cuando los agujeros contienen un alto grado de lubricidad y habilidad para evitar la hidratación de las arcillas, además su uso es apropiado para pozos con temperaturas y presiones elevadas. Estos fluidos tienen la ventaja de poder eliminar Lutitas (Esquistos) problemáticas y son altamente resistentes a contaminantes como la Anhidrita y algunos gases como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . (*Amoco Production Company., 1994*)

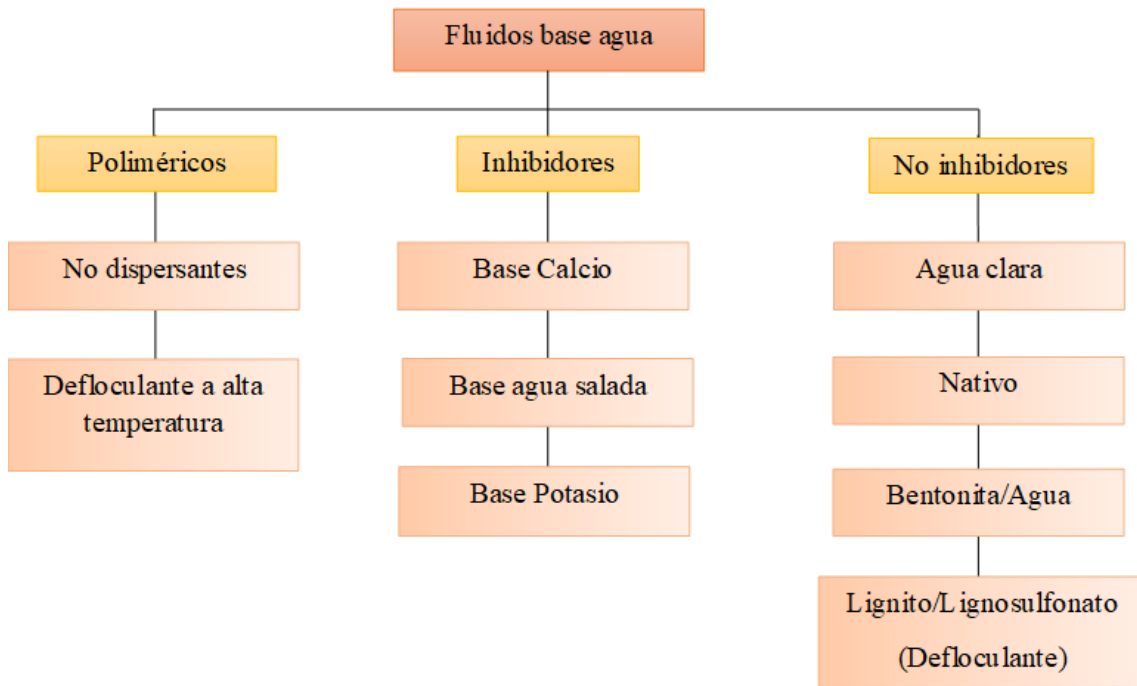


Figura 3. Esquema de Fluidos base agua. (Amoco Production Company., 1994)

#### 6.2.1.3 Lodos Neumáticos.

Son aquellos que están hechos base aire, gas y otros (figura 4). Principalmente son utilizados en las zonas donde la pérdida de circulación es extrema y las presiones de formación son anormalmente bajas. (Amoco Production Company., 1994)

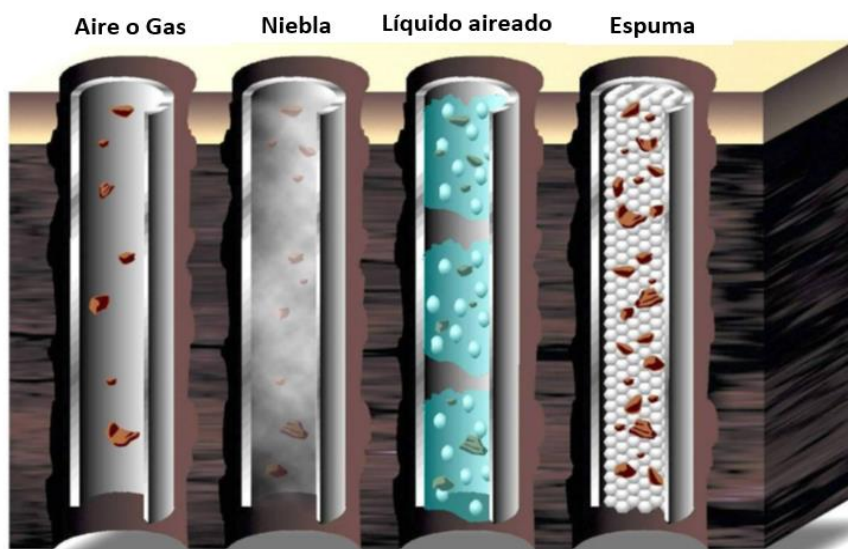


Figura 4. Clasificación de los fluidos base neumáticos. (Prasetia, Salazar, & Toralde, 2010)

Los principales tipos de fluidos de perforación en la geotermia son: los lodos a base de agua (bentonita y polímeros), aquellos que únicamente se hace uso de agua y aquellos a base de aire - espuma. La industria de perforación geotérmica ha progresado desde la industria de perforación de petróleo y gas, por lo tanto, gran parte de los equipos y materiales provienen de ella. (*Amoco Production Company., 1994*)

Los fluidos de la industria geotérmica son similares a los de la industria petrolera, pero no se deben tratar con aditivos químicos en la misma medida, porque la mayoría de perforaciones geotérmicas se realizan en roca dura y no hay problemas de sobrepresión. También por el calor que el fluido de perforación recoge en el orificio, se requiere una torre de enfriamiento para evitar que el lodo se caliente demasiado y corra el riesgo de perder sus propiedades. (*Chemwotei, 2011*)

## 6.2.2 Propiedades de los Fluidos de Perforación.

Un fluido de perforación debe ser estable bajo condiciones normales de temperatura y presión, debido a los diferentes sistemas que enfrenta el fluido, las propiedades deben ser sumamente controladas con diversos aditivos y la arcilla como tal para disminuir la inestabilidad del pozo. (*De la O, 2012*)

### 6.2.2.1 Densidad.

La densidad está definida como masa por unidad de volumen ( $\text{g/cm}^3$ ), en el caso de los fluidos de perforación la densidad se define como la capacidad que tiene el fluido para ejercer una contrapresión en las paredes de los pozos, controlando así la presión del pozo ya perforado, debido a que la densidad está obligada a cumplir con los requisitos de presión del pozo; siendo como función principal mantener en su lugar los fluidos de formación. Generalmente el rango aceptable en la densidad para un lodo varía entre 1.03 a 1.15  $\text{gr/cm}^3$ . (*De la O, 2012*)

### 6.2.2.2 Reología.

Es la ciencia que se dedica al estudio del comportamiento del flujo y la deformación de

la materia. Para que un fluido pueda cumplir con las funciones requeridas en el proceso de perforación se debe tener un control exhaustivo de las propiedades reológicas de los fluidos, las cuales se presentan en la Tabla 1. (De la O, 2012)

**Tabla 1. Propiedades reológicas de los fluidos de perforación.** (Pérez, 2011)

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
<b>Viscosidad Aparente (VA)</b>	<p>Esta propiedad permite examinar el comportamiento de la viscosidad al momento que se adiciona al lodo algún tipo de aditivo ya sea líquido o sólido.</p> <p>El valor de la viscosidad se puede calcular según la siguiente ecuación:</p> $VA = \frac{L_{600}}{2} \quad [Ec. 4] \textit{ Viscosidad aparente}$ <p><b>Donde:</b>  <b>VA:</b> Viscosidad Aparente (cP)  <b>L<sub>600</sub>:</b> Lectura a 600 rpm en el Reómetro API</p>
<b>Viscosidad Plástica (VP)</b>	<p>Esta propiedad está definida principalmente por la resistencia al flujo, por las fricciones mecánicas entre los sólidos que se encuentran suspendidos en el lodo. Esta propiedad está regida principalmente por la cantidad y tamaño de los sólidos presentes. Es un aspecto sumamente importante ya que ayuda a obtener altas tasas de penetración.</p> <p>Se puede calcular según la siguiente ecuación:</p> $VP = L_{600} - L_{300} \quad [Ec. 5] \textit{ Viscosidad Plástica}$ <p><b>Donde:</b>  <b>VP:</b> Viscosidad Plástica (cP)  <b>L<sub>300</sub>:</b> Lectura a 300 rpm en el Reómetro  <b>L<sub>600</sub>:</b> Lectura a 600 rpm en el Reómetro</p>
<b>Punto Cedente (YP)</b>	<p>Se define por la resistencia al flujo que proviene de las fuerzas electroquímicas. Todas aquellas fuerzas de atracción entre las partículas sometidas a condiciones de flujo son medidas por el Punto Cedente, de esta manera mantiene la fuerza necesaria del fluido ya iniciada la perforación.</p> <p>El punto cedente se encuentra estrechamente relacionado con la capacidad de limpieza que posee un fluido a condiciones de flujo. El valor del Punto Cedente</p>

	<p>puede obtener mediante la siguiente ecuación:</p> $YP = L_{300} - VP \quad [ Ec. 6] \textit{ Punto Cedente}$ <p><b>Donde:</b>  <b>YP:</b> Punto Cedente (lb/100pie<sup>2</sup>)  <b>VP:</b> Viscosidad Plástica  <b>L<sub>300</sub>:</b> Lectura a 300 rpm en el Reómetro</p>
<p><b>Resistencia de gel (τ)</b></p>	<p>Es una propiedad definida por la medida de la habilidad del lodo para desarrollar una consistencia de gel cuando se ha sometido a reposo. Es desarrollada por todas aquellas fuerzas de atracción que determinan el YP a diferencia que esta es en condiciones estáticas.</p> <p>La resistencia gel (lb/pie<sup>2</sup>) idealmente deberá ser lo precisamente baja como para permitir el asentamiento de los sólidos en el tanque de la superficie, una adecuada velocidad de circulación entre otras.</p>

### 6.2.2.3 Ley de viscosidad de Newton.

Isaac Newton, fue reconocido por sus descubrimientos y aportes a la ciencia a lo largo de su vida. Newton hizo un trabajo innovador con los fluidos, él describió el comportamiento de algunos fluidos como el agua, en donde el movimiento de las moléculas de las que está constituida tiene una relación directamente proporcional a la fuerza que se aplica sobre esta misma. (Chhabra, 2010)

La diferencia entre un fluido y un sólido es el comportamiento de estos cuando son sometidos a una fuerza, esta fuerza que es aplicada se denomina: Fuerza cortante. (Caenn, Darley, & Gray, 2011c)

Una de las propiedades más importantes de un fluido es la viscosidad que se refleja cuando un fluido está en movimiento, ya que esta se define como la resistencia de un fluido a fluir. (Caenn, Darley, & Gray, 2011c)

#### 6.2.2.3.1 Fluidos Newtonianos

Los fluidos newtonianos se caracterizan porque la viscosidad permanece constante en el tiempo a pesar de los cambios que pueda experimentar el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación donde su relación es lineal. Esto no significa que la viscosidad no pueda sufrir variaciones en su valor, sino que la viscosidad suele cambiar o depender de otros factores como la composición del fluido, la temperatura o la presión a la que esté sometido el fluido. (Chhabra, 2010) (Caenn, Darley, & Gray, 2011c)

#### 6.2.2.3.2 Fluidos no Newtonianos

Los fluidos no newtonianos son todos en los que la relación del esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no son constantes, es decir que la viscosidad tampoco es constante. Los fluidos no newtonianos, no cumplen con la ley de viscosidad de Newton. Estos fluidos se caracterizan de una mejor manera por medio de propiedades en donde existe una relación entre el esfuerzo cortante y tensores de esfuerzo que se refiere a la agitación o presión al que es sometido. (Chhabra, 2010) (Caenn, Darley, & Gray, 2011c)

Los fluidos no newtonianos pueden clasificarse como dependientes a la velocidad de deformación o independientes a esta: (Chhabra, 2010) (Caenn, Darley, & Gray, 2011c)

- a. Dependientes a la velocidad de deformación: son todos aquellos en donde el esfuerzo cortante dependerá únicamente de la velocidad de deformación.
- b. Independientes a la velocidad de deformación: fluidos donde la viscosidad aparente se reduce con el gradiente del esfuerzo cortante.

#### 6.2.2.4 Pérdida de Filtrado

Es un parámetro que indica la cantidad de líquido que se ha perdido y por ende se ha filtrado por las paredes del pozo a través del revoque mayoritariamente en todas aquellas zonas permeables y sobre todo cuando este se somete a presiones altas. Existe

una diversidad de factores que afectan este parámetro, pero entre los más contribuyentes esta: Presión, dispersión, temperatura y el tiempo. (Arias, 2015)

#### *6.2.2.5 Alcalinidad.*

Este parámetro puede determinar la cantidad de Cal en los lodos que han sido tratados con Cal, los lodos comúnmente son titulados para poder identificar cuanto de la Cal presente es soluble e insoluble en el sistema. La cantidad de Cal que ha quedado sin disolver se calcula restando la cantidad de Cal en la solución a la cantidad de Cal presente en el sistema. (Caenn, Darley, & Gray, 2011a)

#### *6.2.2.6 pH del Lodo.*

Este parámetro permite la medida en el grado de acidez. La escala del pH va de 0 a 14. Los valores menores a 7 corresponden a un pH ácido, si están por encima de 7 son básicos y si el valor es 7 es neutro. Cuando se trata del pH de un lodo de perforación este debe poseer niveles altos en el pH con un rango de entre 7.5 a 11.5. (Caenn, Darley, & Gray, 2011a)

#### *6.2.2.7 Lubricidad.*

La lubricidad es uno de los parámetros más importantes al momento de perforar un pozo y es toda disminución de la resistencia a la fricción de la sarta a la rotación y al movimiento vertical del pozo (torque y arrastre) aumentando de esta manera el tiempo de utilidad del equipo para perforar. La fricción puede producirse entre la sarta y el revestimiento o ya sea por las paredes del hueco. (Bautista, 2006)

### **6.2.3 Propiedades fisicoquímicas de los fluidos de perforación.**

#### *6.2.3.1 Transporte y suspensión de cortes generados durante la perforación.*

En las operaciones de perforación, gran parte del suministro es consumido en el proceso de circulación del fluido de perforación. Esta función permite desplazar los fragmentos o también conocidos como recortes o cuttings, de las rocas que han sido generados por

la barrena hasta la superficie (figura 5). (Caenn, Darley, & Gray, 2011a) y (Chemwotei, 2011)

Mantener la capacidad del fluido para transportar todos los sólidos producidos hasta la superficie es una función clave para la eficiencia en el proceso de perforación y la minimización del potencial para el atascamiento de la tubería. Las propiedades que interfieren en gran magnitud para el arrastre de los recortes formados son: Densidad y fuerza de gel del fluido de perforación. (Caenn, Darley, & Gray, 2011a) y (Chemwotei, 2011)

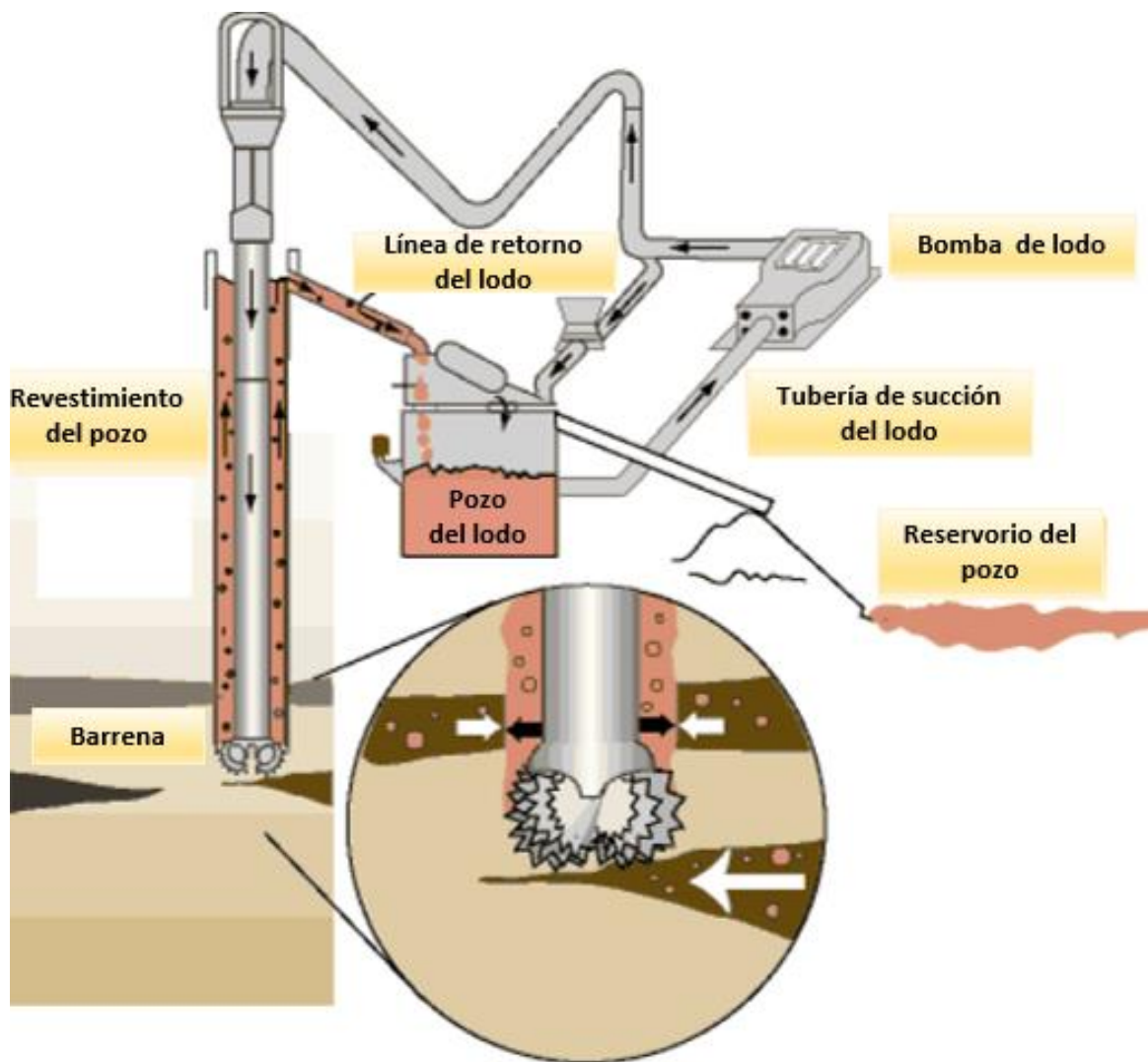


Figura 5. Transporte de recortes en la perforación. («Drilling through direct circulation.», 2000)

#### *6.2.3.2 Control de presiones del subsuelo.*

Un componente clave para controlar un pozo es el fluido de perforación. En el proceso de perforación mientras más aumenta la profundidad las presiones de formaciones son mucho más altas por la sobrecarga. (Chemwotei, 2011)

Para poder compensar los incrementos de la presión de formación en el pozo se utiliza la presión hidrostática ejercida por la columna ya que de lo contrario permitirán el ingreso de los fluidos de formación en el pozo lo que producirá probablemente un descontrol total del pozo. No obstante, la presión ejercida por el fluido de perforación no debe sobrepasar la presión de fractura de la roca propiamente dicha, de lo contrario, el lodo circulará hacia la formación, circunstancia conocida como: pérdida de circulación. (Caenn, Darley, & Gray, 2011a)

#### *6.2.3.3 Lubricidad y enfriamiento de la broca y sarta de perforación.*

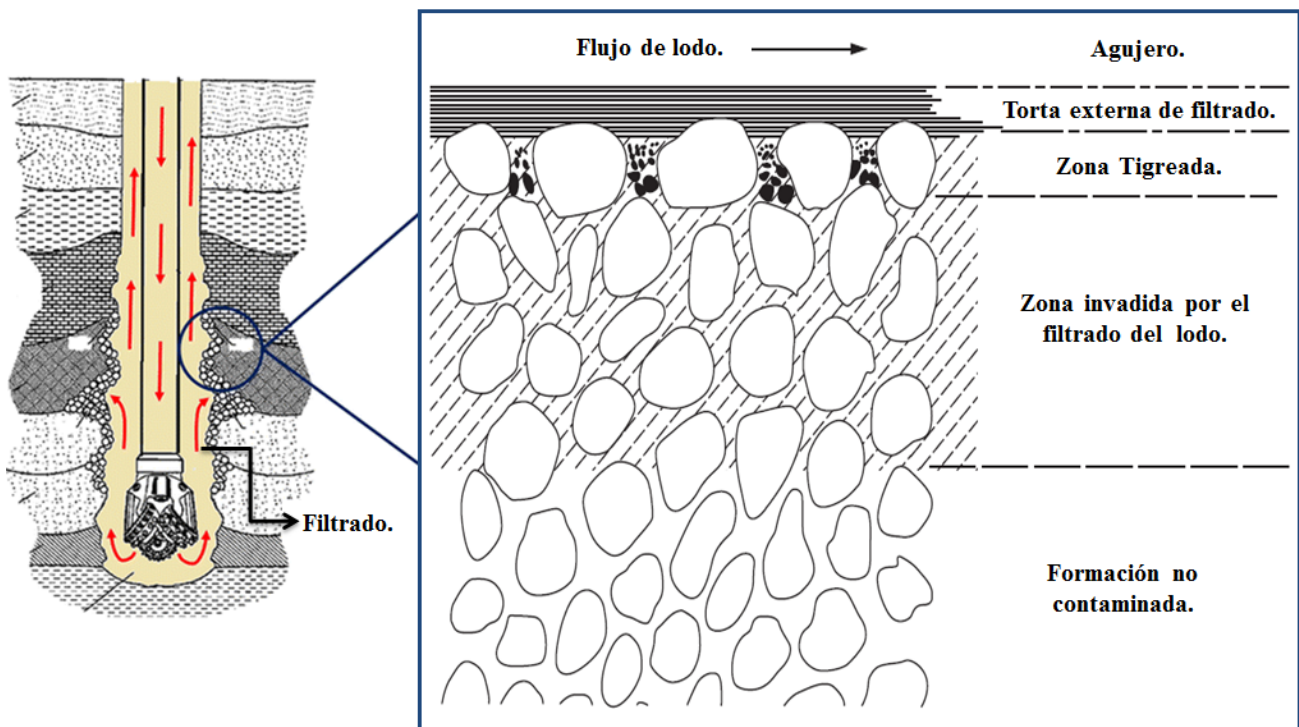
Al momento de la perforación, la sarta y la broca de perforación son sometidas a una fricción y abrasión contra las paredes y el fondo del pozo, factores que pueden disminuirse si se forma una capa delgada alrededor de las paredes del hueco ayudando de esta manera el tiempo de operatividad de la sarta y la broca. (Chemwotei, 2011)

Por otra parte, el rozamiento de la sarta contra las paredes hace que se produzca un calor excesivo el cual es absorbido y disipado por el lodo durante la circulación. Es por esto, que mediante el lodo fluye a través y alrededor del arreglo de perforación rotativo, favorece el enfriamiento y la lubricidad de la barrena. La energía térmica es transferida al fluido de perforación el cual lo transfiere hasta la superficie. (Chemwotei, 2011)

#### *6.2.3.4 Revestimiento de las paredes del pozo.*

Durante el proceso de perforación algunas formaciones favorecen la inestabilidad, provocando derrumbes que producen muchos problemas en el proceso de perforación y son los fluidos los que ayudan a prevenir el colapso y la erosión de las paredes del pozo. A medida éste va siendo perforado el pozo va siendo invadido en todas aquellas formaciones permeables, en este momento, las partículas sólidas del lodo quedan

suspendidas en la pared del pozo y estas se acumulan cubriendo la pared con una delgada capa impermeable de torta del lodo que se afirma e impide que siga generando pérdida de filtrado (figura 6). (Caenn, Darley, & Gray, 2011b) y (Chemwotei, 2011)



**Figura 6. Revestimiento de la pared del pozo.** (Caenn, Darley, & Gray, 2011b) y (Saboori, Sabbaghi, Kalantariasl, & Mowla, 2018)

#### 6.2.3.5 Suspensión de la sarta y el revestimiento.

Mientras el proceso de perforación avanza y el pozo se hace cada vez más profundo la sarta se va volviendo más pesada, peso que debe ser soportado por la broca. Gracias al fluido de perforación, la sarta se ve afectada por un efecto de flotación, lo que permite una disminución en el peso, para que este pueda ser más fácilmente soportado por la broca. (Caenn, Darley, & Gray, 2011b)

#### 6.2.3.6 Interpretación de registros eléctricos.

Un aspecto importante a considerar son las propiedades fisicoquímicas de la formación y sus fluidos corriendo registros eléctricos, siendo de vital importancia que la conductividad del lodo sea diferente a la de todos aquellos fluidos posiblemente

presentes en la formación y evitar cualquier erosión química o física en las paredes del pozo. (Bautista, 2006)

#### *6.2.3.7 Transmisión de energía hidráulica a la sarta y broca.*

La bomba que se encuentra en la superficie genera una energía hidráulica la cual es transmitida por el fluido de perforación a la broca; esta energía liberada contra la formación suaviza y eleva los recortes lejos de la formación. La velocidad de circulación debe ser tal que la energía óptima sea usada para limpiar la superficie que está siendo perforada. (Caenn, Darley, & Gray, 2011a)

### 6.2.4 Generalidades del campo geotérmico en Berlín.

#### *6.2.4.1 Ubicación geográfica.*

La Central Geotérmica Berlín ubicada a 106 km al oriente de la ciudad capital, en el sector norte del complejo volcánico de Tecapa, en el Cantón el Zapotillo del Municipio de Alegría a 5 km de la Ciudad de Berlín en el Departamento de Usulután (figura 7). El área del campo geotérmico posee una extensión aproximadamente de 8 km<sup>2</sup>. («LaGeo - Energía Geotérmica en El salvador, centrales.», 1999)

Las fuentes termales, fumarolas y otras manifestaciones de actividad hidrotermal se presentan a lo largo de la cadena volcánica, especialmente al oeste (e.g. Campos Geotérmicos de Ahuchapán y Chipilapa) y al este (e.g. Campos Geotérmicos de San Vicente y Berlín) del país. (Gutiérrez, 2008)

#### *6.2.4.2 Ubicación geográfica.*

La actividad volcánica en el área de Berlín inició alrededor de 1.4 millones de años con la formación del volcán de Berlín. Los productos volcánicos más recientes pertenecen al complejo volcánico cuaternario Tecapa, con una erupción reciente de hace 700 años. La cámara magmática de este complejo volcánico es considerada la fuente de calor del sistema geotérmico. (Gutiérrez, 2008)



Figura 7. Departamento de Usulután con ubicación de la central Geotérmica. *Modificada de la fuente (Artiga & Mata, 2004)*

La exploración geotérmica en Berlín comenzó en la década de 1960 por las Naciones Unidas, el Gobierno de El Salvador y la empresa eléctrica nacional, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL). Durante la exploración, se perforaron seis pozos a profundidades entre 1,400 y 2,300 m. Sin embargo, el desarrollo del sitio de Berlín se detuvo pronto, a pesar de encontrar temperaturas de hasta 230 ° C, debido a la baja permeabilidad. *(Guidos & Burgos, 2011)*

A principios de la década de 1970, el enfoque se trasladó a Ahuachapán, que en ese momento demostró ser más explotable comercialmente. A fines de los años setenta y principios de los ochenta, se perforaron cinco pozos exploratorios más a profundidades entre 2.000 y 2.380 m. *(Guidos & Burgos, 2011)*

Todos los pozos demostraron ser productivos, con temperaturas de 300 ° C y un potencial estimado de 5 a 11MW cada uno. Sin embargo, el conflicto civil de El Salvador que abarcó el resto de la década de 1980, aunado a la crisis financiera general que enfrentó América Latina durante ese tiempo, interrumpió todos los nuevos proyectos de energía de la CEL. *(Guidos & Burgos, 2011)*

La generación de electricidad del campo geotérmico de Berlín comenzó en 1992 lo que permitió que, en los años siguientes, se llevaran a cabo extensos trabajos de exploración profunda y de superficie en el área de Berlín con el objetivo de caracterizar el recurso y aumentar la producción. *(Guidos & Burgos, 2011)*.

Cada uno de los avances antes mencionados se detalla de forma breve en la figura 8.

En la figura 9 se muestran fotos de partes de la infraestructura del campo geotérmico de Berlín hasta la fecha.

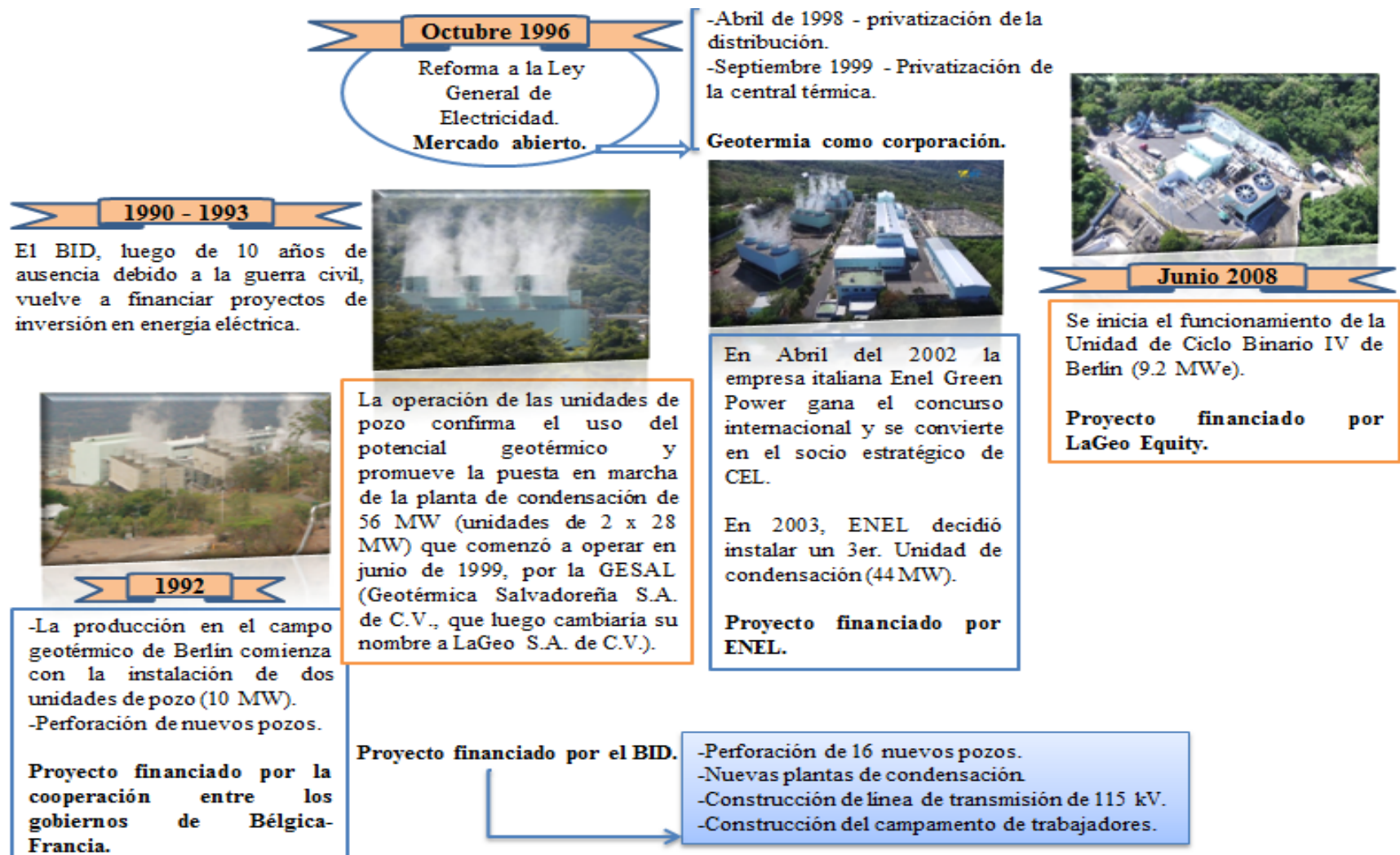


Figura 8. Historia del desarrollo geotérmico de El Salvador, campo geotérmico de Berlin. (Guidos & Burgos, 2011)



**Figura 9.** Fotos del Campo Geotérmico de Berlín («LaGeo - Energía Geotérmica en El Salvador, centrales.», 1999)

#### 6.2.4.3 Geología del campo.

El campo geotérmico de Berlín se desarrolla en la falda noroeste del grupo volcánico del mismo nombre. Está directamente asociado con la actividad volcánica de edad reciente, que tuvo lugar dentro de la caldera del primitivo volcán. La fase final de esta actividad está representada principalmente por los conos volcánicos Tecapa y El Hoyón, en cuyos cráteres aún se observa actividad fumarólica. (*Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 1978*)

La presencia de algunas fumarolas (figura 10) ha señalado la actividad volcánica presente en la zona, como también las zonas de alteración hidrotermal, suelos humeantes, fuentes termales que se localizan en dicho campo. (*Artiga & Mata, 2004*) Las manifestaciones termales superficiales (manantiales termales, fumarolas, pozas de barro, emisión de gases en suelo, etc.) son la prueba visual del calor en el interior de la tierra. (*Gutiérrez, 2008*). El campo geotérmico de Berlín está controlado por un sistema de fallas de tendencia noroeste-sureste (Figura 10 y 11). (*Artiga & Mata, 2004*)

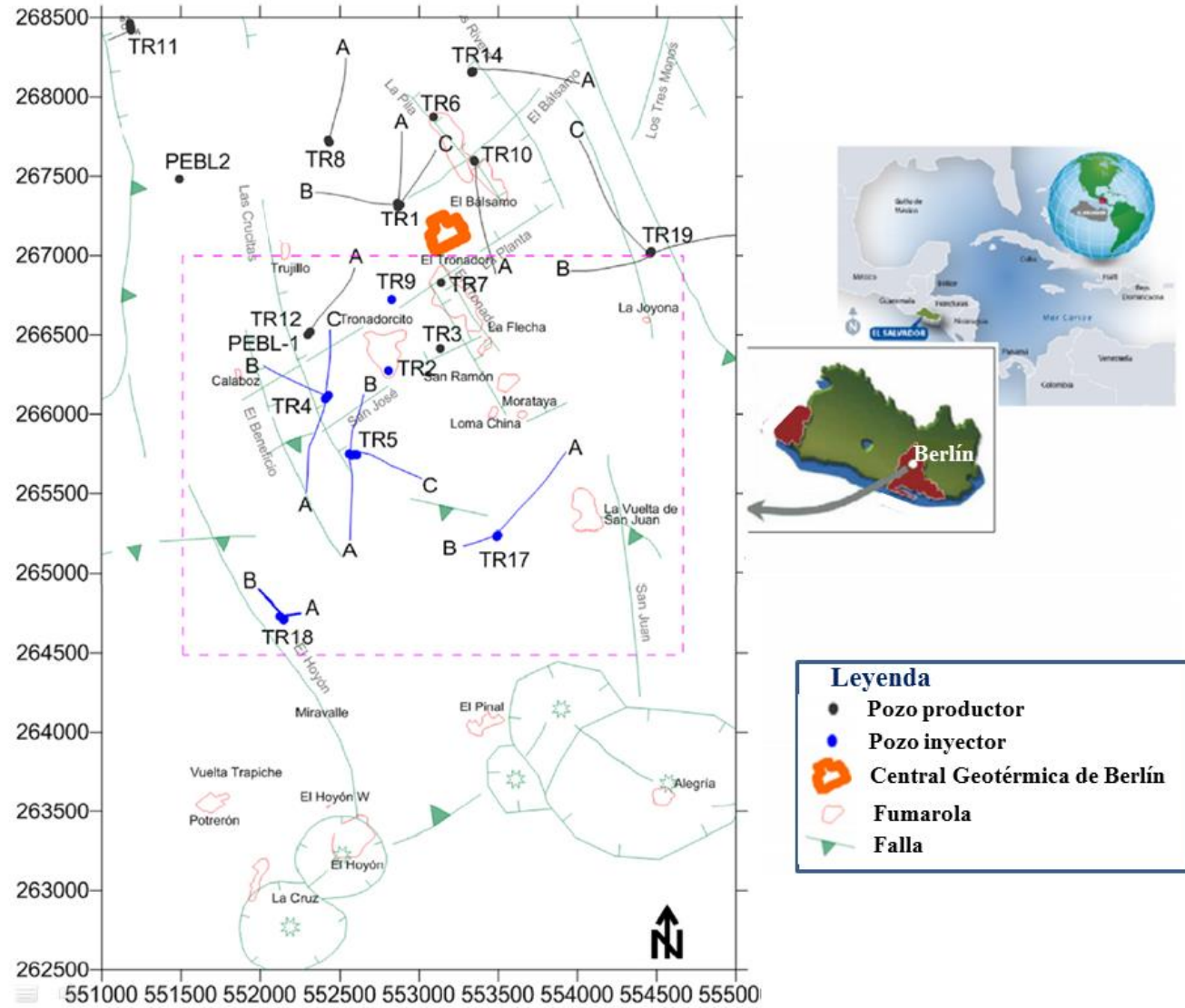


Figura 10. Campo geotérmico de Berlín: el rectángulo rosa muestra la referencia espacial para los mapas de distribución a escala del campo. (Ayala, 2014)

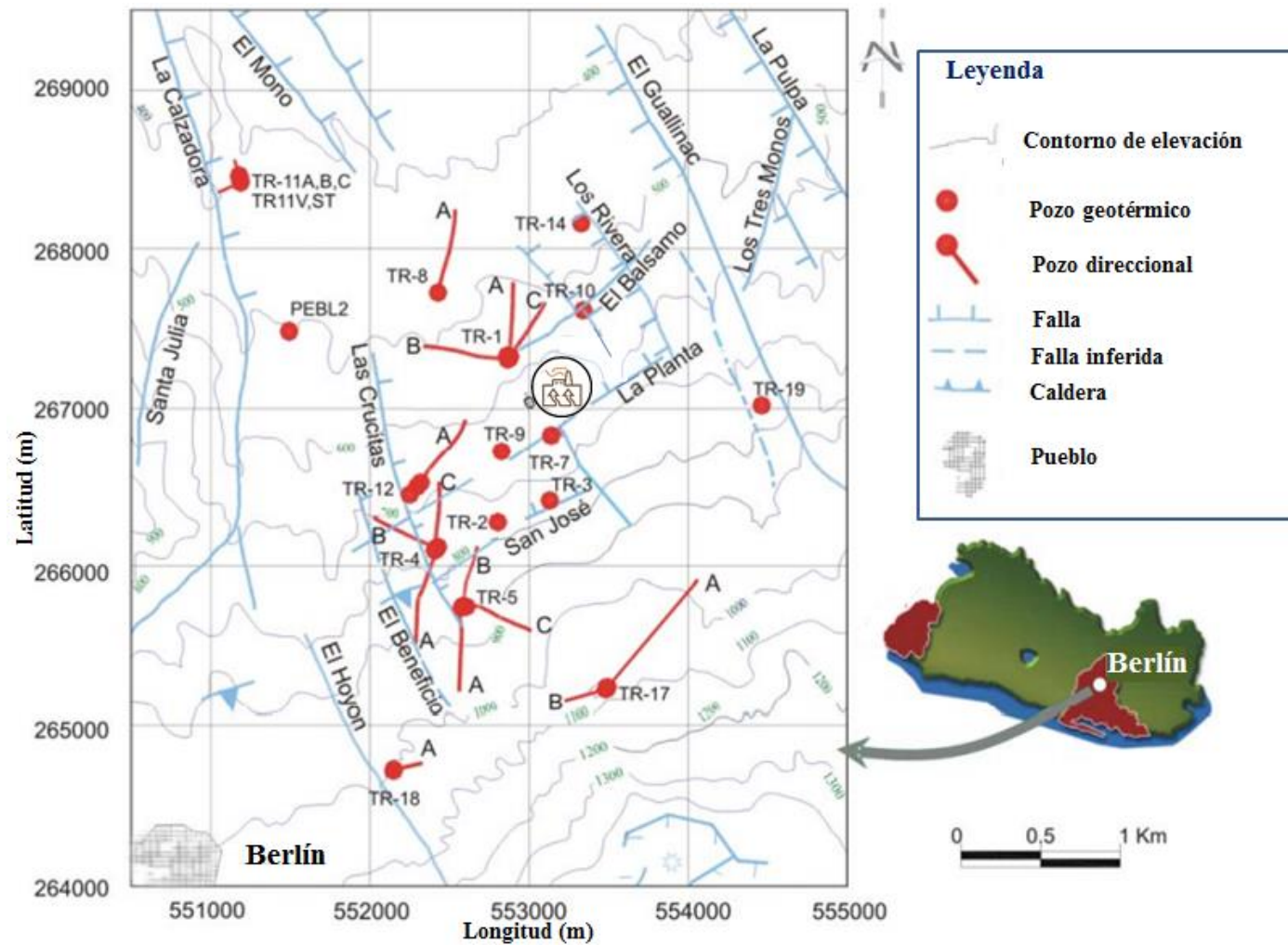


Figura 11. Campo Geotérmico de Berlín. (Rodríguez, 2005)

El sistema de fallas ya mencionado favorecen la formación de la fosa tectónica (graben), (figura 12)

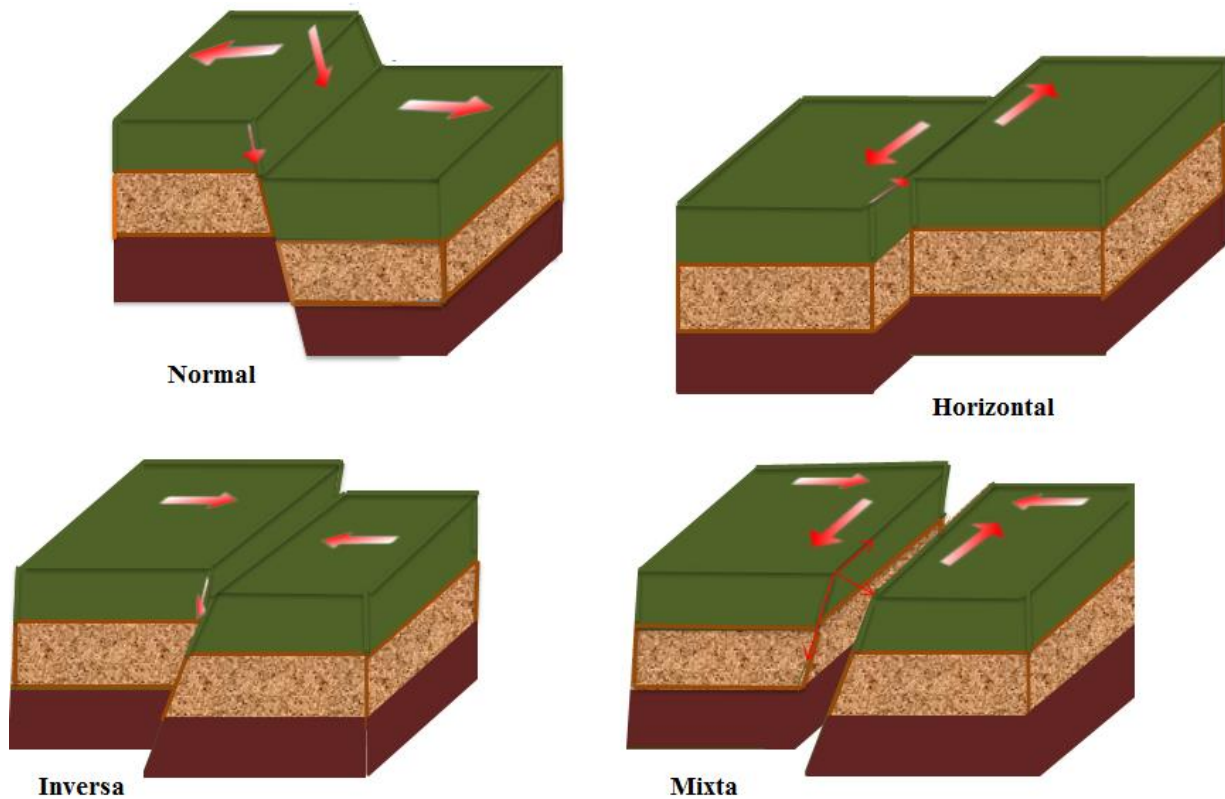


Figura 12. Fosa tectónica o graben. (Richardson, 2018). En donde las flechas indican el desplazamiento en relación a la otra.

## 6.3 QUIMICA DE LAS ARCILLAS.

### 6.3.1 Definiciones.

Las arcillas son fruto de los agentes de meteorización físico-químicos actuantes sobre la roca madre original y se las puede considerar como unas acumulaciones naturales, consolidadas o no, de tamaño de grano fino ( $< 1 \mu\text{m}$  según los químicos que estudian los coloides,  $< 2 \mu\text{m}$  según los mineralogistas e investigadores del suelo, y  $< 4 \mu\text{m}$ , según los sedimentólogos) y constituidas por variados minerales arcillosos (silicatos aluminicos hidratados, con iones principalmente de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{K}^{1+}$  y  $\text{Na}^{1+}$ ) y otros minerales acompañantes como el cuarzo, los feldespatos, los carbonatos, etc. Además, salvo excepciones, poseen un comportamiento físico muy peculiar frente al agua cual es la plasticidad, e incluso endurecen cuando son

secadas o sometidas a tratamientos térmicos a alta temperatura. (Díaz Rodríguez & Torrecillas, 2002)

*“Químicamente, los minerales arcillosos están constituidos por láminas de tetraedros de silicio [SiO<sub>4</sub>] y de octaedros de aluminio [AlO<sub>6</sub>]. La combinación de estas láminas forma los diferentes tipos de estructuras arcillosas que a su vez dan origen a paquetes de capas y que al combinarse conforman una placa de mineral arcilloso visible” de acuerdo con García Romero, E y Suárez Barrios. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)*

### 6.3.2 Origen de las arcillas.

Los minerales de la arcilla son excelentes indicadores de la evolución climática ya que sus campos de estabilidad están controlados por la actividad iónica, pH, y como consecuencia, su génesis está condicionada por factores climáticos (*humedad-lavado y temperatura*). (Romero, 2004)

El principio de las arcillas comprende dos importantes factores: la presencia de rocas ígneas y alteraciones hidrotermales, es decir, la reacción química de interacción agua-roca en la litósfera terrestre. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)

Las bentonitas se forman como resultado de la alteración del vidrio volcánico por una fase fluida, por lo que se forman en ambientes acuosos, generalmente en mares poco profundos o lagos. Los depósitos de bentonita pueden formarse mediante cualquiera de los siguientes tres mecanismos(Christidis & Huff, 2009):

**1. Alteración diagenética del vidrio volcánico.** Es la alteración química, física y bioquímica de minerales que componen las rocas ígneas para formar nuevos minerales (minerales de arcilla) en su lugar. Los cambios son ocasionados por la circulación de fluidos, procesos fisicoquímicos (ejemplo. pH, potencial redox) y fuentes de energía

requeridas. Se considera un proceso de alteración a baja presión y temperatura. (Christidis & Huff, 2009)

**2. Alteración hidrotermal del vidrio volcánico.** (Christidis & Huff, 2009) Término que describe la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido (agua, vapor o gas) caliente que circuló por la misma. El vidrio volcánico es el más reactivo, frecuentemente alterado primero a ópalo, esmectita, calcita o zeolita y luego a minerales de arcilla. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)

**3. Formación de sedimentos ricos en esmectita en lagos salados y entornos áridos.** Generalmente a partir de la disolución de esmectitas detríticas (montmorillonitas no ideales), que a menudo se asocia con sepiolita y / o Paligorskita. (Christidis & Huff, 2009)

Independientemente del proceso de formación, se requiere la lixiviación de elementos alcalinos y alta relación ( $Mg^{2+}$ ) / ( $H^+$ ) para formar esmectitas en lugar de zeolitas durante la alteración del vidrio volcánico. El magnesio a menudo es suministrado por la fase fluida, especialmente cuando la roca madre es ácida (rica en silicio (Si)). Las grandes relaciones de agua a roca de un sistema abierto son necesarias para formar esmectitas, independientemente de la roca madre. Las altas proporciones de agua a roca se ven facilitadas por la alta permeabilidad. La baja permeabilidad, por lo tanto, baja proporción de agua a roca, favorece las zeolitas. (Christidis & Huff, 2009)

La Atapulgita (Paligorskita) es producto de alteración de ciertas rocas ígneas básicas, y es frecuente como constituyente de muchas rocas sedimentarias. Longchambon (1935) atribuye el origen de Paligorskita a la alteración de piroxenos y anfíboles, mientras que

Kerr (1937) sugiere que la Atapulgita de Georgia se formó por la alteración de los minerales montmorillonita. (*Mumpton, 1956*)

Según datos sobre la síntesis de arcillas fibrosas, la presencia de Paligorskita en ambientes sedimentarios "depósitos de arcilla" indicaría un medio hipersalino con alta actividad de Si, Mg y elevado pH (8-10). Por ello, la Paligorskita es un mineral que se neoforma<sup>1</sup> en zonas áridas o semiáridas y se desestabiliza en condiciones de lavado intenso (meteorización). En medios con una precipitación anual superior a 300 mm se hidrolizan. (*Romero, 2004*). Puede formarse también por alteración hidrotermal. (*Estrada & Conde, 1967*)

Al aumentar el contenido en magnesio podrán existir minerales montmorilloníticos y, al aumentar el magnesio aún más, minerales de tipo clorita. Un pH aún más elevado daría lugar a la formación de minerales del tipo Atapulgita. (*Estrada & Conde, 1967*)

No es raro, por lo tanto, que la Atapulgita se encuentre acompañada de varios minerales de los anteriormente citados, en algunos de sus yacimientos, y es lógico que se encuentre siempre impurificada por alguno de ellos. (*Estrada & Conde, 1967*)

### 6.3.3 Tipos de arcillas.

Los diferentes tipos arcillas fueron formadas a partir de la descomposición de las formaciones rocosas mediante la acción de distintos factores y además por la obtención, de diferentes impurezas de origen mineral; que son arrastradas hasta su lugar de sedimentación, por lo tanto, dependiendo de las características de la roca de origen, existen muchos tipos de arcillas, cada una de las cuales posee unas propiedades singulares. (*Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012*)

Los minerales arcillosos que se involucran en los fluidos de perforación son tres:

<sup>1</sup>Como sustantivo, significa una fase mineral o inorgánica, recién formada en un suelo durante el proceso de evolución de este. Incluye minerales arcillosos, hidróxidos, carbonatos y fases amorfas. También solía significar el proceso por el cual se forman nuevas fases. La implicación del término es que una nueva fase no hereda ninguna parte de su estructura de un mineral preexistente. (*Chesworth, 2008*)

**1. LIGERAMENTE HINCHABLES**, con forma de placa; son: Illita, clorita y caolinita. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)

**2. NO HINCHABLES**, Se trata de arcillas en forma de agujas, las cuales no se hinchan, como la Atapulgita (mineral principal de la arcilla Atapulgita) y sepiolita. Debido al aspecto de bastón que tienen sus partículas, la arcilla no brinda control de filtrado, si se necesita controlar el filtrado, se requerirán agentes de filtrado suplementarios. Por esta razón La arcilla de Atapulgita se utiliza como un efectivo viscosificador (aporta viscosidad mediante la interacción física de las partículas de forma de bastones). (MI SWACO, 2004), y aumenta los esfuerzos de gel para todos los sistemas base agua, incluyendo aquellos que están compuestos con agua salobre, agua de mar y agua salada saturada. En cambio, la sepiolita se usa más como un viscosificador suplementario para los fluidos geotérmicos de alta temperatura. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)

**3. ALTAMENTE HINCHABLE**, Bentonita es un término geológico para los materiales del suelo con un alto contenido de un mineral hinchable, que es del tipo montmorillonita, mineral de arcilla de esmectita, del cual está formada esencialmente la bentonita independientemente de su ocurrencia u origen. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012). Es clasificada en sódica y cálcica, con base en el catión predominante entre las capas y a la habilidad para dilatarse. La Bentonita Sódica (Na) exhibe una alta capacidad de dilatación en agua, mientras que la bentonita cálcica (Ca) tiene mucho menos capacidad de dilatación. La montmorillonita de sodio es el constituyente principal de los lodos de perforación de agua dulce, pues ayuda aumentar la viscosidad y reducir la pérdida de fluido. (Murray, 2006)

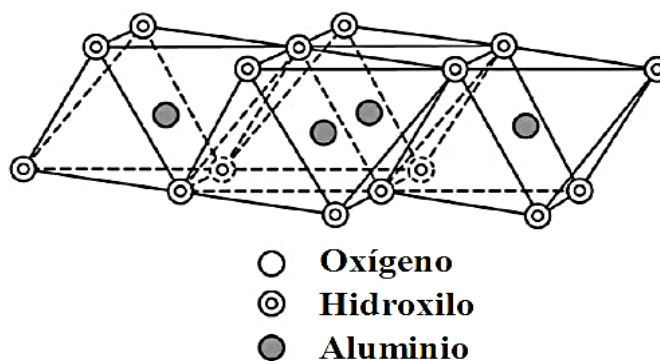
#### 6.3.4 Composición y estructura de las arcillas.

La estructura de los minerales de arcilla está formada por dos unidades básicas:

1. La lámina octaédrica: está compuesta de oxígenos e hidroxilos muy compactos en los que los átomos de aluminio, hierro y magnesio están dispuestos en

coordinación octaédrica (figura 13). Cuando el aluminio con una valencia positiva de tres es el catión presente en la lámina octaédrica, solo se rellenan dos tercios de las posibles posiciones para equilibrar las cargas, el mineral se denomina dioctaedro. Cuando el magnesio con una carga positiva de dos está presente, las tres posiciones se llenan para equilibrar la estructura y el mineral se denomina trioctaédrico (Murray, 2006)

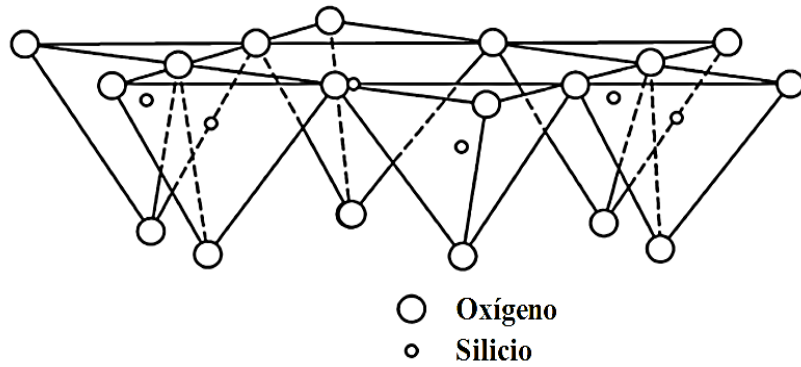
**Un octaedro de  $Al_2(OH)_6$ :** consiste en dos hojas, que contienen oxígenos o hidroxilos en los cuales los átomos del aluminio, hierro o magnesio se encuentran unidos en coordinación octaédrica que los mantiene equidistantes de los seis oxígenos o hidroxilos. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)



**Figura 13. Dibujo esquemático de la hoja octaédrica.** (Murray, 2006)

2. La capa tetraédrica: es la segunda unidad estructural, en la que el átomo de silicio es equidistante de cuatro oxígenos o posiblemente hidroxilos dispuestos en forma de un tetraedro con el átomo de silicio en el centro. Estos tetraedros están dispuestos para formar una red hexagonal repetida infinitamente en dos direcciones horizontales para formar lo que se llama lámina tetraédrica de sílice (figura 14). (Murray, 2006)

**Un tetraedro de  $SiO_4$ :** Este arreglo semeja una pirámide en la cual un átomo de silicio está ligado con cuatro átomos de oxígeno, el silicio está localizado en el centro de los cuatro átomos de oxígeno simétricamente colocados en las cuatro esquinas del tetraedro rectangular. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)



**Figura 14.** Dibujo esquemático de la lámina tetraédrica. (Murray, 2006)

La lámina tetraédrica de sílice y la lámina octaédrica se unen compartiendo los oxígenos de la punta o hidroxilos para formar lo que se denomina capa mineral de arcilla 1:1 o la capa mineral de arcilla 2: 1. (Murray, 2006)

La estructura y composición de las principales arcillas industriales, como: esmectitas y Paligorskita, son muy diferentes, aunque cada una de ellas está compuesta por láminas octaédricas y tetraédricas como sus bloques de construcción básicos. La disposición y composición de las láminas octaédricas y tetraédricas explican la mayoría de las diferencias en sus propiedades físicas y químicas. (Murray, 2006)

### **Minerales de esmectitas.**

Esmectita es el nombre del grupo para varios silicatos (figura 15) hidratados de sodio, calcio, magnesio, hierro, litio y aluminio. Los nombres de minerales individuales en el grupo son: montmorillonita de sodio, montmorillonita de calcio, saponita (montmorillonita de magnesio), nontronita (montmorillonita de hierro), hectorita (montmorillonita de litio) y beidellita (montmorillonita de aluminio). (Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017)

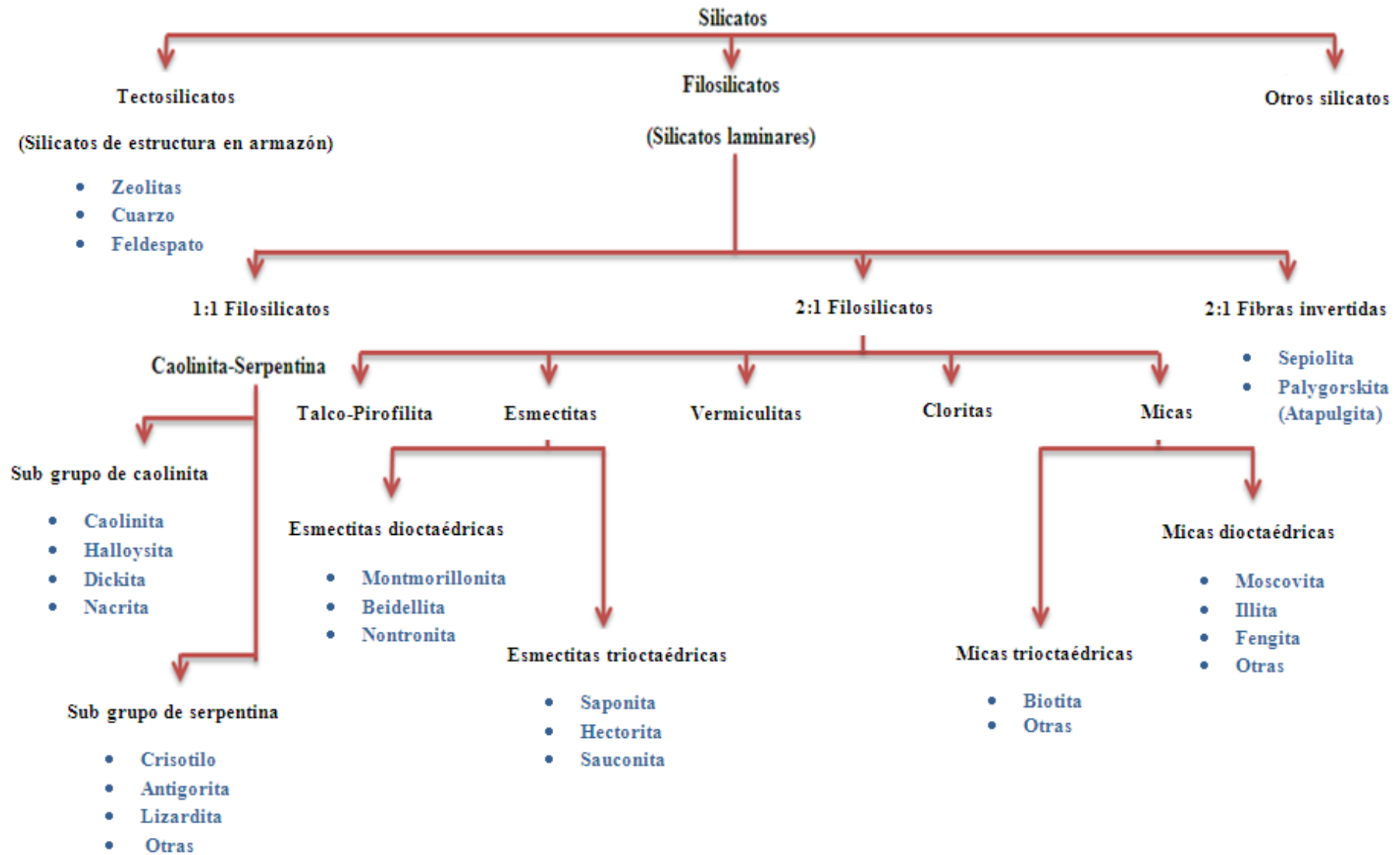


Figura 15. Esquema sobre clasificación de silicatos por Bailey (1980). (Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017)

Los minerales de esmectita se componen de dos láminas tetraédricas de sílice con una lámina octaédrica central y se designan como un mineral de capa 2: 1 (Figura 16). Las moléculas de agua y los cationes ocupan el espacio entre las capas 2: 1. (Murray, 2006)

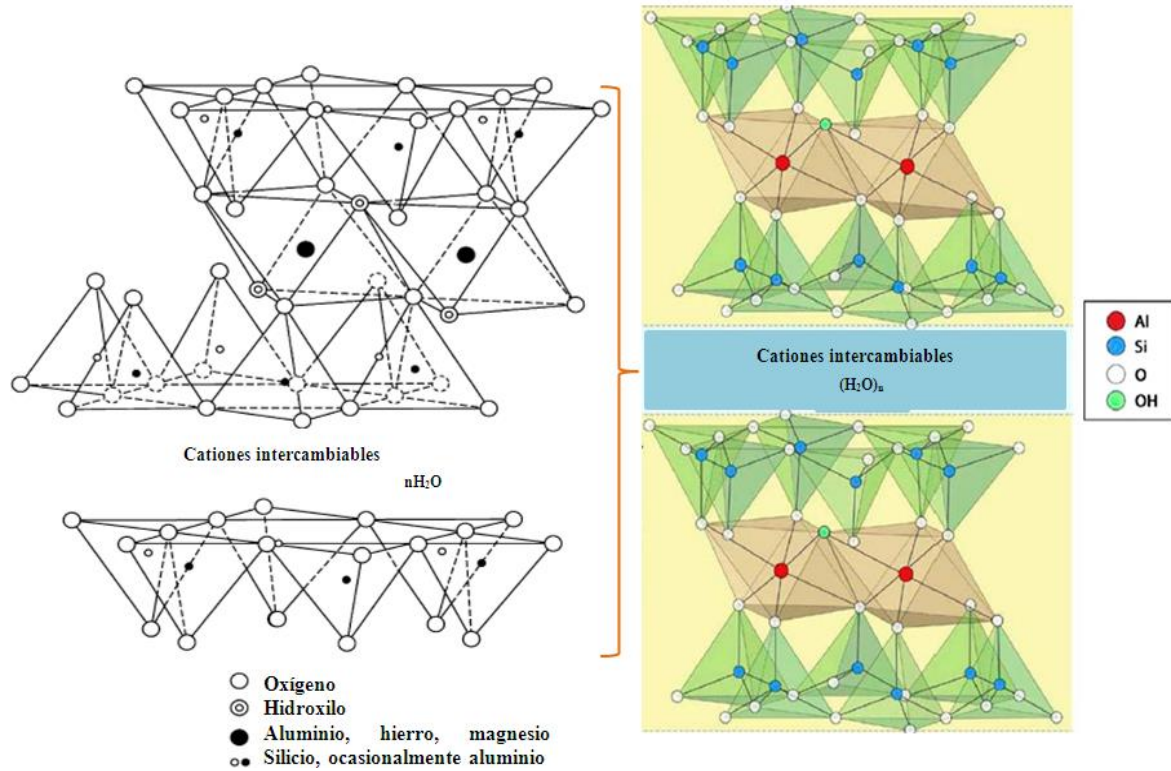


Figura 16. Diagrama esquemático de la estructura de esmectitas (Murray, 2006)(Sachs-Barrable, Darlington, & Wasan, 2014)

La distribución de carga teórica en la capa de esmectita sin considerar las sustituciones en la estructura es la que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución de carga de la capa de esmectita. (Murray, 2006)

$6O^{2-}$	$12^-$
$4Si^{4+}$	$16^+$
$4O^{2-} + 2(OH)^-$	$10^-$ (Plano común a las hojas tetraédricas y octaédricas)
$4Al^{3+}$	$12^+$
$4O^{2-} + 2(OH)^-$	$10^-$ (Plano común a las hojas tetraédricas y octaédricas)
$4Si^{4+}$	$16^+$
$6O^{2-}$	$12^-$

La fórmula teórica es  $(OH)_4Si_8Al_4O_{20}.nH_2O$  (Murray, 2006)

En esmectitas, la lámina octaédrica tiene aluminio como átomo central, que en parte es sustituido principalmente por magnesio, pero también puede ser sustituido por hierro. Las láminas tetraédricas tienen silicio como átomo central, que en parte puede ser sustituido principalmente por aluminio. (Karnland, 2010)

Si las posiciones octaédricas se llenan principalmente con aluminio, el mineral de esmectita es beidellita; si se llena con magnesio, el mineral es saponita; y si por hierro, el mineral es nontronite. (Murray, 2006)

La montmorillonita sódica (figura 17) con los iones de sodio y agua equilibra la carga cuando ésta se encuentra deficiente. La carga de la capa negativa está siempre equilibrada por los cationes debido a la demanda fundamental en la naturaleza para la neutralidad eléctrica. Los cationes de equilibrio de carga están situados entre las capas individuales (espacio entre capas). (Karnland, 2010) (Murray, 2006)

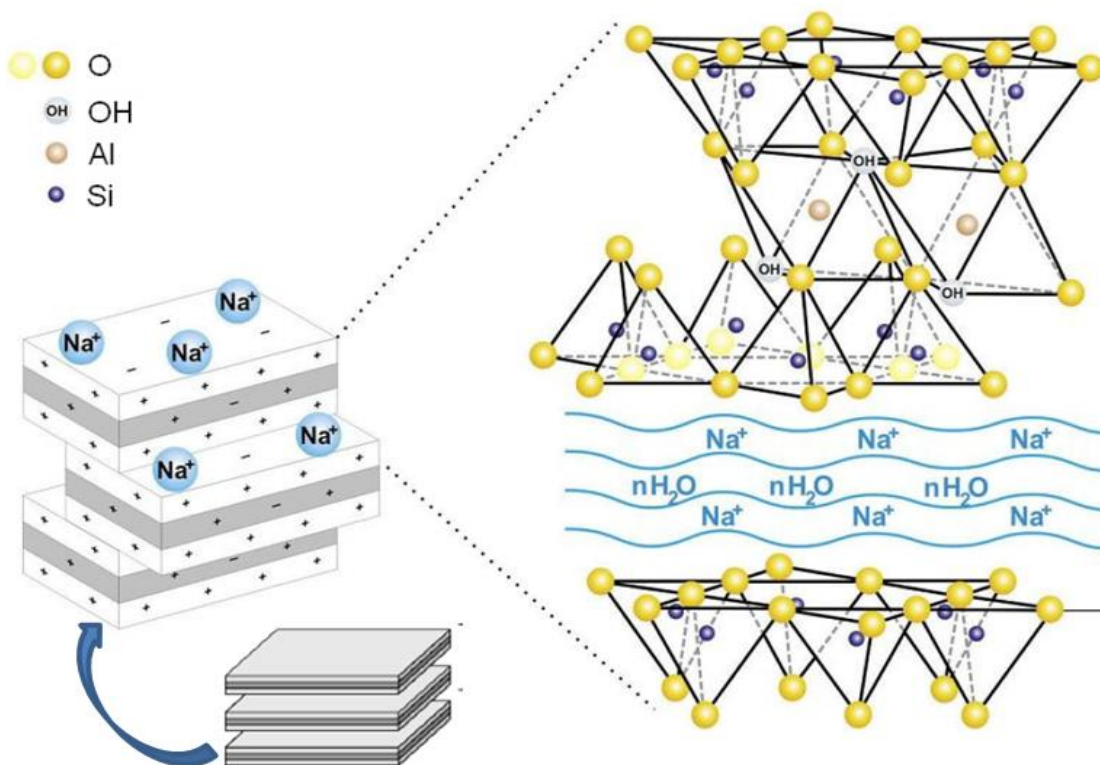


Figura 17. Esquema de la estructura de montmorillonita de sodio. (Ubowska, 2010)

La fórmula real de montmorillonita puede ser escrita (Karnland, 2010):

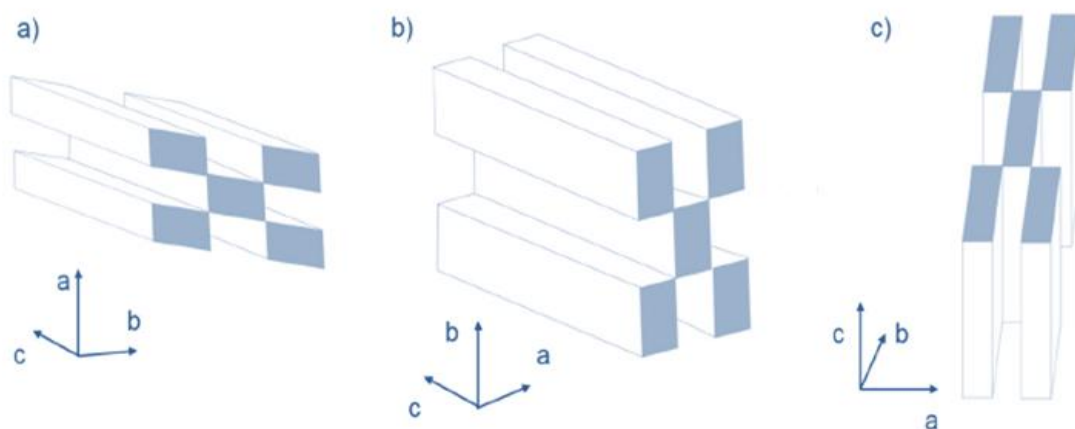


*Donde v representa la valencia de los cationes compensadores de carga.*

En la bentonita natural, los cationes de equilibrio de carga raramente son de un solo elemento, sino una mezcla de iones mono y divalentes. Varias propiedades físico-químicas dependen en gran medida del tipo del catión de equilibrio de carga dominante. Por lo tanto, el catión dominante se utiliza a menudo para describir el tipo de bentonita. (Karnland, 2010)

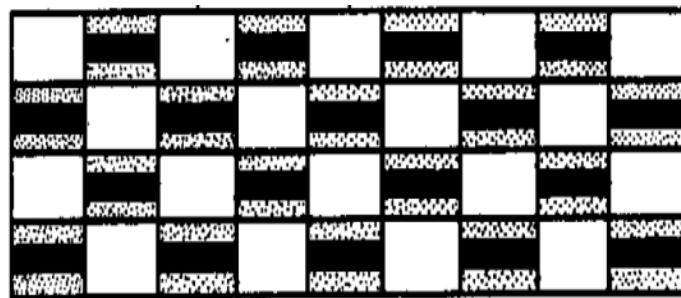
### Mineral Paligorskita (Atapulgita).

La paligorskita es un mineral de silicato (figura 15) de aluminio y magnesio hidratado, de estructuras invertidas de capa 2: 1, cada cinta se conecta a la siguiente mediante la inversión del tetraedro  $\text{SiO}_4$  a lo largo de un conjunto de enlaces Si-O-Si, formando canales. Consiste en cadenas tetraédricas dobles de sílice unidas entre sí por oxígeno octaédrico y grupos hidroxilo que contienen iones de aluminio y magnesio para producir tiras de estructura similar a los minerales de tres capas (figura 18) (Haden, 1961) (Murray, 2006)



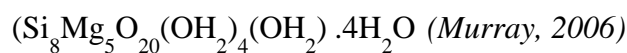
**Figura 18. Diferentes orientaciones de fibra: izquierda) eje a en la vertical, b) eje b en la vertical, y c) eje c paralelo a la vertical.** (García-Rivas, Sánchez del Río, García-Romero, & Suárez, 2017)

Éstas tiras de tres capas se unen en las esquinas mediante enlaces Si - O - Si en una estructura que se asemeja a un tablero de ajedrez en sección transversal (figura 19), con canales libres de aproximadamente 4Å por 6Å en sección transversal que recorren la longitud de las agujas (figura 22). (Haden, 1961) (Murray, 2006)



**Figura 19.** Ilustración esquemática simplificada de la estructura cristalina de atapulgita. (Vivaldi & González, 1962)

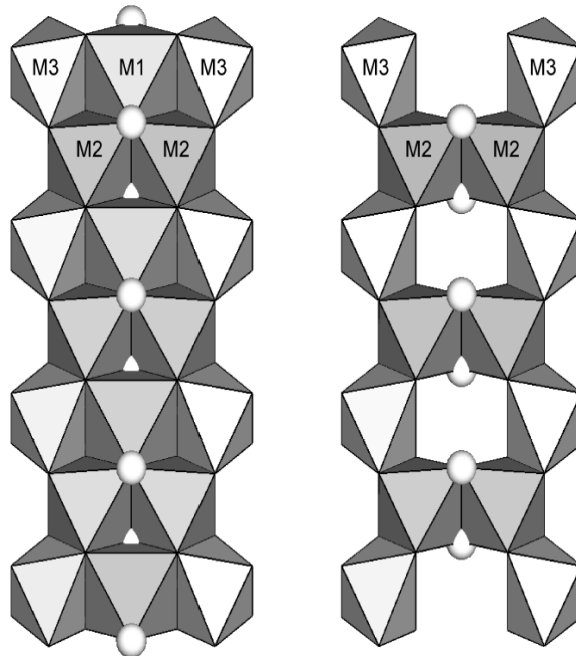
Para el mineral de silicato de magnesio se ha planteado una fórmula teórica la cual está representada de la siguiente manera:



El cristal perfecto debe ser un mineral trioctaédrico en el que los sitios octaédricos están ocupados por iones  $\text{Mg}^{2+}$ . (Ovarlez, Giulieri, Delamare, Sbirrazzuoli, & Chaze, 2011)

Sin embargo, algunos cationes trivalentes, por ejemplo, iones  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , pueden reemplazar los iones  $\text{Mg}^{2+}$  en sitios octaédricos debido al efecto de isomorfismo, que conducen a la formación de una estructura dioctaédrica o intermedia (Wang & Wang, 2016) (figura 20), por lo que se presenta otra fórmula que es:  $\text{Si}_8(\text{MgAlFe})_5\text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{OH}_2)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (Ovarlez, Giulieri, Delamare, Sbirrazzuoli, & Chaze, 2011)

Entonces de acuerdo con lo anterior la composición real varía debido a la sustitución parcial de magnesio (Mg) por aluminio (Al), hierro (Fe) y otros elementos. (Haden, 1961) (Murray, 2006)



**Figura 20.** Lámina de paligorskita trioctaédrica con grupos M1M2M2OH y sitios vacantes M1 (izquierda) y dioctaédrica que consta de grupos M2M2OH (AlAlOH, AlFe<sup>3+</sup>OH y Fe<sup>3+</sup>Fe<sup>3+</sup>OH) (derecha), sitios del borde M3 cumplen su coordinación con H<sub>2</sub>O (Chryssikos et al., 2009)

Éste mineral de arcilla contiene dos tipos de agua, una coordinada para los cationes octaédricos y la otra flojamente unida en los canales, que se denomina agua zeolítica (Figura 21). Estos canales también pueden contener cationes intercambiables y pueden colapsar cuando la atapulgita se deshidrata, ya que la estructura del canal abierto se estabiliza mediante el agua de composición que completa los bordes de las tiras octaédricas. El colapso de los canales en la deshidratación es la causa probable de la abrupta disminución en el área superficial de aproximadamente 190 a 125 m<sup>2</sup> / g. (Haden, 1961) (Murray, 2006)

Existen dos características inusuales de atapulgita:

- Dado que la estructura es tridimensional, no puede producirse hinchazón tipo montmorillonita. (Haden, 1961)

La ruptura será más fácil a lo largo de los enlaces Si - O - Si, que mantienen juntas las tiras de tres capas de ahí la forma de la partícula en forma de aguja en lugar de en forma de placa. (Haden, 1961). Estas partículas delgadas alargadas causan una alta viscosidad cuando se agregan a cualquier líquido. Es una viscosidad física y no química, por lo que es muy estable como viscosificador y medio de suspensión en muchas aplicaciones donde la montmorillonita sódica flocularía cuando la concentración de sal o electrolito es alta. (Murray, 2006)

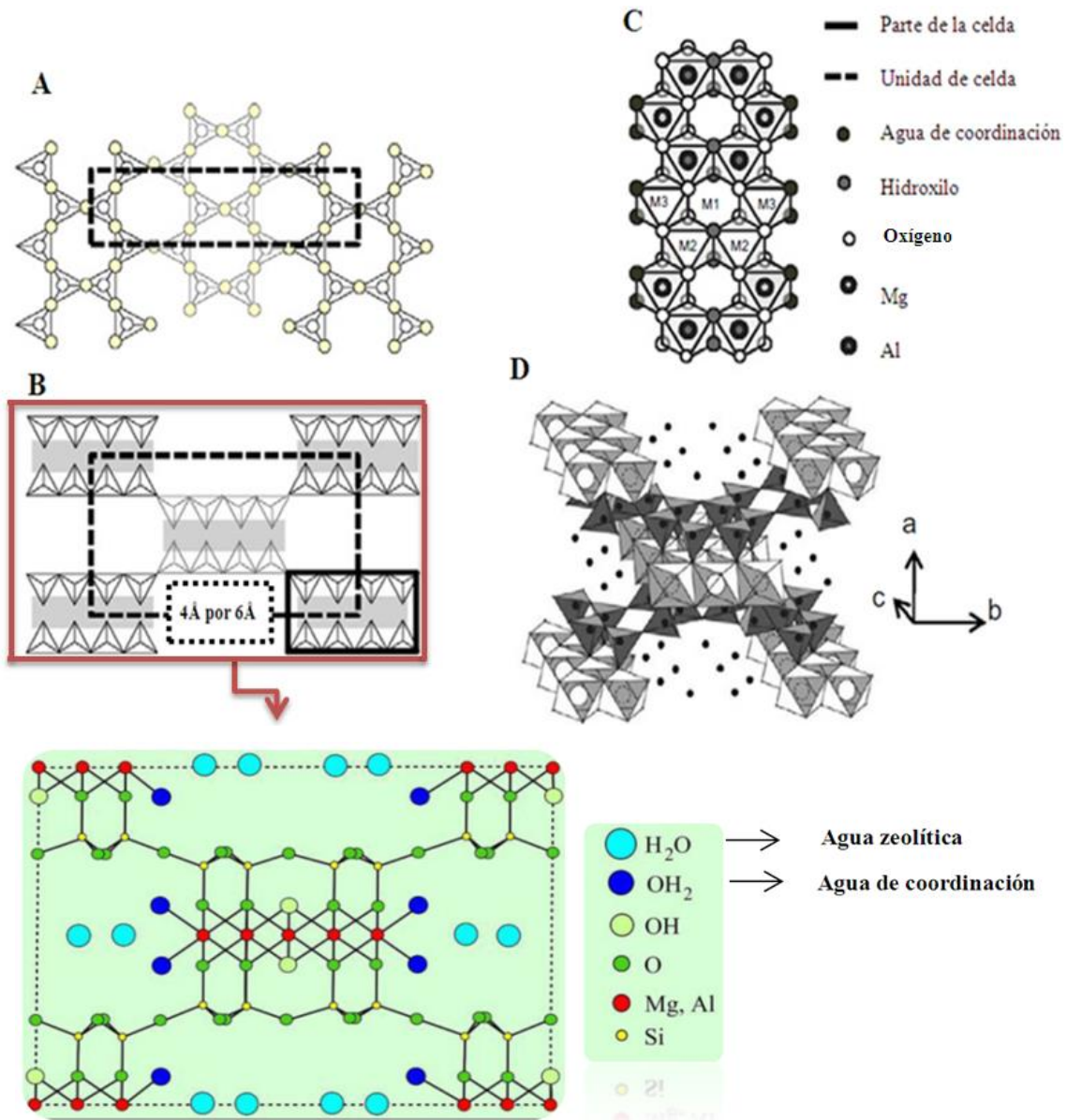
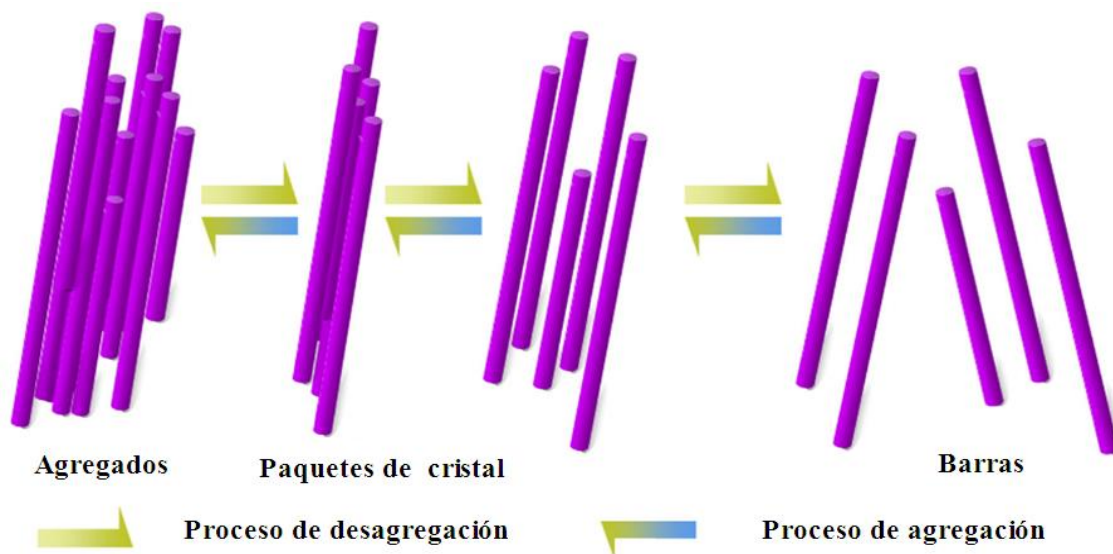


Figura 21. Esquema estructural de palygorskita. (A) Lámina tetraédrica de palygorskita, con oxígenos apicales que apuntan en direcciones opuestas. (B) Lámina tetraédrica de palygorskita, la sombra gris corresponde a la lámina octaédrica y estructura de ambas láminas con sus átomos constituyentes. (C) Lámina octaédrica de palygorskita. (D) Vista esquemática de una celda de palygorskita. (Min, 2015) (Suárez & García-Romero, 2011)

Los cristales en forma de varilla para esta arcilla se encuentran generalmente como barra de cristal o agregados debido a la mayor interacción de enlaces de hidrógeno y de Van der Waals entre varillas, que limitan la dispersión en agua u otro medio (figura 22). (Wang & Wang, 2016). Esta arcilla se viscosifica por cizallamiento, lo que provoca fracturas a lo largo del eje de las varillas y expone cargas que hacen que las varillas se atraigan entre sí. Dado que estas arcillas dependen del corte, son tan efectivas en agua salada como en agua dulce. (Haden, 1961)



**Figura 22. Modelo de agregación y desagregación de barras de cristal de atapulgita.** (Wang & Wang, 2016)

La atapulgita posee propiedades coloidales, se producen cuando las partículas se dispersan en un medio líquido en la medida en que las agujas individuales son capaces de un movimiento más o menos independiente entre sí. La naturaleza coloidal de la atapulgita no suele ser aparente hasta que las partículas se separan en agujas individuales. Esta separación se hace progresivamente más difícil a medida que el tratamiento térmico de la arcilla cruda se hace más vigoroso, y cuando se ha eliminado la mayor parte del agua unida, la posibilidad de obtener una dispersión coloidal es casi nula. (Haden, 1961)

### 6.3.5 Propiedades fisicoquímicas de arcillas.

#### 6.3.5.1 Superficie específica.

La superficie específica de una partícula es la relación de su área superficial  $A_S$  en cuanto a su masa  $M$ . (Santamarina, Klein, Wang, & Prencke, 2002) Como indica la siguiente formula:

$$s_e = \frac{A_S}{M} \text{ [Ec.7] (Santamarina, Klein, Wang, \& Prencke, 2002)}$$

Propiedad de una arcilla que relaciona la superficie (interna más externa) de una partícula ( $A_S$ ) y su masa ( $M$ ). Tiene su unidad como  $m^2/g$ . (Basto & Cajamarca, 2017) (Morera & Calderón, 2017)

Indica que por cada partícula de arcilla se obtiene una superficie específica distinta, que corresponde a la relación área-peso entre partículas. (Basto & Cajamarca, 2017) (Morera & Calderón, 2017)

Esta depende de la morfología de las partículas ya que, si aumenta la superficie, se aleja la morfología de la equidimensionalidad (son tres ejes del mismo tamaño, normalmente se da en cristales del sistema cúbico), donde esfera<lamina<fibra, también aumenta la superficie específica al disminuir el tamaño de la partícula. (Morera & Calderón, 2017)

Dicha propiedad constituye la suma del área de la superficie de todas las partículas que forman un gramo de materia en estado seco (Morera & Calderón, 2017)

El tamaño pequeño y área superficial relativamente grande, les da a las arcillas en capas (como las bentonitas) un comportamiento único cuando se dispersan en el agua creando

un área de superficie, aproximadamente de 200 m<sup>2</sup>/g. Al estar muy cargadas, su comportamiento es más destacado con respecto a interacciones entre partículas de arcilla y arcilla. (*Amoco Production Company., 1994*)

El tamaño y la forma de las arcillas les permite ser útiles en la generación de la viscosidad (cuando están altamente floculadas) o en la construcción de una torta de filtro compacta (cuando no se dispersa o cuando se desflocula por un diluyente). Cuando las cadenas poliméricas (extremadamente largas en comparación con las dimensiones de partículas de arcilla) de alto peso molecular se unen a una gran cantidad de partículas de arcilla en un sistema de agua, existe un efecto combinado que crea una reología altamente viscosa pero que diluye la cizalladura. (*Amoco Production Company., 1994*)

**Tabla 3. Tipo de mineral con su correspondiente superficie específica.**

Tipo de mineral	Superficie específica
Montmorillonita sódica	150-200 m <sup>2</sup> /g ( <i>Marroquín, Pérez, &amp; Rivera, 2012</i> )
Montmorillonita cálcica generalmente es más grande en tamaño de partícula	50-80 m <sup>2</sup> / g ( <i>Marroquín, Pérez, &amp; Rivera, 2012</i> )
Atapulgita	190 m <sup>2</sup> /g ( <i>Murray, 2006</i> )

#### 6.3.5.2 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

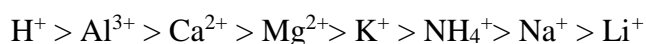
La capacidad de intercambio catiónico es definida como: cuantificación de la capacidad de las arcillas de retener cationes y la cantidad de estos disponibles para intercambiar con el medio, esto depende del área superficial y de la carga de la superficie. Se informa en miliequivalentes por 100 g de lutita<sup>2</sup>. (*Amoco Production Company., 1994*) (*Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012*)

Generalmente se cree que la CIC se produce debido a los enlaces rotos alrededor de los bordes del cristal, las sustituciones dentro del enrejado y el hidrógeno de los hidroxilos

<sup>2</sup>Roca sedimentaria compuesta de productos de la disgregación de rocas preexistentes, fisible, de granos finos, formada por la consolidación de partículas del tamaño de la arcilla y el limo en capas relativamente impermeables de escaso espesor. Es la roca sedimentaria más abundante. (*«Lutita», 2019*)

de superficie expuesta que pueden intercambiarse. Los minerales de arcilla de tamaño de partícula extremadamente pequeño tienen una CIC mayor como resultado de enlaces rotos alrededor de sus bordes. Por lo tanto, esta propiedad aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula. (*Ketterings, Reid, & Rao, 2007*)

Lo siguiente es generalmente aceptado y es arreglado en preferencia descendente para así hacerse una idea de los cationes que reemplazarán a otros en las posiciones de intercambio en donde la fuerza, o la capacidad de los cationes para intercambiar, varía:



(*Amoco Production Company., 1994*) (*Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012*)

Por lo tanto, un catión tenderá a desplazar a cualquiera de los que están a su derecha a igual concentración molar, sin embargo, la concentración iónica de  $\text{Na}^+$  es significativamente mayor que la del  $\text{Ca}^{2+}$ , el sodio desplazará al calcio a pesar de ser más difícil de reemplazar por el sodio. Entonces si la concentración de la relación  $\frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+}}$  aumenta, hay una tendencia para que el  $\text{Ca}^{2+}$  en la arcilla sea reemplazado por el  $\text{Na}^+$  de la solución. Este intercambio puede resultar de una variación en temperatura, debido a que muchos componentes tienen diferentes relaciones de solubilidad. (*Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012*)

Propiedad fundamental de las esmectitas, cada capa TOT de los minerales de arcilla consiste en una hoja octaédrica (O) de Al-O u Mg-O entre dos hojas tetraédricas (T) Si-O, con cargas negativas que surgen principalmente de la sustitución isomorfa parcial, típicamente de  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Mg}^{2+}$  en la capa octaédrica de montmorillonita aunque también se pueden sustituir  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ . Además, puede haber alguna sustitución de silicio por aluminio en las láminas tetraédricas. Por esta razón, existen cationes intercambiables como el  $\text{Na}^+$  en el espacio intercapa. (*Murray, 2006*) (*Zhao et al., 2015*)

A excepción de esmectitas, los iones intercambiables se mantienen en las superficies externas del mineral, y la reacción de intercambio no afecta su estructura. En los minerales arcillosos, los cationes intercambiables más comunes, en orden de abundancia relativa habitual, son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ . (Ketterings, Reid, & Rao, 2007)

En la mayoría de los casos, las bentonitas naturales son bentonitas de calcio, las bentonitas de sodio naturales son relativamente raras. Se puede decir que el intercambio de cationes depende del tipo y la concentración de los cationes disponibles para el intercambio. Por ejemplo, ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) se intercambia más fácilmente que el ion sodio ( $\text{Na}^+$ ) que viceversa. Para activar, por ejemplo, una bentonita de calcio en una bentonita de sodio, se necesitan altas concentraciones de sodio (exceso de ion sodio) para reemplazar el calcio en las superficies de la bentonita. El intercambio ocurre hasta que se logra un equilibrio de adsorción entre la distribución de iones en la bentonita y la concentración iónica en la solución del suelo. Cuando la distribución iónica de la bentonita se haya adaptado al entorno geoquímico de acuerdo con el balance de intercambio natural, prácticamente se mantendrá sin cambios. El intercambio iónico de iones monovalentes por los iones divalentes reduce los espacios entre las capas de silicato (figura 23). (Egloffstein, 2001)

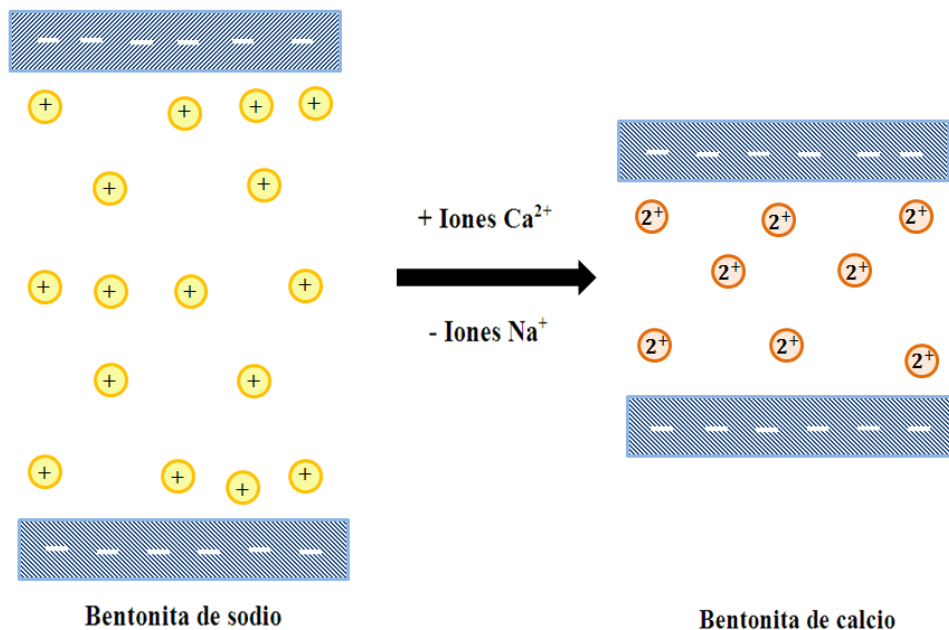
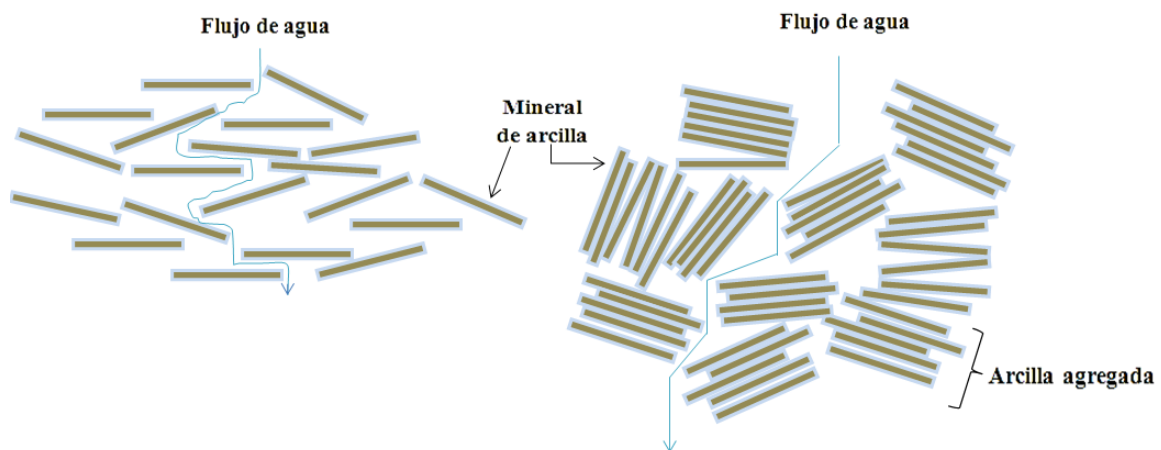


Figura 23. Cambio de bentonita de sodio a calcio. (Egloffstein, 2001)

La doble capa difusa de sodio en la superficie de los minerales de arcilla se transforma en una capa central de iones de calcio. El aumento de la atracción cristalina interna por los iones divalentes conduce a una cierta reducción de volumen y a un cambio de la microestructura de escamas minerales de arcilla “finamente distribuidas” más pequeñas a cristales minerales de arcilla más grandes (aumento de la permeabilidad). Al mismo tiempo, la gran capacidad de adsorción de agua e hinchamiento de la bentonita de sodio se reduce al nivel más bajo de una bentonita de calcio, la microestructura se cambia de escamas minerales de arcilla más pequeñas y “finamente distribuidas” a cristales minerales de arcilla más grandes (figura 24). (Egloffstein, 2001)



**Figura 24. Modelo de microestructura y permeabilidad de arcilla. Lado izquierdo: arcilla dispersa, bentonita de sodio fina. Lado derecho: arcilla agregada dispersa, como bentonita de calcio gruesa. (Egloffstein, 2001)**

En las atapulgitas se presentan sustituciones iónicas, el silicio puede ser reducido de 7 a 3 por el reemplazo de aluminio lo que lleva consigo como compensación el reemplazamiento de magnesio por aluminio y, en menor cantidad, por  $Fe^{2+}$  teniendo como consecuencia cargas negativas estructurales que generalmente se compensan con cantidades considerables de cationes intercambiables. También el aluminio puede sustituirse a su vez por magnesio o por  $Fe^{3+}$  (Estrada & Conde, 1967) (Wang & Wang, 2016). Por lo tanto, cuando hay una cantidad considerable de aluminio reemplazado por magnesio en la capa octaédrica, resulta en una carga de capa moderada. (Estrada & Conde, 1967)

Una prueba de laboratorio implementada para esta propiedad es la adsorción e intercambio de azul de metileno por los cationes intercambiables de los minerales de arcilla. Por lo tanto, dicha adsorción depende fuertemente de la dispersión, del pH y del tipo de cationes. (*Kahr & Madsen, 1995*)

**Tabla 4. Tipo de arcilla con su correspondiente Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).**

Tipo de mineral	CIC
Montmorillonita cálcica	40 y 70 meq / 100 g ( <i>Murray, 2006</i> )
Montmorillonita sódica	80 y 130 meq / 100 g ( <i>Murray, 2006</i> )
Atapulgita	25 – 30 meq /100g ( <i>Robertson, 1950</i> )

#### 6.3.5.3 Capacidad de absorción y adsorción.

“La absorción es la entrada de moléculas de fluido en la masa de un sólido absorbente.” (*Galan, 1996*)

“La adsorción implica cierta interacción entre las moléculas de fluido y la superficie sólida.” (*Galan, 1996*)

Según *Santaren (1993)*: los procesos de absorción se dan por el contacto de una fase fluida libre con una fase sólida que puede tomar y retener el fluido, generalmente tiene lugar a través de la acción capilar. En cambio, la adsorción presenta cierta interacción entre la superficie sólida de Adsorbato. (*Galan, 1996*)

En los procesos de adsorción y absorción se deben considerar las siguientes características de la arcilla: (*Galan, 1996*)

- a. Microporosidad,
- b. Distribución del tamaño de partícula,

- c. Estructura capilar,
- d. Superficie activa del sólido,
- e. Tamaño de grano,
- f. Superficie específica,
- g. Resistencia mecánica de los gránulos,
- h. Características del líquido a absorber.

El tamaño de grano de la partícula absorbente al ser pequeña da lugar a una absorción más extensa y rápida, debido a la superficie externa global aumentada. La absorción depende de la densidad del líquido, la viscosidad y la tensión superficial, que determinan la succión capilar mediante partículas de arcilla; la adsorción está más influenciada por el tamaño, la forma y la polaridad de las moléculas involucradas. Las moléculas grandes o pequeñas de baja polaridad no pueden acceder en los canales, por lo que solo pueden adsorberse sobre superficies externas. (*Galan, 1996*)

El principal campo de aplicación en algunas arcillas es en el ámbito de los adsorbentes, ya que implica (*Galan, 1996*) (*Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012*):

- ✓ La adsorción física: adsorción no iónica sobre las superficies de material finamente dividido (grandes áreas superficiales de minerales arcillosos están comprendidas en pequeños volúmenes).
- ✓ La adsorción de intercambio iónico a través de interacción e intercambio electrostático, y
- ✓ La inclusión de pequeñas moléculas en poros o cavidades, y la exclusión parcial o completa de moléculas más grandes por esas cavidades a través de la acción de adsorción zeolítica.

En general la adsorción implica interacción entre las moléculas de fluido y la superficie sólida pudiendo así adsorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (Paligorskita). Dicha propiedad está

directamente relacionada con la superficie específica y porosidad. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)

Si se encuentra en agua, esta agua puede alojarse fácilmente en las distintas cavidades de la estructura, así como en el espacio interlaminar. Por lo tanto, a mayor cantidad de cavidades en la estructura de la arcilla, mayor será su capacidad de adsorción. (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)

La estructura del mineral de Atapulgita incluye tres tipos de sitios de adsorción y absorción activos (Galan, 1996):

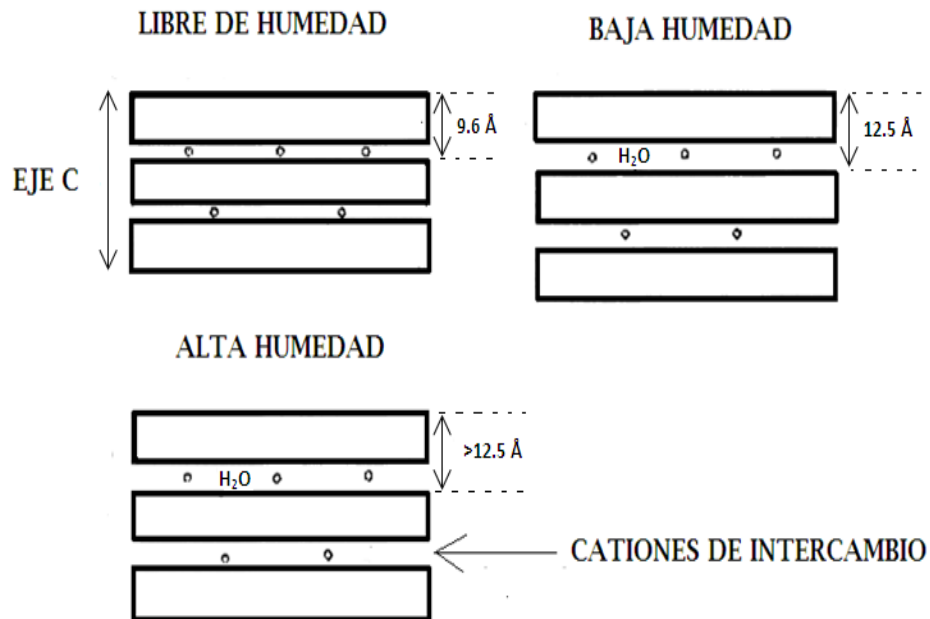
- (a) iones de oxígeno en la lámina tetraédrica de las fibras;
- (b) moléculas de agua coordinadas a iones de Mg en los bordes de las fibras estructurales (dos moléculas de H<sub>2</sub>O por ion Mg<sup>2+</sup>) y
- (c) grupos de SiOH a lo largo del eje de la fibra. La presencia de microporos y canales en estos minerales junto con el tamaño de partícula fina y fibroso explican su gran área superficial.

#### 6.3.5.4 Hidratación e hinchamiento.

En el proceso de hidratación de los minerales de arcilla se pueden distinguir diferentes tipos de aguas de hidratación (Caballero & Cisneros, 2006) :

- a) Interlaminar: limitada a espacios interlaminares y relacionada a la hidratación de los cationes de intercambio.
- b) Continua u osmótica: además de los espacios interlaminares, incluye a las superficies externas.
- c) Condensación capilar de agua libre que rellena los microporos existentes inter e intra agregados.

El fenómeno de hinchamiento de arcillas es característico de las arcillas esmectitas (Montmorillonita). (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)



**Figura 25. Dibujo esquemático que muestra la acción de hinchamiento de montmorillonita con el aumento del contenido de humedad.** (Clem & Doehler, 1960)

Estudios del agua de adsorción en bentonitas demuestran que la estructura del complejo arcilla-agua depende fuertemente del catión intercambiable, presencia de cargas eléctricas en las superficies y los bordes de las arcillas (Amoco Production Company., 1994)

Esta capa de agua variará en grosor dependiendo del tipo de catión asociado, así como de la relación arcilla/agua. Una pequeña cantidad de agua produce el hinchamiento de la bentonita. (Caballero & Cisneros, 2006)

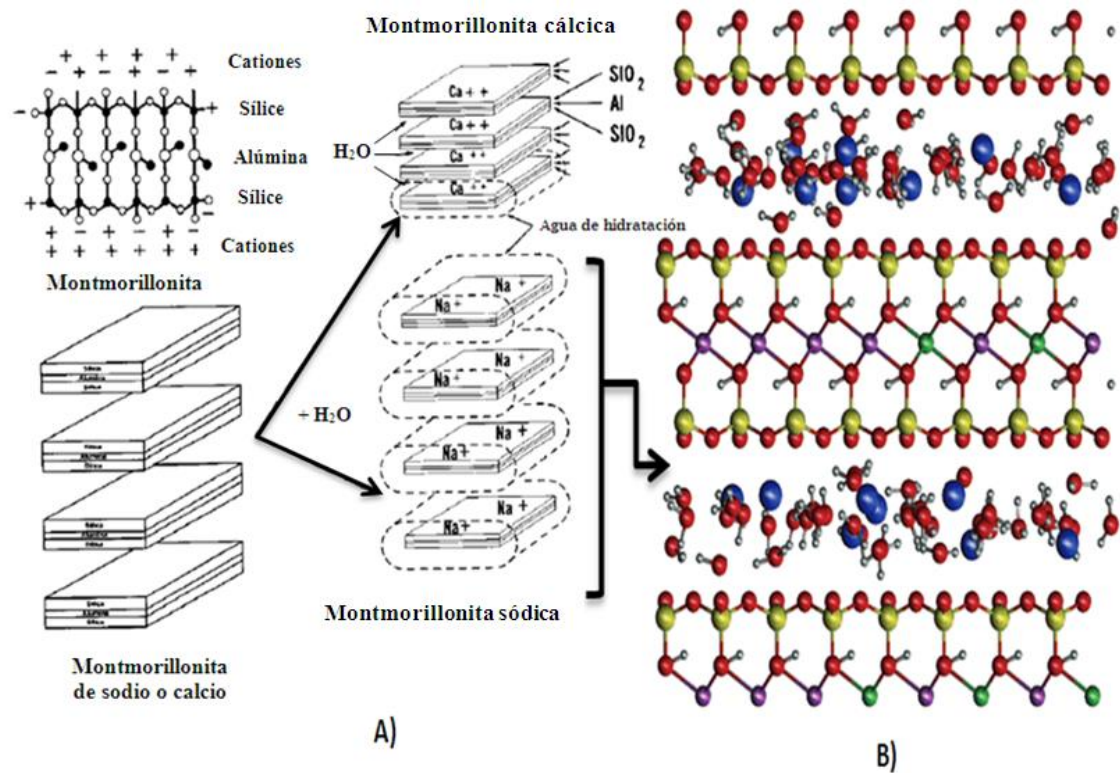
El Ca<sup>2+</sup> al ser un catión divalente, con elevado poder polarizante, se rodea de un mayor número de moléculas de agua que el Na<sup>+</sup>, y tiene mayor energía de hinchamiento. (Caballero & Cisneros, 2006)

El  $\text{Na}^+$ , al ser un catión monovalente, con menor número de moléculas de agua coordinadas que el  $\text{Ca}^{2+}$ , presenta menor energía de hinchamiento para formar la monocapa, por lo que el agua adsorbida llenará la interlámina, condensará capilarmente en los microporos y podrá adsorberse sobre la superficie externa de la bentonita sódica. En cambio, en la bentonita cálcica el agua ocupa la interlámina en una doble capa, y después los huecos libres entre los grupos de moléculas de agua coordinadas a los cationes. Así que, toda el agua adsorbida se encuentra ocupando los espacios interlaminares, de manera que no se altera la estructura. Por lo tanto al aumentar la relación agua/bentonita, la cálcica solo modificará su espacio interlaminar y debido a que es menos hidratable, proporcionará menos viscosidad que la montmorillonita sódica en cantidades iguales, mientras que la sódica formará una capa más gruesa que tenderá a separar las plaquetas de arcilla y las hará más susceptibles a la disociación (*Amoco Production Company., 1994*), hinchará libremente (hinchamiento osmótico) hasta formar un gel o una suspensión con las láminas individuales separadas (figura 26). (*Caballero & Cisneros, 2006*)

Para recibir las mejores propiedades de hinchamiento de la bentonita de sodio, la bentonita de calcio, por ejemplo, se activa con sosa (carbonato de sodio) y, por lo tanto, los iones de calcio primarios se intercambian por iones de sodio (la denominada bentonita activa). (*Egloffstein, 2001*)

Si la hidratación se genera inicialmente en presencia de electrolito fuerte como cloruro de sodio no se producirá hinchamiento. Este fenómeno se explica por la repulsión de iones similares asociados con la arcilla y también disponible en el medio de suspensión. (*Clem & Doehler, 1960*)

Al contrario de las bentonitas, la estructura tridimensional de la atapulgita impide cualquier acción interna de hinchamiento. Las fuerzas atractivas entre las agujas de una partícula son apreciables, y es necesaria una acción mecánica para separar estas agujas. (*Haden, 1961*)



**Figura 26. A) Hidratación de montmorillonita de sodio y calcio (Amoco Production Company., 1994) B) Modelo atómico del hidrato de una sola capa de montmorillonita sódica (O: rojo, H: blanco, Si: amarillo, Na: azul, Al: púrpura y Mg: verde). (Hensen & Smit, 2002)**

La dispersión eficaz se produce cuando las agujas individuales, o al menos los haces pequeños, son capaces de moverse entre sí bajo corte. Dicha dispersión en agua tiene alta viscosidad aparente a bajo cizallamiento, pero se vuelve casi delgada como el agua bajo alto cizallamiento. La recuperación de alta viscosidad tras la eliminación del alto corte es casi instantánea en agua pura, y en reposo se observa un punto de fluencia definido. Estos fenómenos son indicativos de un alto grado de interacción entre las agujas, de modo que se crea una red tridimensional dentro del fluido. Sin embargo, la interacción no es tan fuerte que resista el alto corte. (Haden, 1961)

### 6.3.5.5 Plasticidad.

En los sistemas de arcilla, se define como "*propiedad de un material que permite que se deforme repetidamente sin romperse cuando actúa sobre él una fuerza suficiente para causar deformación y le permite conservar su forma después de la fuerza aplicada que ha sido eliminada*". (Andrade, Al-Qureshi, & Hotza, 2011)

Un sistema de arcilla y agua de alta plasticidad demanda más fuerza para deformarse en mayor medida sin agrietarse, que uno de baja plasticidad que se deforma con mayor facilidad y se rompe antes. *(Andrade, Al-Qureshi, & Hotza, 2011)*

Esta propiedad se debe a que las moléculas de agua forman un “revestimiento” sobre las partículas laminares, generando un efecto lubricante que favorece que se deslicen unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. A medida que aumenta el contenido de agua de la arcilla, la plasticidad aumenta hasta un máximo, dependiendo de la naturaleza de la arcilla. *(Andrade, Al-Qureshi, & Hotza, 2011) (Marroquín, Pérez, & Rivera, 2012)*

Si se agrega agua a la arcilla seca, resulta un aumento en la cohesión, que tiende a alcanzar un máximo cuando el agua casi ha desplazado todo el aire de los poros entre las partículas. La adición de agua en los poros promueve la formación de un cuerpo con un límite elástico bastante alto que, puede agrietarse o romperse fácilmente debido a la deformación. *(Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017)*

Se pueden mencionar dos estados límites de acuerdo con el contenido de agua en la arcilla:

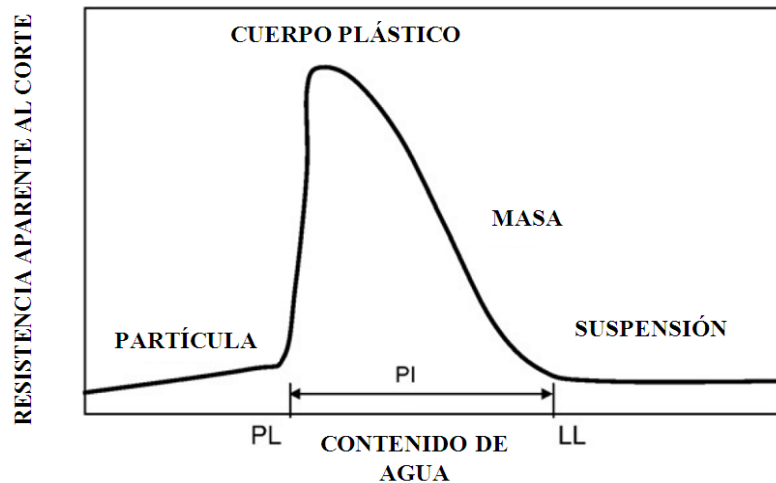
1. "Límite plástico" (PL): cantidad mínima de agua necesaria para hacer plástica la arcilla. *(Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017)*

El cuerpo (arcilla) plástico puede soportar la adición de cantidades considerables de agua, pasando por una etapa en la que permanece seco para los dedos y se moldea fácilmente. *(Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017)*

2. "Límite líquido" (LL): es cuando la arcilla se vuelve húmeda y pegajosa para los dedos y ya no puede mantener una forma moldeada, esto se produce a medida que aumenta el contenido de agua, ya que la arcilla se convierte en una pasta, en

la que el límite elástico disminuye constantemente. (Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017)

La diferencia entre las cantidades de agua en estos dos puntos límites, relacionados con la masa seca de la arcilla, se expresa como el "índice de plasticidad" (PI), de acuerdo con la figura 27.



**Figura 27. Representación de la resistencia al cizallamiento (corte) aparente en función del contenido de agua para un material arcilloso típico.** (Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017)

*PL = límite plástico, LL = límite líquido, PI = índice de plasticidad.*

Con contenidos de agua aún más altos, el sistema se convierte en una dispersión (suspensión o deslizamiento). Existen factores que influyen en la plasticidad; se pueden relacionar con (Aboudi Mana, Hanafiah, & Chowdhury, 2017) :

1. La arcilla. Estos factores son: La morfología (laminar) de las partículas, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial), alta capacidad de hinchamiento (fundamentalmente), composición mineralógica, distribución del tamaño de partícula, tipo de cationes intercambiables, presencia de sales y material orgánico.

2. El proceso. Estos factores son: la aplicación de presión, temperatura y características del agua y los aditivos utilizados.

#### 6.3.6 Características de un fluido base bentonita-agua.

Las suspensiones de bentonita en agua son ampliamente utilizadas en la industria. Estas suspensiones contienen partículas de bentonita que se han desagregado en el rango de partículas coloidales. Por lo tanto, tienen propiedades similares. (*Clem & Doehler, 1960*)

El uso más grande y también el más conocido de suspensiones de bentonita es como lodo de perforación. Como ya se mencionó las funciones de los lodos de perforación incluyen la eliminación de los recortes del pozo, el fortalecimiento del pozo y la reducción de la pérdida de fluido del lodo, eliminación de los cortes que se depositan cuando se detiene la circulación, la lubricación y enfriamiento de la broca. El desarrollo de estas propiedades favorables en el lodo depende de las características de viscosidad y gel que aporta la bentonita. Ya que estas se controlan ajustando la cantidad de bentonita en agua que aumenta sustancialmente cuando se agrega esta arcilla y se mezcla en cantidades generalmente inferiores a 10 % p/p. (*Clem & Doehler, 1960*)

El tamaño de partícula muy fino, la capacidad de hinchamiento y la forma brindan a la montmorillonita de sodio la capacidad de formar membranas casi impermeables al movimiento del agua. Esto lo convierte en un sellador muy bueno para el uso en la línea de acequias de riego y vertederos y para formar un sello impermeable en formaciones permeables al perforar pozos, para evitar la pérdida de fluido. La montmorillonita cálcica generalmente es más grande en tamaño de partícula, tiene un área superficial, una capacidad de intercambio, un índice de hinchamiento y una viscosidad más baja que la montmorillonita sódica. (*Murray, 2006*)

La impermeabilidad de la torta del filtro se debe en parte al hecho de que el agua adsorbida en la bentonita está muy unida; también porque los pequeños copos de arcilla

actúan juntos para formar un revestimiento casi completo del agujero. (*Clem & Doehler, 1960*)

**Tabla 5. Valores de reología, pérdida de filtrado y revoque para fluidos de perforación base bentonita-agua fresca. (*Toka & Toka, 2015*)**

Parámetros Reológicos.	Valores
AV	16.5 cps
VP	10 cps
YP	13 lb / 100pie <sup>2</sup>
$\tau_{10\ s}$	4 lb / 100pie <sup>2</sup>
$\tau_{10\ min}$	8.5 lb / 100pie <sup>2</sup>
PF	13 mL
TT	0.8 mm

Los fluidos de perforación deben ser diseñados de acuerdo con el pozo que se va a perforar. Sus características dependerán de las temperaturas y la profundidad en las que se encuentren perforando. El Ingeniero de lodos determina las concentraciones de bentonita y demás aditivos que deberá emplear para alcanzar las propiedades requeridas que se dividen en cuatro etapas detalladas en las tablas 9,10 y 11 según características típicas utilizadas en geotermia en pozos con profundidades y temperaturas similares. (*Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015*)

El volumen del fluido debe permanecer constante durante las tres etapas de perforación. La variación de este valor puede indicar problemas en la perforación como entrada en zonas de pérdida de circulación, si el fluido empieza a disminuir. (*Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015*)

La etapa 4 es perforada en su totalidad con pérdida de circulación total. En esta zona, al estar cerca al reservorio, se espera esta condición pues aumenta la porosidad de la formación que es lo que permite la obtención del recurso geotérmico. Para este caso, se considera que no existe retorno de fluido a superficie, por lo tanto, los productos que se emplean permiten diluir el lodo residual de la anterior etapa y permite limpiar las

paredes del pozo para eliminar cualquier contaminante que podría entrar en contacto con el recurso. (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015)

El lodo de agua fresca y bentonita que se usa en los pozos geotérmicos puede dañarse fácilmente en ambientes de alta temperatura; es decir, mayor de 175°C debido al fenómeno de floculación de las placas de bentonita. Este fenómeno afecta desfavorablemente el proceso de perforación y aumenta los costos. Además, no se pueden realizar mediciones de registro y temperatura debido a dificultades mecánicas para bajar las herramientas de tala en un agujero debido al barro gelificado (Altun & Serpen, s. f.). Por lo tanto, en temperaturas extremas, se deben usar formulaciones que permitan superar estos problemas, entonces se han desarrollado aditivos orgánicos o polímeros sintéticos, a menudo llamados diluyentes, que estabilizan las suspensiones de agua-bentonita. Aunque muchos de estos aditivos, también se degradan a altas temperaturas. (Abdou, Al-sabagh, & Dardir, 2013)

Otra situación más alarmante para el mismo fenómeno ocurre cuando se encuentra la invasión de salmuera en la operación de perforación en progreso. El ambiente de alta temperatura junto con la contaminación con sal resulta en propiedades reológicas y de filtración inaceptable para el uso de lodo de bentonita de agua dulce (fresca). En consecuencia, necesitaría una renovación completa del sistema de lodo. Cuando la salinidad del agua afecta en gran medida la capacidad de hidratación de la bentonita, se puede usar un mineral de arcilla fibroso como la atapulgita. Pero para los ambientes que tienen tanto alta temperatura como alta concentración de solución salina es mejor el uso de sepiolita. (Altun & Serpen, 2005)

Generando la necesidad de seguir en la búsqueda de materiales que puedan estabilizar las suspensiones de agua y bentonita para contrarrestar los desafíos específicos encontrados durante el proceso de perforación confiriendo ciertas propiedades físicas y químicas que permitan la realización de los trabajos de excavación con eficiencia y precisión. También ayudan a reducir al mínimo los riesgos humanos. (Clem & Doehler,

1960). En la tabla 6 se muestra el uso de aditivos más comunes en fluidos de perforación de bentonita–agua fresca.

**Tabla 6. Aditivos usados en fluidos de perforación con Bentonita.** (*Amoco Production Company., 1994*)

ADITIVO	FUNCIÓN
Bentonita	Viscosificante y control de filtrado
Lignosulfonato	Defloculante, control de filtrado,
Soda caustica/ Potasa caustica	Control de alcalinidad
Almidón/CMC Baja Viscosidad	Control de filtrado
Ceniza de soda	Remoción de ion calcio
Barita	Agente de ponderación
Gilsonita	Control de filtrado
Lignito	Control de filtrado

Cuando se necesita la dispersión de la bentonita en el agua se ayuda con la adición de una pequeña cantidad de un electrolito. Sin embargo, al igual que otros materiales coloidales, una alta concentración de iones puede flocular la bentonita. Además, si se intenta la hidratación inicial en un electrolito fuerte, tal como una solución concentrada de cloruro de sodio, esencialmente no hay hinchamiento. (*Clem & Doehler, 1960*)

### 6.3.7 Características de un fluido base Atapulgita-Agua.

La *palygorskita* forma estructuras de gel en agua dulce y salada mediante el establecimiento de una estructura reticular de partículas conectadas a través de enlaces de hidrógeno. En la industria de la perforación, estas propiedades permiten a la suspensión de arcilla levantar las grandes partículas densas de los fragmentos de perforación y requieren una potencia de bombeo relativamente baja durante la circulación del agua. A diferencia de la bentonita, la Atapulgita, formará estructuras de gel en agua salada y se utiliza para perforar formaciones contaminadas con sal (*Zhou et al., 2015*). Al ser menos sensible a las sales y a la temperatura, las propiedades reológicas deseadas permanecerán constantes incluso a altas concentraciones de electrolitos (*Zhang et al., 2017*). Las partículas de *palygorskita* se pueden considerar partículas cargadas con zonas de cargas positivas (+) y negativas (-). Es la unión de estas cargas alternas lo que les permite formar suspensiones de gel en sal y agua dulce. (*Zhou et al., 2015*)

A diferencia de los minerales arcillosos hinchables como la montmorillonita, la palygorskita como mineral fibroso no adherente, la longitud de la fibra y el número de grupos silanol (Si-OH) en la superficie de la fibra desempeñan un papel importante en la agregación de fibras y forman una red aleatoria que atrapa el agua y aumenta la viscosidad. (Zhou et al., 2015)

**Tabla 7. Algunos parámetros reológicos de atapulgita tomados después de 24 horas (gel de arcilla en 6,4% en peso de suspensión).** (Zhang et al., 2017)

Parámetros reológicos	AV cps	PV cps	YP lb / 100pie <sup>2</sup>	$\tau_{10s}$ lb / 100pie <sup>2</sup>	$\tau_{10min}$ lb / 100pie <sup>2</sup>	PF (mL)
Valores	19.5	4	15.5	8.5	15	124

La perforación es una de las actividades más caras de un proyecto geotérmico. En el proyecto de perforación, el sistema de circulación absorbe una parte del costo del pozo. Hacer la selección del fluido de perforación geotérmico es vital para el éxito del proyecto. Por lo tanto, es importante seleccionar un fluido de perforación que proporcione los mejores resultados en costo, seguridad, propiedades reológicas, que alcance la profundidad deseada y la salida del pozo. Los fluidos de perforación geotérmicos comúnmente utilizados incluyen barro a base de agua, agua solamente, lodo aireado o agua y espuma (Chemwotei, 2011) . Esta investigación tiene la finalidad de preparar un lodo a base de agua geotérmica y Atapulgita. Presentando esta agua los siguientes componentes: Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>, B<sup>3+</sup>, Li<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, y F<sup>-</sup>.

## VII. HIPÓTESIS.

**Hipótesis de trabajo ( $H_I$ )** = Las dispersiones obtenidas presentaran valores de propiedades reológicas y de filtrado iguales que los utilizados actualmente.

**Hipótesis nula ( $H_0$ )** = Las dispersiones obtenidas presentaran valores de propiedades reológicas y de filtrado alejados con respecto a los utilizados actualmente.

**Hipótesis alternativa ( $H_A$ )** = Las dispersiones obtenidas mostraran valores similares de propiedades reológicas y de filtrado con respecto a los utilizados actualmente.

## VIII. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

Esta investigación es de carácter cuantitativa porque se midieron variables y se interpretaron resultados utilizando estudios previos e hipótesis, se obtuvieron datos, productos de mediciones que se representan mediante números y se analizan por medio de métodos estadísticos, buscando con todo esto que el estudio efectuado pueda replicarse.

También es investigación aplicada ya que nuestro interés es la utilización y resultado práctico de los conocimientos y así conocer para hacer, actuar, construir y modificar lo relacionado a nuestro problema de estudio. Además, dependemos de descubrimientos y avances de la investigación básica para beneficiarnos y hacer más fácil el estudio.

Además, la investigación es de naturaleza experimental debido a que manipulamos determinadas variables bajo ciertas condiciones para así controlar el aumento, disminución y efectos en las conductas observadas en ellas con el fin de describir por que causa se produce dicha situación.

Nuestra metodología se divide en dos secciones: Materiales y método.

### 8.1 Materiales.

En esta sección presentamos la cristalería utilizada para ejecutar dicho trabajo, además de equipo y reactivos empleados para la investigación (tabla 8). Se detallan ciertas características de cada uno de estos recursos. La cristalería fue proporcionada por la Escuela de Química, así como algunos equipos: entre ellos la balanza, el agitador de velocidad variable y pH-metro. El compresor fue proporcionado por el Lic. Diego Chicas y otros materiales de uso mecánico por el Lic. René Alexander Arévalo, ambos docentes de la Escuela de Química de la Universidad de El Salvador.

El resto del equipo y todos los reactivos fueron proporcionados por LaGeo.

**Tabla 8. Materiales, equipo y reactivos (utilizando nombres comerciales).**

Materiales	Reactivos		
	Reactivo	Calidad	Marca
Probeta (25 mL)			
Probeta (10 mL)	ATAPULGITA	Industrial	ND
Vaso de precipitados	DUAL FLO- HT	Industrial	ND
Vidrios de Reloj	KCI	Industrial	ND
Frasco lavador	LIGCON	Industrial	ND
Jack	LIGCO	Industrial	ND
Microespátula	MD II	Industrial	ND
Papel Filtro Fann de 9 cm de diámetro	MIL PAC R	Industrial	ND
Pie de rey	SPERSENE CF	Industrial	ND
Probeta de (1000 mL)	TANNATHIN	Industrial	ND
Termómetro digital	XAN PLEX D	Industrial	ND
	NaHCO <sub>3</sub>	Industrial	ND
	GLO LIG 1000	Industrial	ND
	SODA ASH	Industrial	ND
	REDI COAT	Industrial	ND
	NEW DRILL	Industrial	ND
	POLY PLUS	Industrial	ND
	GOLD BORE	Industrial	ND
	CHENTROL	Industrial	ND
	AGUA GEOTÉRMICA		

ND = No disponible

✓ **Aditivos:** cada uno está detallado según la función para la cual se ha empleado en las muestras del fluido de perforación.

- **SODA ASH.** Es carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), se utiliza para disminuir la dureza del agua y elevar el pH.
- **NEW DRILL.** Es un copolímero: poliacrilamida parcialmente hidrolizada de alto peso molecular. Se emplea para estabilizar lutitas, reducir fricción y generar viscosidad.
- **MIL PAC.** Es celulosa polianiónica, se usa como viscosificador regular y control de filtración.
- **XAN PLEX.** Es un polisacárido, que se emplea para aumentar la viscosidad y resistencia de gel.
- **CLORURO DE POTASIO.** Se encarga de estabilizar el esquisto (roca que resulta de la transformación de arcilla sometida a grandes presiones).

- **TANNATHIN.** Es un lignito oxidado (origen natural), se utiliza como reductor de pérdida de fluido y defloculante.
- **SPERSENE CF.** Es un lignosulfonato de cromo, se usa como defloculante; reductor y estabilizador de la viscosidad, además reduce la pérdida de fluido sin altas concentración de arcilla y sin otros que puedan ayudar a la pérdida de filtrado.
- **DUAL FLO- HT.** Es un derivado de almidón modificado; material no iónico, con carbonato de calcio, se utiliza para obtener una torta de filtro delgada, flexible y fácilmente eliminada.
- **LIGCO.** Es sílice cristalina, cuarzo. Se usa como dispersor y emulsificador suplementario.
- **LIGCON.** Es sílice cristalina, cuarzo. Se emplea como controlador de la filtración y los componentes de dispersión y emulsificador.
- **GOLD BORE.** Es un componente asfáltico, está compuesto por resina de Gilsonita, utilizado para controlar filtrado a altas temperaturas y presiones, estabilizar el pozo, controlar arcilla derrumbable y ayudar en la reducción del torque y arrastre según la concentración utilizada.
- **GLO LIG 1000.** Es polvo de lignito, se usa como controlador de la reología y filtración, además mantiene el pH constante.
- **CHENTROL.** Es sílice cristalina, cuarzo. Se utiliza para ayudar a la dispersión, defloculación y control de filtrado.
- **BICARBONATO DE SODIO.** Precipita el Calcio y reduce el pH.
- **POLY PLUS.** Es un copolímero: poliacrilamida aniónica, que se emplea como encapsulador de recortes y estabilizador de esquistos, viscosificador, reductor de fricción, floculante y para cierto control de pérdida de fluido.
- **MD II.** Es un detergente biodegradable. Se utiliza como surfactante (disminuye tensión superficial).
- **REDI COAT.** Es una formulación de polímero, que se usa como encapsulador de trozos perforados de arcilla y pizarra (roca metamórfica), para prevenir hidratación, escisión, desprendimiento y dispersión de pizarra.
- **ATAPULGITA** Aumenta viscosidad y fuerza gel.

✓ **Equipo.**

- ***Viscosímetro de lectura directa (Reómetro).***

Este instrumento rotatorio se utiliza para determinar las propiedades reológicas de fluido, es decir, la viscosidad plástica, el punto cedente y la fuerza de gel. Presenta 6 diferentes velocidades: 300, 600, 200, 100, 6 y 3 rpm (Fann Instrument Company, 2018)



**Figura 28. Viscosímetro de lectura directa (reómetro, Fann, 207198, modelo 35A).** (foto tomada del equipo)

- ***Filtro prensa API.***

Cumple con las especificaciones API 13B-1 de la norma API (por sus siglas en inglés “*American Petroleum Institute*”, en español *Instituto Americano del Petróleo*), se usa para determinar el filtrado o pérdida de agua que pasa hacia la formación permeable cuando el fluido es sometido a una presión diferencial. Para la prueba API de pérdida de fluido a baja temperatura /baja presión se emplea el filtro prensa API estándar, presurizado hasta un diferencial de 100 psi. La presión se puede aplicar con un medio fluido no peligroso, bien sea gas o líquido. Para obtener datos correlativos se utiliza el mismo espesor de papel filtro apropiado. (Fann Instrument Company, 2018)



**Figura 29. Filtro prensa API (presurizado básico, Fann, 207127, modelo 300).**  
(foto tomada del equipo)

- **Compresor de aire con tanque plano.**

Este aparato se conecta al filtro prensa con la finalidad de generar una presión de 100 psi, permitiendo controlarla en este punto. (Copyright ©,Porter-Cable, 2006)



**Figura 30. Compresor de aire con tanque plano. (PORTER-CABLE, modelo C2006).** (Foto tomada del equipo)

- **Agitador De Velocidad Variable Reversible.**

El GT31 se emplea con la finalidad de homogenizar las mezclas a medida que se agrega cada aditivo al agua geotérmica, permitiendo que la integración entre ellos sea más rápida(Glas-Col., 2014)



**Figura 31. Agitador De Velocidad Variable Reversible (Glas-Col, modelo 099D GT31). (Glas-Col., 2014)**

- ***pH metro.***

Es un medidor de pH que nos permite conocer este valor antes y después de mezclar los aditivos. («*Electrochemistry - 200 Series Meter /Model 225*», 2010)



**Figura 32. pH ISE meter (Denver Instrument, modelo225). (Foto tomada del equipo)**

- ***Balanza analítica.***

Se utiliza para el pesar la materia en gramos de cada aditivo.



**Figura 33. Balanza Analítica (HOAUS-PIONEER, modelo 214PCA).** (Foto tomada del equipo)

Especificaciones (datos tomados de la balanza utilizada):

- ✓ Max. Capacidad 210g
- ✓ Sensibilidad 0.0001g
- ✓ Linealidad 0.3 mg
- ✓ Funciones: Pesaje, conteo de partes, porcentaje.

- ***Balanza para densidad de lodos.***

Se trata de un recipiente tapado con tapa, un brazo graduado en gramos x cm cúbicos con pesa deslizante que permite tomar la densidad. Su lectura se realiza una vez nivelada la balanza. («Catálogo de Equipo Baroid.», s. f.)



**Figura 34. Balanza para densidad de lodos (Baroid).** (Foto tomada del equipo)

- **Kit de retorta.**

Se usa para determinar la cantidad de líquidos y sólidos antes de la perforación. En una prueba, una muestra de líquido se mide y se coloca en un vaso de precipitados. El vaso de precipitados se calienta hasta que los componentes líquidos se evaporan. Los vapores pasan a través de un condensador y se recogen. El resultado se lee directamente como un porcentaje del volumen. («*Fann Kit Retorta Aceite y Agua 10ml.*», 2011)



Figura 35. Kit de retorta 10 mL (Fann). (Foto tomada del equipo)

## 8.2 Método.

Nuestro método ha sido diseñado con la finalidad de que esté constituido por un conjunto de técnicas que nos permita lograr nuestros objetivos planteados, por lo tanto, las dos etapas del método se han desglosado con su objetivo correspondiente (figura 36).

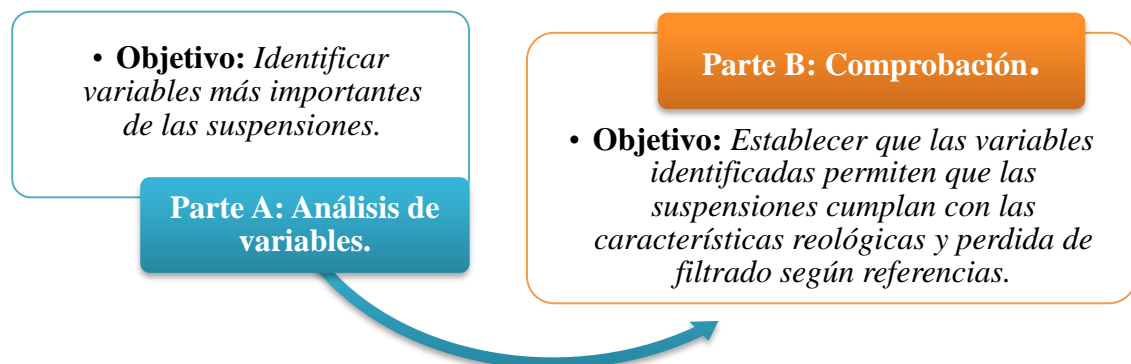


Figura 36. Esquema del desarrollo de la metodología experimental.

En la parte A se realizó un diseño factorial (parecido al ejemplo representado en la figura 37) empleando máximos y mínimos de concentración para 18 aditivos (variables), incluida la arcilla, teniendo así una matriz de 20 suspensiones.

		<b>Factores</b>															
		S. no.	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$
<b>Pruebas</b>	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
	2	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
	3	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
	4	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
	5	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
	6	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1
	7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1
	8	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1
	9	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1
	10	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1
	11	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
	12	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
	13	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1
	14	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
	15	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1
	16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

**Figura 37. Diseño factorial (Diseño Plackett-Burman).** (Naveena, Altaf, Bhadriah, & Reddy, 2005). En la fila horizontal superior se coloca cada variable (factores) utilizada y representada en este caso por  $X_1$ ,  $X_2$ , hasta  $X_{15}$ , para un total de 16 muestras, asignando el  $\underline{1}$  para representar concentración mayor y  $\underline{-1}$  concentración menor de factores.

También se analizaron los datos (proporcionados por el laboratorio de LaGeo) de la composición química de las muestras de agua geotérmica para establecer la cantidad de Bicarbonato de Sodio que se utilizó según el contenido de Calcio presente en ella mediante la ecuación 8, otra información que se obtuvo es la cantidad de cloruro de sodio presente en el agua.

$$NaHCO_3 \text{ requerido} = \text{calcio} (0.00074) \quad [\text{Ec. 8}]$$

Después de esto se llevó a cabo un análisis preliminar en el cual se determinó que cada aditivo se agregaría después de pasado un minuto de agitación manteniendo así el sistema por 15 minutos a 960 rpm para favorecer la integración entre ellos (no se integran en su totalidad). Además, se estableció que los parámetros reológicos se medirían después de 15 minutos y después de dos horas de agitación ya que se notó una variación en los valores.

Luego de esto se realizó la serie de suspensiones según el orden del diseño factorial y lo establecido anteriormente a las cuales se les determinó (también se determinó en el análisis preliminar): el grado de basicidad o acidez (pH) que presentan utilizando un pH-metro, Viscosidad Plástica, Punto Cedente, Resistencia de Gel (*parámetros reológicos*) utilizando el Reómetro y Pérdida de Filtrado utilizando el Filtro Prensa (este no se determinó en el análisis preliminar ya que no se contaba con el compresor) de acuerdo a las siguientes técnicas (*Baker Hughes INTEQ., 1998*):

### ***Medición de la Viscosidad Plástica y Punto Cedente.***

1. Se colocó la muestra en un recipiente apropiado y sumergió el forro rotor exactamente hasta la línea de referencia.
2. Con el forro rotando a 600 rpm, se esperó hasta que la lectura del cuadrante alcanzara un valor estable. Se registró la lectura del cuadrante para 600 rpm.
3. Se cambió a 300 rpm y esperó que la lectura del cuadrante llegara a un valor estable. Se registró esta lectura para 300 rpm.
4. La viscosidad plástica (VP) en centipoise es igual a la lectura para 600 rpm menos la lectura para 300 rpm.
5. El punto cedente (PC) en lb/100 pie<sup>2</sup> es igual a la lectura para 300 rpm menos la Viscosidad Plástica. Se registró la temperatura de la muestra en grados Celsius (°C).
6. La Viscosidad Aparente en centipoise es igual a la lectura para 600 rpm dividida entre dos.

### ***Medición de la resistencia gel.***

1. Se colocó la muestra de fluido en un recipiente apropiado como se indicó para la medición de la Viscosidad Plástica y el Punto Cedente.
2. Se agitó durante 10 segundos a alta velocidad.
3. Se permitió que el fluido reposara durante 10 segundos. De manera lenta y uniforme, se giró el volante en la dirección que produce una lectura positiva en el cuadrante. La lectura máxima es la Resistencia Gel inicial, en lb/100 pie<sup>2</sup>. Para aquellos instrumentos que tengan una velocidad de 3 rpm, la lectura máxima alcanzada después de iniciar la rotación a 3 rpm es la Resistencia Gel inicial. La temperatura de la muestra se registró en grados Celsius (°C).
4. Se agitó nuevamente la muestra de fluido a alta velocidad, durante 10 segundos, y después se dejó reposar el fluido durante 10 minutos. Se anotó la medición como en el paso anterior y se registró la lectura máxima como Resistencia Gel de 10 minutos, en lb/100 pie<sup>2</sup>.

### ***Filtración.***

1. Se aseguró que cada una de las piezas de la celda estuviera limpia y seca, y que los empaques no estuvieran deformes o desgastados. Se vertió la muestra de fluido en la celda y se completó el ensamblaje con el papel filtro en su lugar.
2. Se colocó un cilindro graduado y seco por debajo del tubo de drenaje, para que recibiera el filtrado. Se cerró la válvula de alivio y se ajustó el regulador de manera tal que se aplicará una presión de  $100 \pm 1$  psi ( $690 \pm 6,9$  kPa) en 30 segundos o menos. El período de prueba se inició en el momento de la aplicación de la presión.

3. Al final de los 30 minutos, se midió el volumen de filtrado. Se interrumpió el flujo que pasa por el regulador de presión y se abrió cuidadosamente la válvula de alivio. El intervalo de tiempo, si no es de 30 segundos, deberá registrarse.
4. Se registró el volumen de filtrado en centímetros cúbicos (con una precisión de 0,1 cm<sup>3</sup>) como filtrado API, además se registró la temperatura inicial del fluido en grados Celsius (°C).
5. Se desmontó la celda y se desechó el fluido con extremo cuidado para guardar el papel filtro con un mínimo de perturbación del revoque. Se lavó el revoque sobre el papel, con un chorro de agua suave. Se midió el espesor del revoque y se registró en 32 avos de pulgada, en milímetros o centímetros.
6. Si bien es prácticamente imposible contar con descripciones estándar, anotaciones como duro, blando, resistente, gomoso, firme, etc. pueden dar una cierta idea de la consistencia del revoque.

En la parte B se realizaron dos procedimientos adicionales(*Baker Hughes INTEQ., 1998*):

***Retorta.***

1. Se limpió y secó el ensamblaje de la retorta y el condensador.
2. Se recogió una muestra de fluido representativa luego del proceso de filtración. (difiere de lo que dice el procedimiento, ya que se realizó según instrucciones del ingeniero químico de lodos)
3. Se llenó la taza de la retorta lentamente, para evitar que quedara aire atrapado. Golpeando suavemente un lado de la taza para sacar el aire. Se colocó la tapa sobre la taza y girando hasta que cerrara bien. Asegurándose de que un pequeño

exceso de fluido saliera por el orificio en la tapa. Limpiando el exceso de fluido de la tapa, evitando presionar la válvula para que no saliera el fluido.

4. Se llenó el cuerpo de la retorta con lana de acero.
5. Se aplicó lubricante/sellante a las roscas en el cuello de la retorta y conectó el condensador. Colocando el ensamblaje de la retorta en la camisa de calentamiento. Cerrar la tapa aislante.
6. Se colocó un recipiente colector limpio y seco por debajo de la salida del condensador.
7. Se puso en funcionamiento la retorta y se esperó 45 minutos. Si el fluido se desborda hacia el recipiente colector, será necesario repetir la prueba. Llenar el cuerpo de la retorta con una cantidad mayor de lana de acero (Paso 4) y repita la prueba.
8. Se dejó que el recipiente colector de líquido se enfriara. Se hizo lectura y registró: (a) el volumen total de líquido; y (b) el volumen de agua en el recipiente colector.

NOTA: Si hay una interfaz de emulsión entre las fases de aceite y agua, dicha emulsión se puede romper calentando la interfaz. Una vez rota la emulsión, deje que el recipiente colector se enfríe. Lea el volumen del agua en el punto más bajo del menisco.

9. Se apagó la retorta. Se Dejó enfriar antes de limpiar.

### ***Densidad.***

1. La base del instrumento se asentó sobre una superficie uniforme.

2. Se llenó la taza, (debe estar limpia y seca), con el fluido sometido a prueba. Luego se tapó la taza llena y se giró la tapa hasta que quedo bien asentada. Asegurándose de que parte del fluido fuera expulsado a través del orificio en la tapa, para así poder liberar el aire o gas que ha quedado atrapado.
3. Se lavó y limpió el fluido que quedó en la parte exterior de la taza. Se colocó el brazo sobre el soporte de la base y equilibró moviendo la guía deslizante a lo largo de la escala graduada. El equilibrio se logra cuando la burbuja se encuentra bajo la línea central.
4. Se realizó lectura de la densidad en el borde de la guía deslizante que mira hacia el filo de cuchilla.
5. Se registró la densidad.

Se analizó la función de cada aditivo de acuerdo con la literatura y según los resultados proporcionados por el análisis de variables. Todo esto ayudó a la identificación de las variables (aditivos) más importantes en la formulación de las suspensiones. Los datos obtenidos en ambas partes A y B se compararon con valores bibliográficos de parámetros reológicos y pérdida de filtrado según la etapa de perforación (ver tabla 9, 10 y 11.).

**Tabla 9. Etapa 1. Valores reológicos, pérdida de filtrado y medición de revoque tomados como referencia para bentonita-agua fresca. (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015)**

PROPIEDADES REOLÓGICAS Y DE FILTRACIÓN.	INTERVALO.
Densidad ( $\rho$ )	1.04 - 1.10 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad Plástica (VP)	16 – 28 cps
Punto de Cedencia (YP)	14 – 30 lb/100 pie <sup>2</sup>
Resistencia de Gel a 10 segundos ( $\tau_{10s}$ )	6 – 12 lb/100 pie <sup>2</sup>
Resistencia de Gel a 10 minutos ( $\tau_{10min}$ )	10 – 24 lb/100 pie <sup>2</sup>
Filtrado (PF)	12 – 20 mL
Revoque (TT)	0.2 – 0.4 cm
pH	9 – 11
Contenidos Sólidos (RTS)	3-6 % V

**Tabla 10. Etapa 2. Valores reológicos, pérdida de filtrado y medición de revoque tomados como referencia para bentonita-agua fresca. (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015)**

PROPIEDADES REOLÓGICAS Y DE FILTRACIÓN.	INTERVALO.
Densidad ( $\rho$ )	1.04 - 1.10 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad Plástica (VP)	16 – 24 cps
Punto de Cedencia (YP)	14 – 26 lb/100 pie <sup>2</sup>
Resistencia de Gel a 10 segundos ( $\tau_{10\text{ s}}$ )	6 – 12 lb/100 pie <sup>2</sup>
Resistencia de Gel a 10 minutos ( $\tau_{10\text{ min}}$ )	8 – 20 lb/100 pie <sup>2</sup>
Filtrado (PF)	12 – 16 mL
Revoque (TT)	0.2 – 0.3 cm
pH	9 – 10
Contenidos Sólidos (RTS)	3-6 % V

**Tabla 11. Etapa 3 Valores reológicos, pérdida de filtrado y medición de revoque tomados como referencia para bentonita-agua fresca. (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015)**

PROPIEDADES REOLÓGICAS Y DE FILTRACIÓN.	INTERVALO.
Densidad ( $\rho$ )	1.04 - 1.10 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad Plástica (VP)	14 – 18 cps
Punto de Cedencia (YP)	12 – 20 lb/100 pie <sup>2</sup>
Resistencia de Gel a 10 segundos ( $\tau_{10\text{ s}}$ )	4 – 8 lb/100 pie <sup>2</sup>
Resistencia de Gel a 10 minutos ( $\tau_{10\text{ min}}$ )	8 – 16 lb/100 pie <sup>2</sup>
Filtrado (PF)	8 – 12 mL
Revoque (TT)	0.1 – 0.2 cm
pH	9 – 10
Contenidos Sólidos (RTS)	2-5 % V

En el caso de la Etapa 4 será perforada en su totalidad con pérdida de circulación total, cuyo volumen de fluido necesario depende del diámetro del agujero, la profundidad y el volumen contenido por casing (diámetro de tubería). (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015)

Nota: Aunque se sepa que lo mejor es dejar como mínimo 24 horas de reposo el fluido, se realizaron los estudios a 2 horas por el factor tiempo en los procesos de perforación realizados por LaGeo.

En la parte B de acuerdo con lo obtenido en la parte anterior se estableció cuales aditivos favorecen las suspensiones para cumplir con las características reológicas y pérdida de filtrado según referencia. Esto se realizó siguiendo una secuencia de pasos similar a la parte A:

- Empezando por un análisis preliminar.
- Seguido de la incorporación de:
  - ✓ Un nuevo aditivo: R, del cual se determinó la concentración para ser empleado en las muestras finales.
  - ✓ La variable temperatura.
- Las muestras finales fueron dos suspensiones; una concentración al máximo y la otra al mínimo.
- Terminando con la medición de los parámetros reológicos, densidad y retorta (relación sólidos/agua)

Todo lo descrito se resume en el siguiente esquema (figura 38):

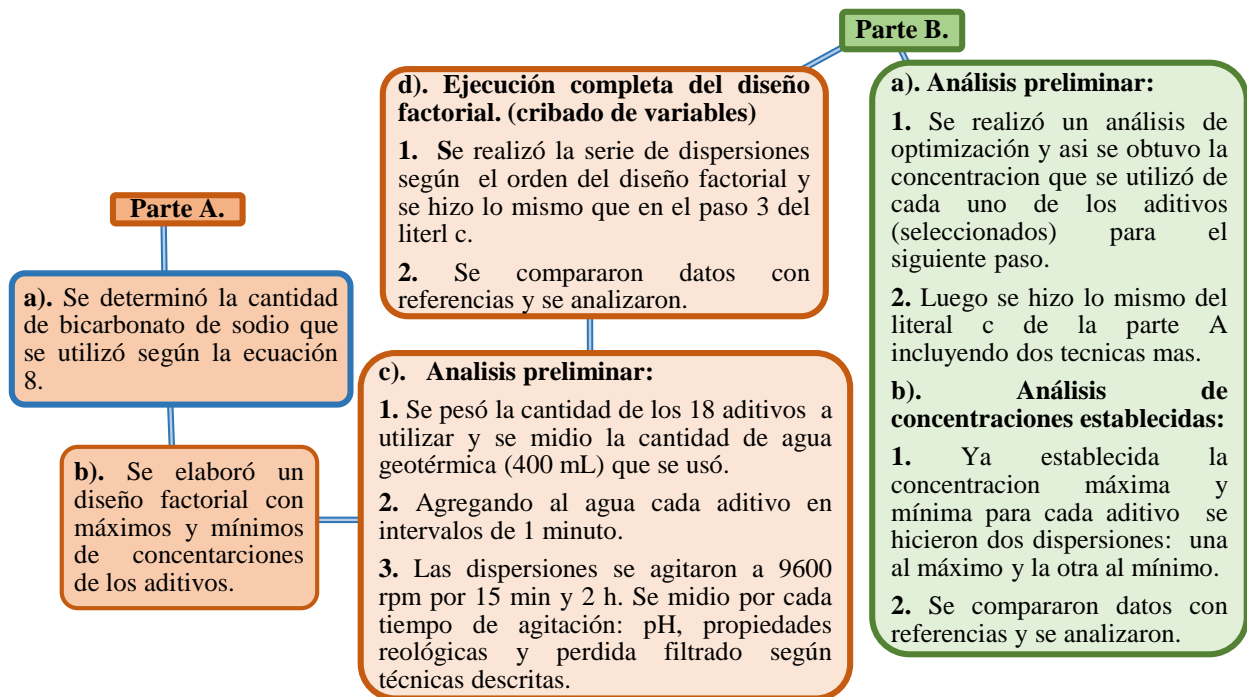


Figura 38. Esquema que resume el procedimiento realizado en la parte A y B.

## **IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **9.1 Resultados.**

Antes de iniciar la parte experimental se llevó a cabo el diseño del cribado de variables (tabla 12) ya que este fue nuestro punto de partida.

#### **PARTE A.**

Se inició realizando muestras preliminares que nos permitió verificar el estado del equipo, el material complementario, las deficiencias que este presentaba, determinar el tiempo en que cada aditivo se agregó y el tiempo de agitación de la mezcla inicialmente (15 min). La tabla 12 muestra la cantidad de aditivos en gramos utilizados para las muestras de la 3 a la 25,

Para esta parte se obtuvieron sus observaciones respectivas de gran importancia ya que nos permitió afinar los pasos a seguir para la siguiente etapa.

Es importante mencionar que no existía una metodología previa mencionada en la bibliografía hasta la fecha, razón por la cual parte de la investigación fue desarrollar el método con las técnicas disponibles.

La tabla 13 presenta los datos obtenidos de las cinco muestras que se realizaron al inicio de la investigación las cuales permitieron establecer condiciones de trabajo: tiempo de agitación, modificación de concentraciones, agitación y tiempo de adición para cada aditivo.

**Tabla 12. Cribado de variables.**

Aditivos																		
#	A	B	C	D	E	F	*G	H	I	J	K	L	*M	N	Ñ	*O	P	Q
1	0.5	0.015	17.1	17.1	1.15	0.6	0.025	1.15	1.7	0.6	4.6	1.15	0.8	1.15	1.15	0.55	1.15	1.15
2	0.5	0.15	5.7	17.1	2.3	0.6	0.025	1.15	0.3	6.85	0.6	2.3	0.1	1.15	1.15	0.55	3.4	1.15
3	0.25	0.15	17.1	2.85	2.3	5.7	0.025	1.15	0.3	0.6	4.6	1.15	0.8	0.1	1.15	0.55	3.4	3.4
4	0.25	0.015	17.1	17.1	1.15	5.7	0.05	1.15	0.3	0.6	0.6	2.3	0.1	1.15	0.15	0.55	3.4	3.4
5	0.5	0.015	5.7	17.1	2.3	0.6	0.05	4	0.3	0.6	0.6	1.15	0.8	0.1	1.15	0.15	3.4	3.4
6	0.5	0.15	5.7	2.85	2.3	5.7	0.025	4	1.7	0.6	0.6	1.15	0.1	1.15	0.15	0.55	1.15	3.4
7	0.5	0.15	17.1	2.85	1.15	5.7	0.05	1.15	1.7	6.85	0.6	1.15	0.1	0.1	1.15	0.15	3.4	1.15
8	0.5	0.15	17.1	17.1	1.15	0.6	0.05	4	0.3	6.85	4.6	1.15	0.1	0.1	0.15	0.55	1.15	3.4
9	0.25	0.15	17.1	17.1	2.3	0.6	0.025	4	1.7	0.6	4.6	2.3	0.1	0.1	0.15	0.15	3.4	1.15
10	0.5	0.015	17.1	17.1	2.3	5.7	0.025	1.15	1.7	6.85	0.6	2.3	0.8	0.1	0.15	0.15	1.15	3.4
11	0.25	0.15	5.7	17.1	2.3	5.7	0.05	1.15	0.3	6.85	4.6	1.15	0.8	1.15	0.15	0.15	1.15	1.15
12	0.5	0.015	17.1	2.85	2.3	5.7	0.05	4	0.3	0.6	4.6	2.3	0.1	1.15	1.15	0.15	1.15	1.15
13	0.25	0.15	5.7	17.1	1.15	5.7	0.05	4	1.7	0.6	0.6	2.3	0.8	0.1	1.15	0.55	1.15	1.15
14	0.25	0.015	17.1	2.85	2.3	0.6	0.05	4	1.7	6.85	0.6	1.15	0.8	1.15	0.15	0.55	3.4	1.15
15	0.25	0.015	5.7	17.1	1.15	5.7	0.025	4	1.7	6.85	4.6	1.15	0.1	1.15	1.15	0.15	3.4	3.4
16	0.25	0.015	5.7	2.85	2.3	0.6	0.05	1.15	1.7	6.85	4.6	2.3	0.1	0.1	1.15	0.55	1.15	3.4
17	0.5	0.015	5.7	2.85	1.15	5.7	0.025	4	0.3	6.85	4.6	2.3	0.8	0.1	0.15	0.55	3.4	1.15
18	0.5	0.15	5.7	2.85	1.15	0.6	0.05	1.15	1.7	0.6	4.6	2.3	0.8	1.15	0.15	0.15	3.4	3.4
19	0.25	0.15	17.1	2.85	1.15	0.6	0.025	4	0.3	6.85	0.6	2.3	0.8	1.15	1.15	0.15	1.15	3.4
20	0.25	0.015	5.7	2.85	1.15	0.6	0.025	1.15	0.3	0.6	0.6	1.15	0.1	0.1	0.15	0.15	1.15	1.15

**Número de pruebas (#)**

**Masa en gramos para 400 mL de agua geotérmica.**

**\*Volumen en mL para 400 mL de agua geotérmica.**

**0.025 mL= 2 gotas**

**0.05 mL= 4 gotas**

**0.1mL= 8 gotas**

**0.8 mL= 32 gotas**

**0.15 mL= 6 gotas**

**0.55 mL= 22 gotas**

**Tabla 13. Datos preliminares obtenidos para cinco muestras de lodo de perforación a diferentes concentraciones.**

M	pH <sub>AG</sub>	pH <sub>M</sub>	T <sub>AG</sub> °C	T <sub>M</sub> °C	T <sub>A</sub> °C	VA	VP	YP	τ <sub>10 s</sub>	τ <sub>10 min</sub>	Agitación	rpm
1	6	8	26.4	24.4	27.8	∅	∅	∅	28	29	15 min.	-
	-		-	-	-	∅	∅	∅	63	71	1 h	-
2	6	8	26.4	25.3	27.9	16.5	14	5	24	53	15 min.	800-1200
	-	-	-	-	-	16.25	15.5	1.5	4	7	2 h	800-1200
3	6	8	28	25.4	30.1	4.75	4.5	0.5	0.5	3	15 min.	960
	-	-	-	-	-	6.5	6.5	0	2	4.5	2 h	960
4	5	8	27.2	27	29.3	42.5	∅	∅	4	5	15 min.	960
	-	-	-	-	-	55	36	38	7	8	2 h	960
5	6	8	27.5	-	27.8	18.5	21	5	7	25	15 min.	960
	-	-	-	-	-	18.25	14	8.5	3	4	2 h	960

Muestra (M)

pH agua geotérmica (pH<sub>AG</sub>)

pH de la muestra (pH<sub>M</sub>)

Temperatura de agua geotérmica (T<sub>AG</sub>) en °C

Temperatura de la muestra (T<sub>M</sub>) en °C

Temperatura ambiente (T<sub>A</sub>) en °C

Viscosidad Aparente (VA) en cps

Viscosidad plástica (VP) en cps

Punto cedente (YP) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Fuerza gel a 10 segundos (τ<sub>10 s</sub>) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Fuerza gel a 10 minutos (τ<sub>10 min</sub>) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Revoluciones por minuto (rpm)

Agitación en horas (h) y minutos (min)

Dato inmedible (∅) (por oscilación de datos)

No se tomaron (-)

El tiempo de adición de cada aditivo fue de 1 min

**Tabla 14. Datos obtenidos para cada muestra del cribado de variables para lodo de perforación a diferentes concentraciones.**

M	pH <sub>AG</sub>	T <sub>AG</sub> °C	pH <sub>M</sub>	T <sub>M</sub> °C	T <sub>A</sub> °C	VA	VP	YP	τ <sub>10 s</sub>	τ <sub>10 min</sub>	Agitación	rpm	PF mL	Revoque cm
6	6-7	28.2	8	27.7	29	41.25	31	20.5	5	8	15 min.	960	-	AL=0.185
	-	-	-	-	-	53	34.5	37	7	7	2 h	960	15.6	DL=0.155
7	6-7	27.1	6	25.8	28.2	21	12	18	17	17	15 min.	960	-	AL=0.610
	-	-	-	-	-	25	15	20	4.5	85	2 h	960	43.4	DL=0.535
8	6-7	24.6	8	24.6	25.6	17.5	14.5	6	0.5	2.5	15 min.	960	-	AL=0.205
	-	-	-	-	-	18	15	6	1	2	2 h	960	30.4	DL=0.110
9	6-7	25.9	8	25.9	28.2	18.5	23	9	7	6	15 min.	960	-	AL=0.355
	-	-	-	-	-	17	13.5	7	2	11	2 h	960	16.8	DL=0.180
10	6-7	25.3	8	26.9	26.4	25.25	21.5	7.5	2	3	15 min.	960	-	AL=0.395
	-	-	-	-	-	23.25	18.5	9.5	4	3	2 h	960	22.8	DL=0.320
11	6-7	25.2	8	25.3	25.7	27.5	21.5	12	1	2	15 min.	960	-	AL=0.105
	-	-	-	-	-	50	28	44	6.5	8	2 h	960	7	DL=0.080
12	6-7	25.9	8	25.3	27.5	16.5	15	3	0.5	1	15 min.	960	-	AL=0.200
	-	-	-	-	-	15.75	15	1.5	1	1	2 h	960	11.6	DL=0.065
13	6-7	25.9	6	24.7	26.9	5.75	11.5	4.5	2	4	15 min.	960	-	AL=1.30
	-	-	-	-	-	6	6	0	1	1.5	2 h	960	173.4	DL=0.225
14	6-7	25.9	8	25.3	27.1	24.75	18.5	12.5	1	2	15 min.	960	-	AL=0.245
	-	-	-	-	-	30.25	21	18.5	2	2.5	2 h	960	14.4	DL=0.115
15	6-7	25.8	6	25.5	26.1	14.5	14	1	2	3	15 min.	960	-	AL=0.190
	-	-	-	-	-	16.75	15.5	2.5	0	1	2 h	960	15.6	DL=0.090
16	6-7	26	5.5	25.5	26.4	12.5	13	1	2.5	4	15 min.	960	-	AL=0.770
	-	-	-	-	-	13	9.5	7	2	3	2 h.	960	49.2	DL=0.460
17	6-7	25.7	8	26.3	27.4	21.75	17	9.5	2	3	15 min.	960	-	AL=0.235
	-	-	-	-	-	24	17	14	7	3	2 h	960	17.8	DL=0.135
18	6-7	25.5	8	25.9	25.7	50.5	39.5	22	3.5	4.5	15 min.	960	-	AL=0.158
	-	-	-	-	-	55.25	39	32.5	5	6	2 h.	960	15.4	DL=0.150
19	6-7	26.2	5.5	26.2	28.3	23.5	24	1	1.5	3	15 min.	960	-	AL=0.155

	-	-	-	-	-	19.25	16	6.5	1.5	2.5	2 h	960	10.6	DL=0.089
20	6-7	26.1	8	26.8	28.6	42.5	28	27	4	5.5	15 min.	960	-	AL=0.240
	-	-	-	-	-	55.5	29.5	52	5	6.5	2 h	960	8.4	DL=0.205
21	6-7	25.3	5	25.6	26.7	19.25	24	9.5	1	3	15min.	960	-	AL=0.345
	-	-	-	-	-	8	8	0	1	1	2 h	960	11	DL=0.100
22	6-7	25.3	5.5	25.4	26.6	12.25	10.5	3.5	3	6	15min.	960	-	AL=0.445
	-	-	-	-	-	8.75	9	0.5	1	1.5	2 h	960	29.1	DL=0.135
23	6-7	25.1	7.5	24.7	25.5	15.75	15	1.5	0.5	32	15min.	960	-	AL=0.245
	-	-	-	-	-	20	16	8	2	2.5	2 h	960	10.2	DL=0.110
24	6-7	25.4	5.5	25.7	26.7	13.25	12	0.5	0.5	15	15min.	960	-	AL=0.190
	-	-	-	-	-	9.25	7	4.5	1	2	2 h	960	21.2	DL=0.130
25	6-7	28.4	8	26.9	29.1	5.5	5.5	0	0.5	2	15 min.	960	-	AL=0.620
	-	-	-	-	-	5.5	5.5	0	0.5	1	2 h	960	50	DL=0.125

Muestra (M)

pH agua geotérmica ( $pH_{AG}$ )

pH de la muestra ( $pH_M$ )

Temperatura de agua geotérmica ( $T_{AG}$ ) en °C

Temperatura de la muestra ( $T_M$ ) en °C

Temperatura ambiente ( $T_A$ ) en °C

Viscosidad Aparente ( $VA$ ) en cps

Viscosidad plástica ( $VP$ ) en cps

El tiempo de adición de cada aditivo fue de 1 min

Punto cedente ( $YP$ ) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Fuerza gel a 10 segundos ( $\tau_{10s}$ ) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Fuerza gel a 10 minutos ( $\tau_{10min}$ ) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Revoluciones por minuto (rpm)

Agitación en horas (h) y minutos (min)

Perdida de filtrado (PF) en mililitros (mL)

Grosor Antes de lavar (AL) en centímetros (cm)

Grosor Después de lavar (DL) en centímetros (cm)

Los valores presentados en la tabla 14 muestran los resultados del cribado de variables después de establecer las condiciones de trabajo Además de las siguientes observaciones:

1. Para la muestra 13 se aumentó el pH=8 (con 0.5 gr de A) y la cantidad de filtrado disminuyo, pero en una mínima cantidad. (23.6 mL).
2. Las muestras 13, 14, 15, 16, 18 y 19 presentaron una variación en el pH después de 2 horas de agitación con respecto a la primera medición que se realizó después de 15 minutos en agitación:
  - 13,  $pH_{M15min.} = 6$ ,  $pH_{M2h.} = 6$
  - 14,  $pH_{M15min.} = 8$ ,  $pH_{M2h.} = 7.18$
  - 15,  $pH_{M15min.} = 6.38$ ,  $pH_{M2h} = 6.57$
  - 16,  $pH_{M15min.} = 5.61$ ,  $pH_{M2h} = 5.67$
  - 18,  $pH_{M15min.} = 7.72$ ,  $pH_{M2h.} = 7.95$
  - 19,  $pH_{M15min.} = 5.43$ ,  $pH_{M2h} = 5.34$

Nota: La medición del pH después de 2 horas se tomó únicamente a las muestras antes mencionadas.

- Después del lavado, las tortas de cada muestra presentaron aparente flexibilidad y viscosidad excepto la muestra 13.

Estos resultados fueron de gran ayuda para realizar la etapa B.

## PARTE B.

En esta parte se llevaron a cabo pruebas preliminares utilizando 4 diferentes cantidades de aditivos (todos, nueve, siete y seis: este último con cuatro variaciones) y concentraciones de cada uno de ellos como se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 15. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 26 según valores esperados para cada parámetro medido.**

Valores esperados	Aditivos utilizados	Cantidad utilizada en gramos
AV = 20-59.72 cps PV = 0-37.12 cps YP = 0-42.87 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10s}$ = 4-4 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10min}$ = 0-185.2 lb/100 pie <sup>2</sup> PF = 0-406.2 mL TT = 0-0.17 cm pH = 8.26	D	2.85
	L	2.30
	I	0.30
	N	1.15
	Ñ	1.10
	O	0.30
	A	0.49
	B	0.015
	C	17.87
	E	1.15
	F	2.20
	G	0.11
	H	3.75
	J	2.49
	K	3.63
M	0.40	
P	3.37	
Q	3.40	

En la tabla 15 se presentan todas las variables (aditivos) con sus respectivas concentraciones utilizadas y rango de valores esperados por cada parámetro medido, obtenido a través del análisis de optimización.

**Tabla 16. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 27 según valores esperados para cada parámetro medido.**

Valores esperados	Aditivos utilizados	Cantidad utilizada en gramos
AV = 2.18-35.71 cps PV = 2.8-22.4 cps YP = 0-29.07 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10s}$ = 1.6-6.5 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10min}$ = 13-30 lb/100 pie <sup>2</sup> PF = 35.4-46.1 mL TT = 0.1-0.29 cm pH = 5.3-9.5	D	2.85
	L	1.71
	I	0.68
	N	1.15
	Ñ	0.67
	O	0.30
	A	0.49
	B	0.02
	C	6.87

En la tabla 16 se presentan nueve variables (aditivos) con sus respectivas concentraciones utilizadas y rango de valores esperados por cada parámetro medido, obtenido a través del análisis de optimización.

**Tabla 17. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 28 según valores esperados para cada parámetro medido.**

Valores esperados	Aditivos utilizados	Cantidad utilizada en gramos
AV = 16 cps PV = 10 cps YP = 13 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10s}$ = 4 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10min}$ = 8.5 lb/100 pie <sup>2</sup> PF = mínimo TT = mínimo pH = máximo	D	2.85
	F	5.7
	I	0.47
	N	1.15
	Ñ	0.7
	P	3.0

En la tabla 17 se presentan seis variables (aditivos) con sus respectivas concentraciones utilizadas y valores esperados por cada parámetro medido, obtenido a través del análisis de optimización.

La muestra 28 es la primera de las cinco variaciones para dicha cantidad de aditivos. En las siguientes tablas: 18, 19, 20 y 21 se presentan las cuatro muestras restantes.

**Tabla 18. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 29 según valores esperados para cada parámetro medido.**

Valores esperados	Aditivos utilizados	Cantidad utilizada en gramos
AV = 16.5 cps	D	2.85
PV = 10 cps	L	1.15
YP = 13 lb/100 pie <sup>2</sup>	I	0.43
$\tau_{10s} = 4$ lb/100 pie <sup>2</sup>	N	0.97
$\tau_{10min} = 8.5$ lb/100 pie <sup>2</sup>	Ñ	1.1
PF = mínimo	P	3.4
TT = mínimo		
pH = máximo		

En la tabla 18 se presentan seis variables (aditivos) con sus respectivas concentraciones y valores esperados por cada parámetro medido, obtenido a través del análisis de optimización. Solo que se produce un cambio de aditivo: F por L, lo que genera variación en la concentración en los últimos cuatro aditivos (con respecto a la tabla 17).

**Tabla 19 Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 30 según valores esperados para cada parámetro medido.**

Valores esperados	Aditivos utilizados	Cantidad utilizada en gramos
AV = 16 cps	D	2.85
PV = 10 cps	F	5.7
YP = 13 lb/100 pie <sup>2</sup>	I	0.47
$\tau_{10s} = 4$ lb/100 pie <sup>2</sup>	N	1.5
$\tau_{10min} = 8.5$ lb/100 pie <sup>2</sup>	Ñ	0.7
PF = mínimo	P	4.0
TT = mínimo		
pH = máximo		

En la tabla 19 se presentan seis variables (aditivos) con sus respectivas concentraciones y valores esperados por cada parámetro medido, obtenido a través del análisis de optimización. Se produce el segundo cambio de aditivo: L por F, lo que genera variación en la concentración de 5 aditivos, desde F hasta P (con respecto a la tabla 18).

**Tabla 20. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 31 según valores esperados para la perdida de filtrado.**

Valores esperados	Aditivos utilizados	Cantidad utilizada en gramos
PF= mínimo TT= mínimo	D	2.85
	F	5.7
	I	1.7
	N	0.1
	Ñ	1.15
	P	3.4

En la tabla 20 se presenta la cuarta y última modificación (seis variables), con sus respectivas concentraciones y valores esperados por cada parámetro medido, cuya concentración para I, N, Ñ y P se ve modificada, a través del análisis de optimización (con respecto a la tabla 19). En este caso solo se presenta valor esperado para la perdida de filtrado y el grosor de la torta.

**Tabla 21. Aditivos y cantidad en masa utilizadas para la muestra 32 según valores esperados para cada parámetro medido.**

Valores esperados	Aditivos utilizados	Cantidad utilizada en gramos
AV = 16.5 cps PV = 10 cps YP = 13 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10s}$ = 4 lb/100 pie <sup>2</sup> $\tau_{10min}$ = 8.5 lb/100 pie <sup>2</sup> PF = mínimo TT = mínimo pH = máximo	D	2.85
	F	5.7
	I	0.31
	N	1.12
	Ñ	0.83
	P	3.4
	L	1.54

En la tabla 21 se presenta la última muestra preliminar de la parte B con sus respectivas concentraciones y valores esperados por cada parámetro medido. Se utilizaron siete variables utilizando las seis de la tabla anterior y L como séptimo aditivo, cambiando así la concentración de I, N, y Ñ, a través del análisis de optimización (con respecto a la tabla 20).

**Tabla 22. Datos preliminares obtenidos para cada muestra de lodo de perforación a diferentes concentraciones.**

M	pH <sub>AG</sub>	T <sub>AG</sub> °C	pH <sub>M</sub>	T <sub>M</sub> °C	T <sub>A</sub> °C	VA	VP	YP	τ <sub>10</sub> s	τ <sub>10</sub> min	Agitación	rpm	PF mL	Reoque cm
26	7.54	25.1	6.93	24.2	24.9	15.5	11	9	1	2	15 min	960		AL=0.205
	-	-	7.30	25.3	-	14.25	14.5	10.5	2	3	2 h	960	18	DL=0.105
27	7.39	25.7	8.64	25.4	25.7	13.75	11	5.5	1	3	15 min	960		AL=0.100
	-	-	8.58	25.5	-	23.5	16	15	4	6	2 h	960	40.6	DL=0.095
28	7.42	24.9	8.24	24.8	24.6	17.25	15.5	3.5	1	2.5	15 min	960		AL=0.110
	-	-	8.43	25.5	-	25	19	12	4	5	2 h	960	20.8	DL=0.100
29	7.51	25.5	7.93	25.7	25.9	21	16.5	9	2.5	3	15 min	960		AL=0.100
	-	-	8.08	25.8	-	21.75	15.5	12.5	3.5	4	2 h	960	82.3	DL=0.075
30	7.36	25.4	8.38	25.7	26.3	17.25	15.5	3.5	1	2	15 min	960		AL=0.160
	-	-	8.43	27.7	-	22.25	10.5	23.5	5	7	2 h	960	26.4	DL=0.105
31	7.39	24.5	8.46	25.1	25	31.25	22.5	17.5	2	3	15 min	960		AL=0.140
	-	-	8.48	27.6	-	42	26	32	3	4	2 h	960	50.6	DL=0.095
32	7.45	25.7	8.12	26	26.8	18.5	17.5	2	2	3	15 min	960		AL=0.090
	-	-	8.35	-	-	21.75	11.5	20.5	3	5	2 h	960	36.3	DL=0.085

Muestra (M)

pH agua geotérmica (pH<sub>AG</sub>)

pH de la muestra (pH<sub>M</sub>)

Temperatura de agua geotérmica (T<sub>AG</sub>) en °C

Temperatura de la muestra (T<sub>M</sub>) en °C

Temperatura ambiente (T<sub>A</sub>) en °C

Viscosidad Aparente (VA) en cps

Viscosidad plástica (VP) en cps

El tiempo de adición de cada aditivo fue de 1 min

Punto cedente (YP) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Fuerza gel a 10 segundos (τ<sub>10 s</sub>) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Fuerza gel a 10 minutos (τ<sub>10 min</sub>) en lb/100 pie<sup>2</sup>

Revoluciones por minuto (rpm)

Agitación en horas (h) y minutos (min)

Perdida de filtrado (PF) en mililitros (mL)

Grosor Antes de lavar (AL) en centímetros (cm)

Grosor Después de lavar (DL) en centímetros (cm)

Los valores presentados en la tabla 22 muestran los resultados preliminares, los cuales permitieron establecer las condiciones de trabajo para las últimas dos pruebas realizadas junto a las siguientes observaciones:

1. Al agregar 0.5g de A la muestra 28 no se genera mayor alteración en la reología:

$$VA = 24.25$$

$$VP = 18$$

$$YP = 12.5$$

$$\tau_{10 \text{ s.}} = 4$$

$$\tau_{10 \text{ min.}} = 5$$

Pero si un aumento en el pH (pH=9.16).

2. Al agregar ocho gotas de M a la muestra 28 (con 0.5g de A) está presento los siguientes datos de pH y reología:

$$\text{pH} = 9.16$$

$$\text{VA} = 42.5$$

$$\text{VP} = 17.5$$

$$\text{YP} = 14$$

$$\tau_{10 \text{ s.}} = 4.5$$

$$\tau_{10 \text{ min.}} = 7$$

3. Se realizaron 2 cambios sobre la muestra 31:

- La primera modificación fue agregar 1.05 gr de N más de lo agregado inicialmente, lo que es el restante para llegar al máximo utilizado en el proceso de este aditivo, se agitó durante 1 hora manualmente y una hora de agitación a 1200 rpm, luego se realizó la medición de la pérdida de filtrado con el cual se obtuvo un volumen de 19.4 mL, menor que el obtenido con la muestra sin modificar.

Antes de lavar se obtuvo una torta de 0.095 cm, después de lavar midió 0.085 cm.

- La segunda modificación fue adicionar a la muestra anterior (con 1.05 g de N) 32 gotas de M, (máximo utilizado en el proceso). Inicialmente esta muestra no contenía ninguna cantidad de este aditivo, debido a observaciones experimentales anteriores se tomó la decisión de agregarlo. Esta mezcla se agitó durante 5 minutos a 1600 rpm, luego se realizó la medición de la pérdida de filtrado el cual fue de 16.2 mL, menor que el volumen inicial y el volumen con la primera modificación.

Se obtuvo torta de 0.140 cm antes de lavar, después de lavar de 0.090 cm.

4. La muestra 31 tuvo un total de 5 horas y 5 minutos aproximadamente de envejecimiento.

**Determinación del grado de basicidad o acidez de cada uno de los aditivos con agua geotérmica.**

Con la metodología inicial el pH de las suspensiones no superaba el valor mínimo de referencia, que es 9. No cumpliendo así con esta condición. Entonces se procedió a evaluar el grado de basicidad o acidez que cada uno de los aditivos presentaba con el agua geotérmica.

Se agregó 0.5 g de cada aditivo en 20 mL de agua geotérmica.; obteniéndose los valores presentados en la tabla 23.

**Tabla 23.  $pH_M$  obtenido para cada Aditivo con agua geotérmica.**

Aditivos utilizados	$pH_M$	$pH_{AG}$	rpm
<b>A</b>	10.23	7.44	350
<b>B</b>	9.09	7.44	350
<b>C</b>	7.70	7.44	350
<b>D</b>	8.13	7.44	350
<b>E</b>	4.02	7.49	350
<b>F</b>	8.60	7.49	350
<b>H</b>	7.78	7.49	350
<b>I</b>	7.42	7.49	350
<b>J</b>	2.68	7.48	350
<b>K</b>	4.10	7.48	350
<b>L</b>	5.49	7.48	350
<b>N</b>	4.77	7.48	350
<b>G</b>	7.56	7.22	350
<b>O</b>	6.72	7.22	350
<b>M</b>	6.25	7.22	350
<b>Ñ</b>	6.33	7.30	350
<b>P</b>	8.51	7.30	350
<b>Q</b>	8.68	7.30	350

NOTA: Cada muestra se agito por 2 horas.

En esta tabla (23) se puede observar que: el aditivo A presentó el máximo valor de  $pH_M$  y J presentó el menor valor de  $pH_M$  con el agua geotérmica.

Debido a que el agente alcalino utilizado era A se cambió por R que es más fuerte, por lo tanto, para ser empleado bajo nuestras condiciones de trabajo se realizó lo siguiente:

**Determinación de la concentración máxima y mínima de R en agua geotérmica para obtener valores de  $pH = 9$  y  $pH = 11$ .**

La temperatura inicial del agua geotérmica fue de 71.5 °C depositada en un frasco Dewar. En la tabla 24 se muestran solo cuatro valores de la cantidad utilizada de R para pH= 9.05, 11.13, 12 y 13 ya que fueron los necesarios para establecer la concentración de este reactivo en las suspensiones y así garantizar el rango entre 9 a 11

**Tabla 24. Valores de pH del agua geotérmica con R.**

pH	Valor	Masa agregada de R
pH <sub>iAG</sub>	5.23	-
pH <sub>2</sub>	9.05	0.1814g
pH <sub>5</sub>	11.13	0.5506 g
pH <sub>12</sub>	12	1.5252 g
pH <sub>22</sub>	13	3.2879 g

NOTA: Se utilizaron 400 mL de agua geotérmica.

Con lo obtenido anteriormente se plantearon dos muestras, de concentración máxima y mínima de 5 aditivos y la variable temperatura del agua geotérmica.

Para estas dos muestras aparte de los parámetros ya evaluados en la primera parte, se midió:

1. La retorta que se emplea para determinar la cantidad de líquidos y sólidos en el fluido de perforación. Los instrumentos de retorta recomendados son unidades con una capacidad de 10, (utilizado) 20 o 50 cm<sup>3</sup>, con camisas externas de calentamiento. El fluido se colocó en un contenedor de acero y se calentó hasta que se evaporaran los componentes líquidos. Los vapores pasaron a través de un condensador y se recogieron en una probeta. El volumen del líquido se midió, mientras que el contenido de sólidos, se determina por diferencia. Esta medida se representa en porcentaje donde del 100 % una parte es líquido y los otros sólidos.

2. La densidad o peso del fluido se reportó en g/mL.

Estos dos parámetros se midieron solo para estas dos muestras ya que al inicio no se contaba con el equipo, además son las formulaciones finales de la investigación



## 9.2 Discusión de resultados.

Para iniciar la parte A se llevaron a cabo pruebas preliminares que permitieron definir condiciones para ejecutar el diseño factorial (cribado de variables), cuyos resultados se han plasmado en la tabla (13) y se han representado en los siguientes gráficos.

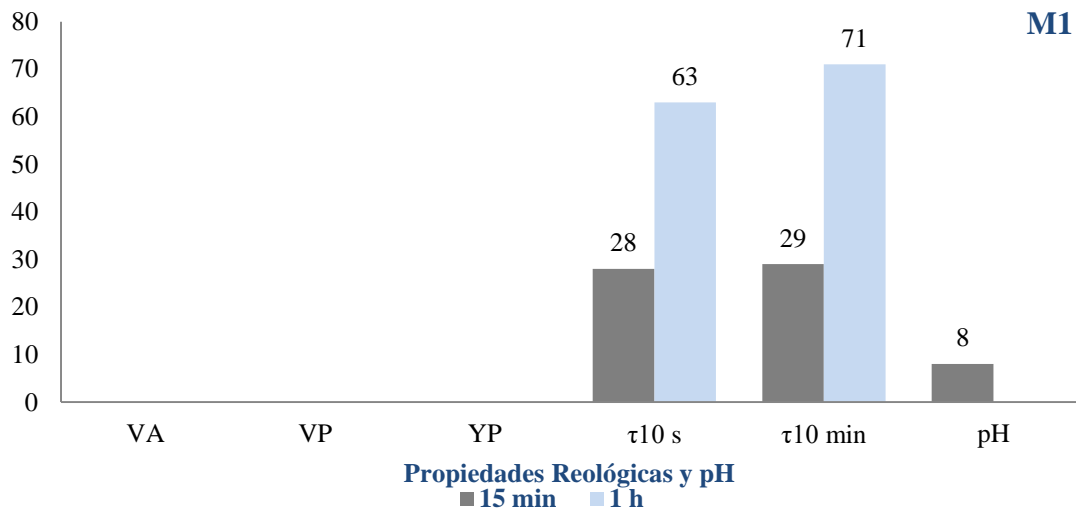


Figura 39. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 1 preliminar para la parte A en 15 min y 1 h.

Para la muestra 1 (figura 39), a 15 min, los valores tomados en el Reómetro no se estabilizaron, oscilaron entre:

- 150 a 215 lb/100 pie<sup>2</sup> (600 rpm) y 95 a 115 – 150 a 156 lb/100 pie<sup>2</sup> (300 rpm).
- A 1 h superó el valor máximo (300 lb/100 pie<sup>2</sup>) medible por el Reómetro a 600 rpm y a 300 rpm fue de 240-245 lb/100 pie<sup>2</sup>. Debido a esto los datos en el gráfico de la figura 39 no se muestran. Solo se agitó hasta una hora ya que en ambos tiempos los valores superaron el rango medible.

A 15 min como a 1h los resultados superan el valor máximo del rango de referencia para las tres etapas (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015) a excepción del pH que es menor.

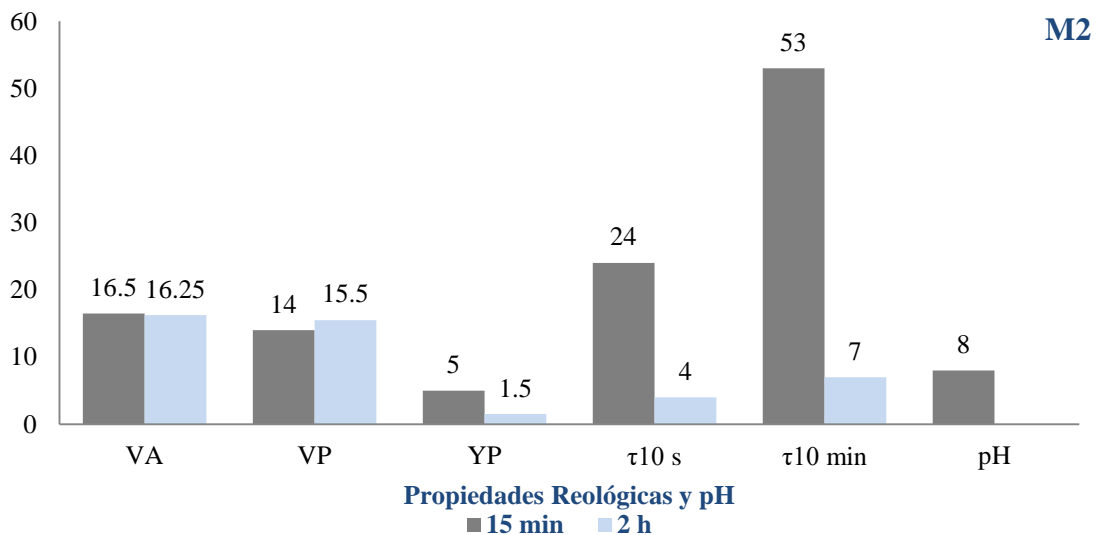


Figura 40. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 2 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.

Se observa (figura 40) que los valores para  $\tau_{10\text{s}}$  y  $\tau_{10\text{min}}$ , son altos a 15 minutos en comparación a 2 horas, VA y YP, disminuyen cuando se toman luego de dichas horas de agitación, en el caso de la VP aumenta.

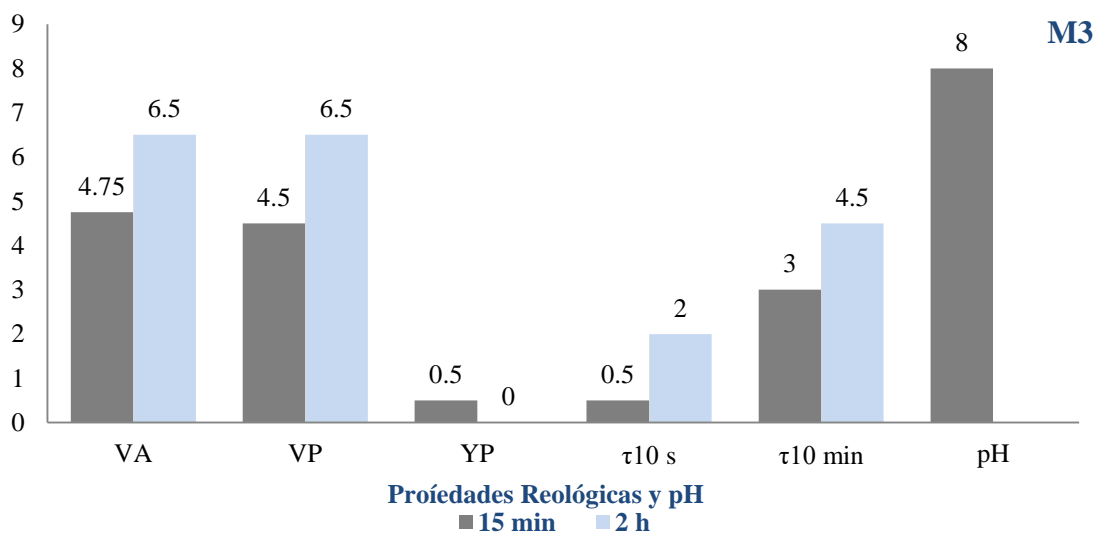
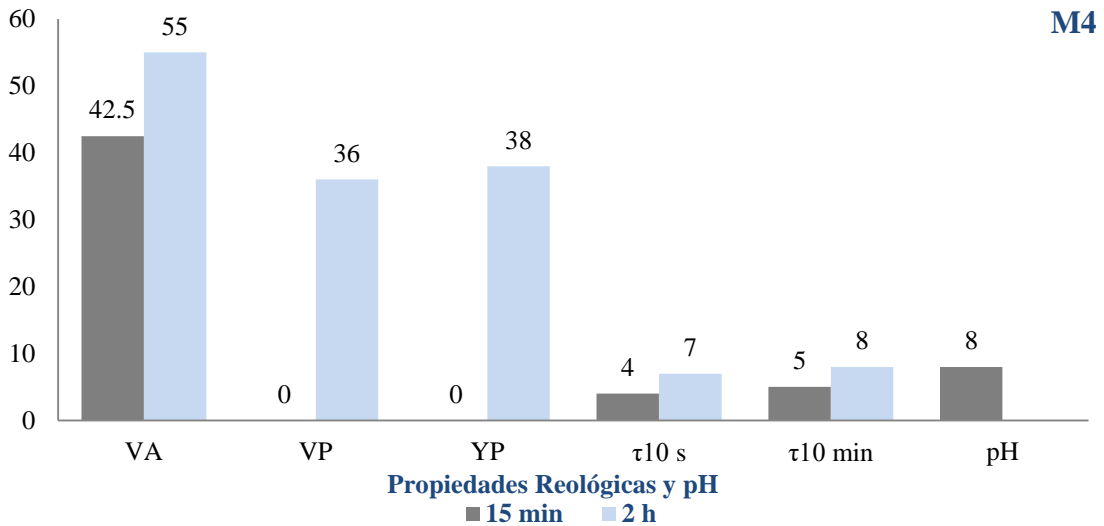


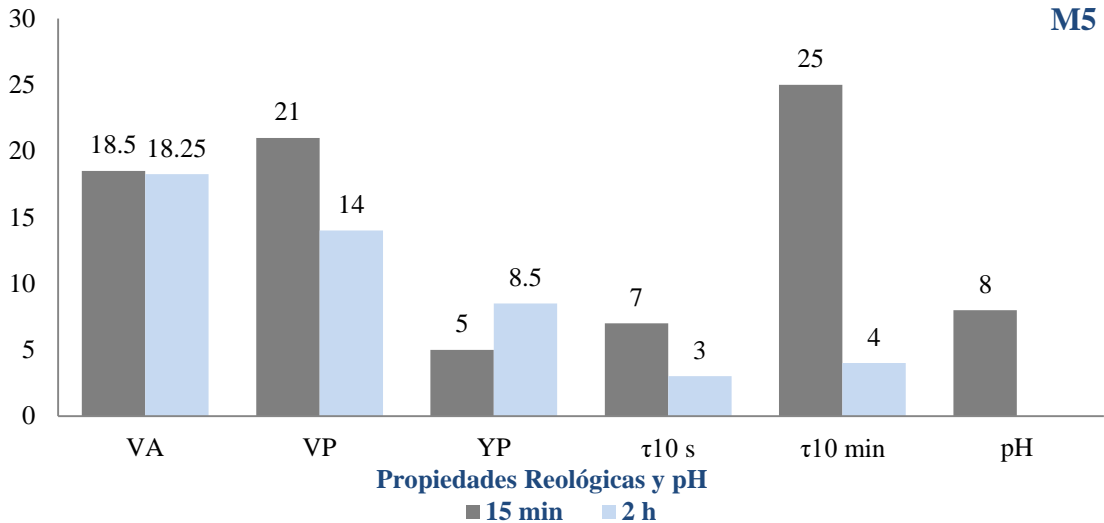
Figura 41. Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 3 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.

En la figura 41 la VA, VP,  $\tau_{10\text{s}}$  y  $\tau_{10\text{min}}$  aumentan después de 2 horas de agitación con respecto a 15 min, no así el YP.



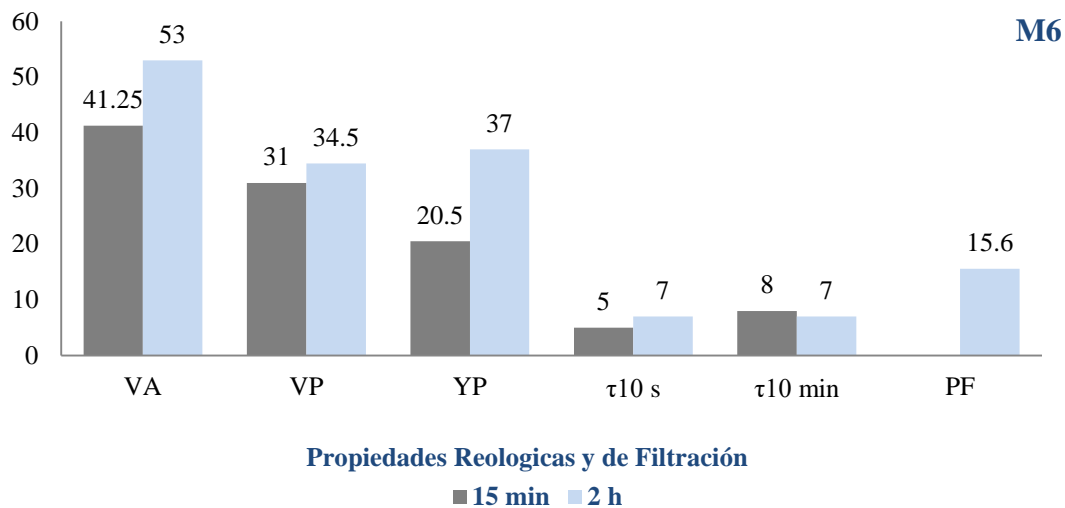
**Figura 42.** Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 4 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.

En el caso de la muestra 4, figura 42 la VA, VP, YP,  $\tau_{10\text{s}}$  y  $\tau_{10\text{min}}$  aumentan después de 2 horas de agitación en comparación a 15 min. Además, se puede notar que YP es cero al primer tiempo de agitación generando un aumento evidente al segundo tiempo.



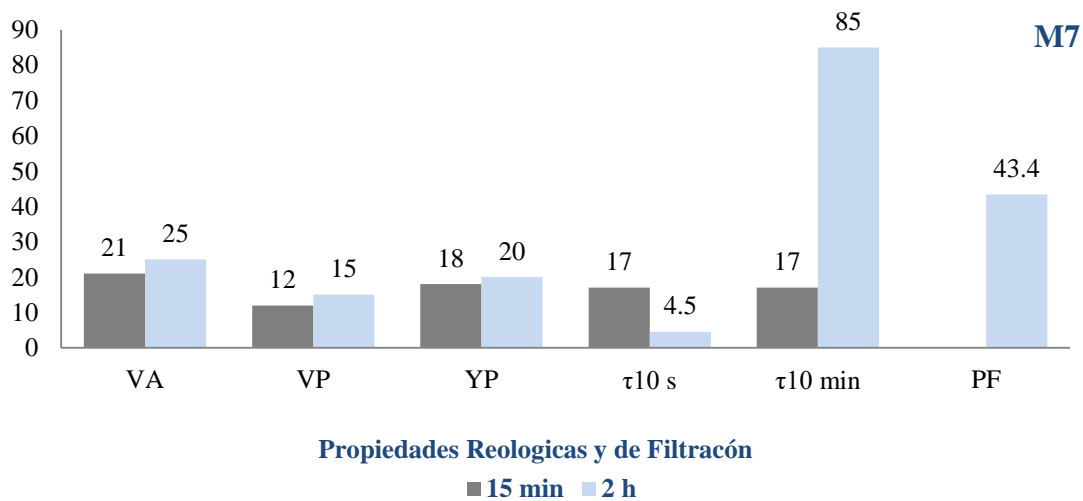
**Figura 43.** Gráfico de propiedades reológicas y pH de la muestra 5 preliminar para la parte A en 15 min y 2 h.

De acuerdo con la figura 43 la VA, VP,  $\tau_{10\text{s}}$  y  $\tau_{10\text{min}}$  después de 2 horas de agitación disminuyen y el YP aumenta. La disminución para  $\tau_{10\text{min}}$  es de 21 lb/pie<sup>2</sup> siendo muy notable en el gráfico.



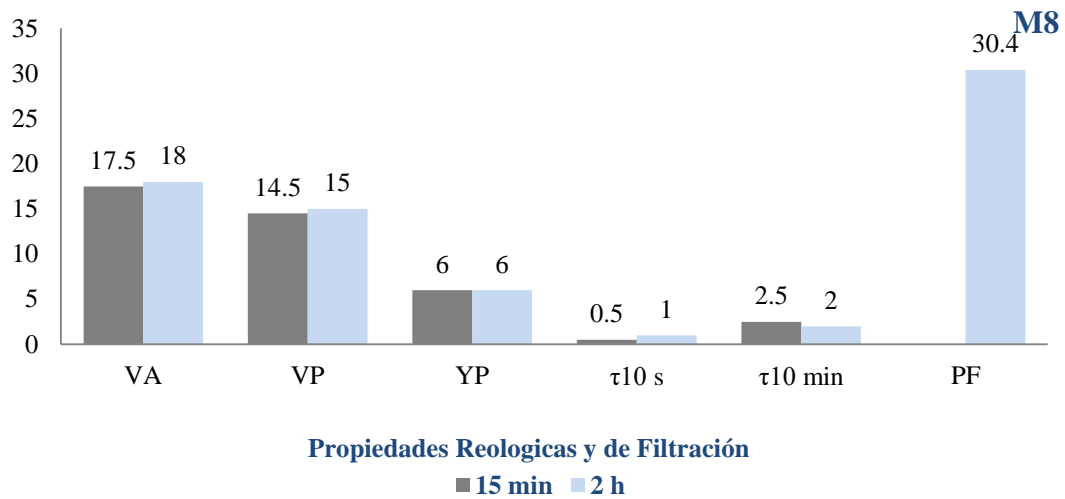
**Figura 44.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 6 después de 15 min y 2 h de agitación.

Según lo valores presentados en la figura 44, las propiedades reológicas después de 2 horas de agitación aumentan a excepción de la  $\tau_{10\text{min}}$  cuya disminución es de 1 lb/pie<sup>2</sup>.



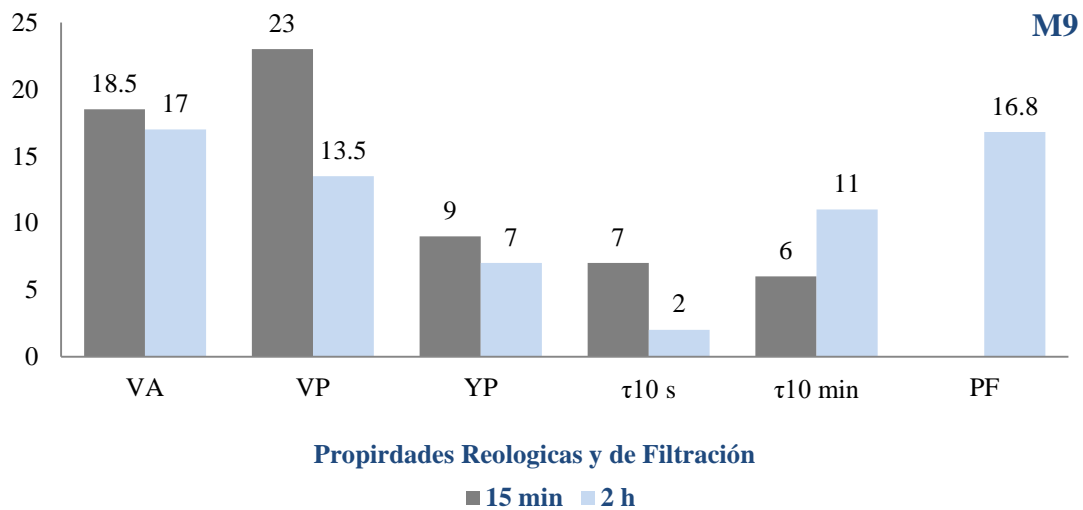
**Figura 45.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 7 después de 15 min y 2 h de agitación.

La figura 45 muestra que las propiedades reológicas aumentan después de 2 horas de agitación, aún más notable para la  $\tau_{10\text{min}}$ . Para la  $\tau_{10\text{s}}$ , a 15 minutos es mayor el valor.



**Figura 46.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 8 después de 15 min y 2 h de agitación.

Las propiedades reológicas en la figura 46, para después de 2 horas de agitación presentan un aumento en la VA, VP y  $\tau_{10\text{s}}$ , excepto la  $\tau_{10\text{min}}$  que disminuye y el YP que en ambos tiempos presentan el mismo valor.



**Figura 47.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 9 después de 15 min y 2 h de agitación.

Después de 2 horas de agitación las propiedades reológicas disminuyen, caso contrario para la  $\tau_{10\text{min}}$  que aumenta de acuerdo a la figura 47.

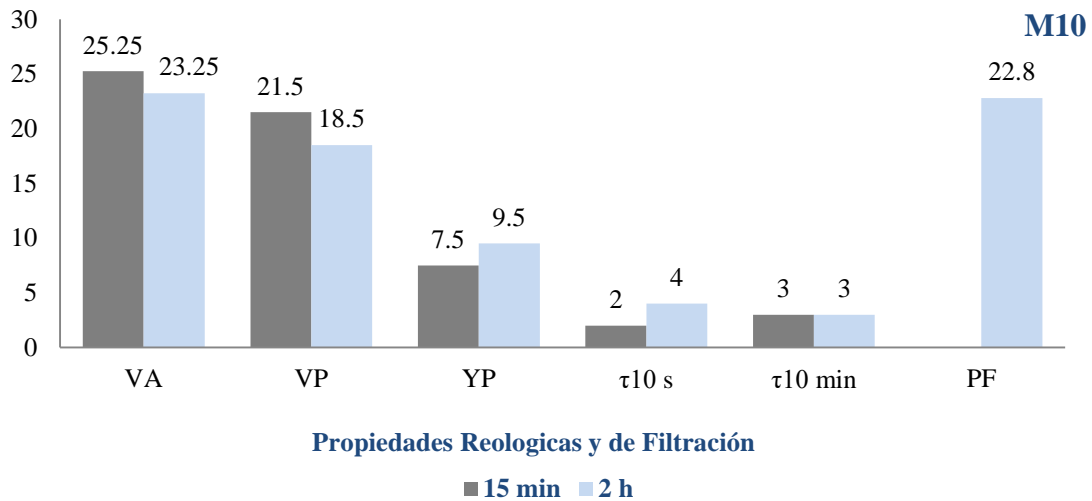


Figura 48. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 10 después de 15 min y 2 h de agitación.

En la figura 48 a VA y la VP después de 2 horas de agitación disminuyen, distinto a lo que sucede con el YP y  $\tau_{10\text{s}}$  que aumentan, situaciones diferentes a lo ocurrido con la  $\tau_{10\text{min}}$  que presentan el mismo valor para los dos tiempos.

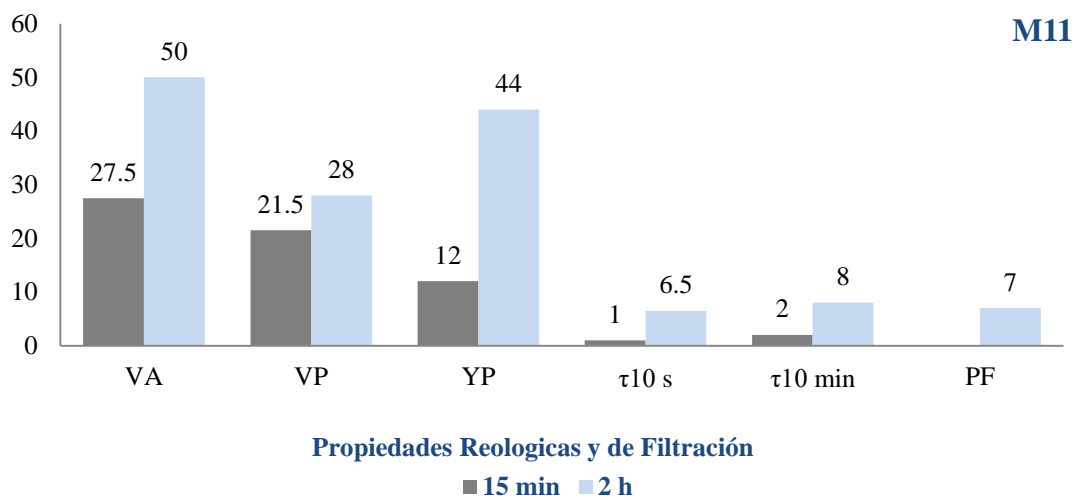


Figura 49. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 11 después de 15 min y 2 h de agitación.

En esta muestra (figura 49) se observa que los valores a las a 2 horas de agitación aumentan.

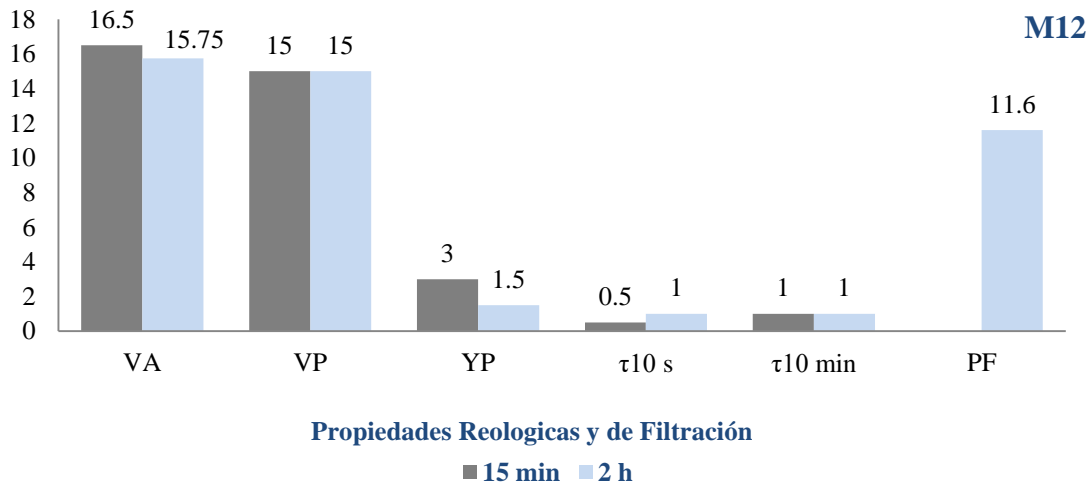


Figura 50. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 12 después de 15 min y 2 h de agitación.

Para los dos tiempos de agitación (figura 50) se observa que el VP y la  $\tau_{10\text{min}}$  son iguales. En el caso de YP y la VA disminuyen, la  $\tau_{10\text{s}}$  aumenta a 2 horas.

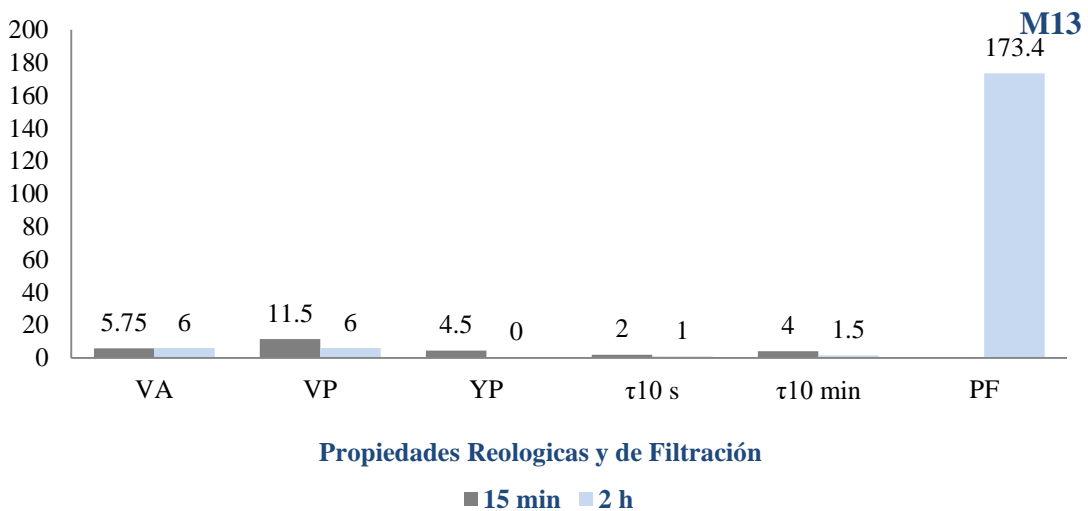


Figura 51. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 13 después de 15 min y 2 h de agitación.

Para esta muestra (figura 51) los valores obtenidos para 15 minutos aumentan, en excepción la VA con 0.25 cps de diferencia. Pero en general son valores muy bajos para ambos tiempos, generando así un valor alto de filtrado por lo que ninguno (2 h) está entre los valores de referencia para las tres etapas, aunque hay una cuarta que es de pérdidas de circulación total cuyo valor de PF depende del diámetro del agujero, la profundidad y el volumen contenido por el casing (diámetro de tubería). (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015).

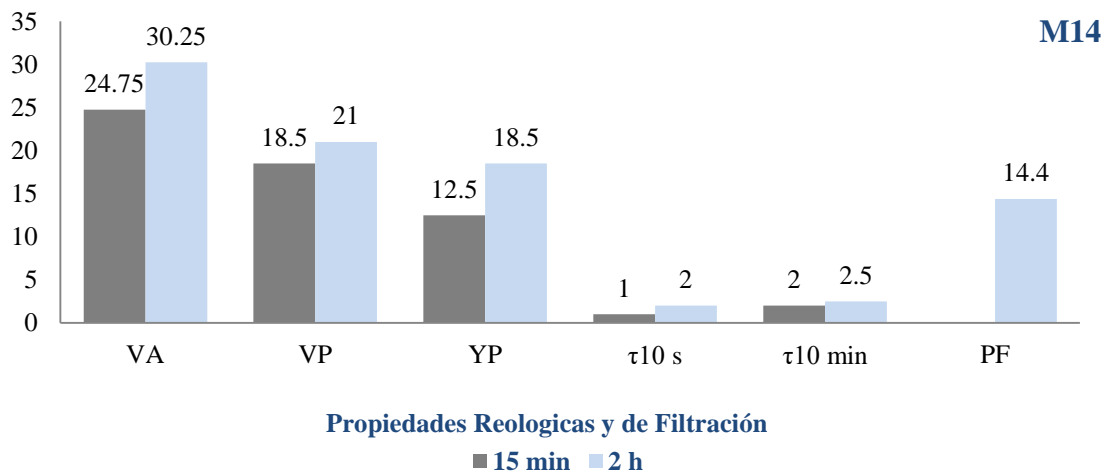


Figura 52. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 14 después de 15 min y 2 h de agitación.

En la figura 52 se observa que los valores a 15 minutos disminuyen.

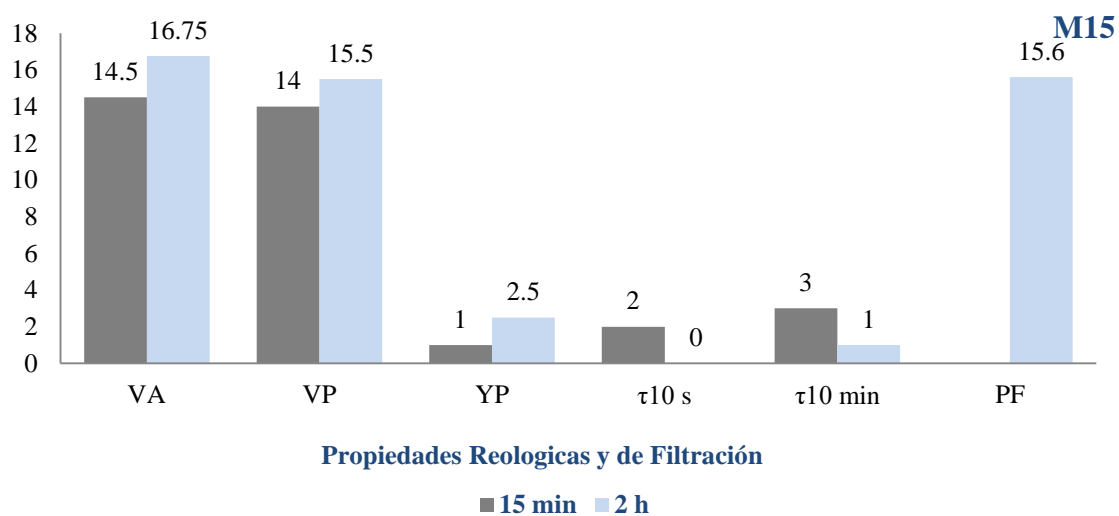
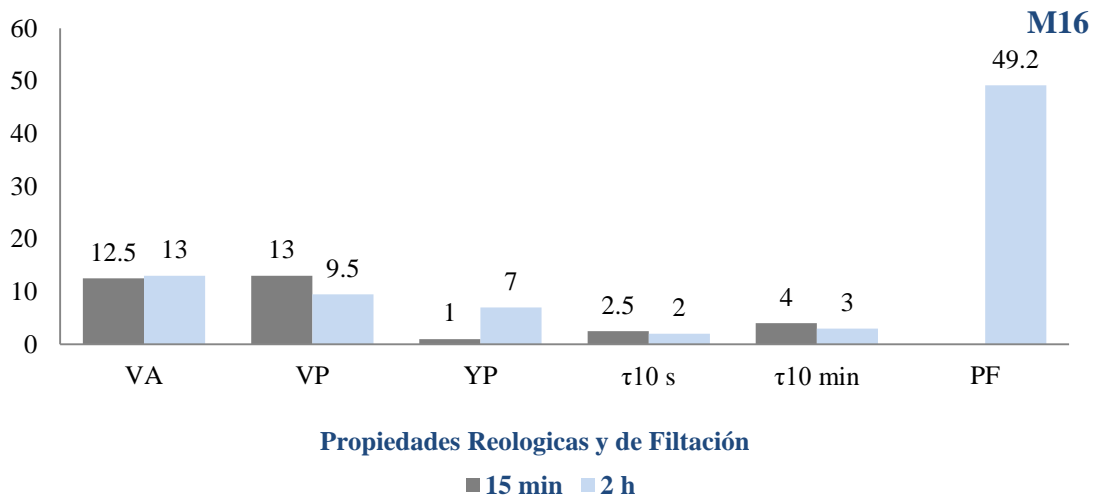


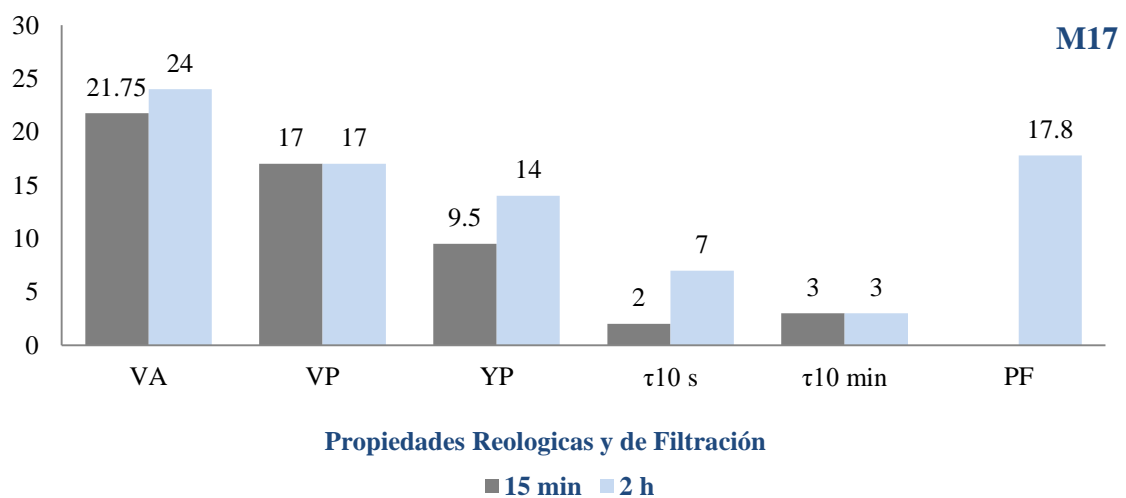
Figura 53. Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 15 después de 15 min y 2 h de agitación.

Las tres primeras propiedades reológicas de izquierda a derecha (figura 53) presentan un aumento en los valores a 2 horas y las otras dos una disminución, presentando la  $\tau_{10\text{s}}$  un valor de cero.



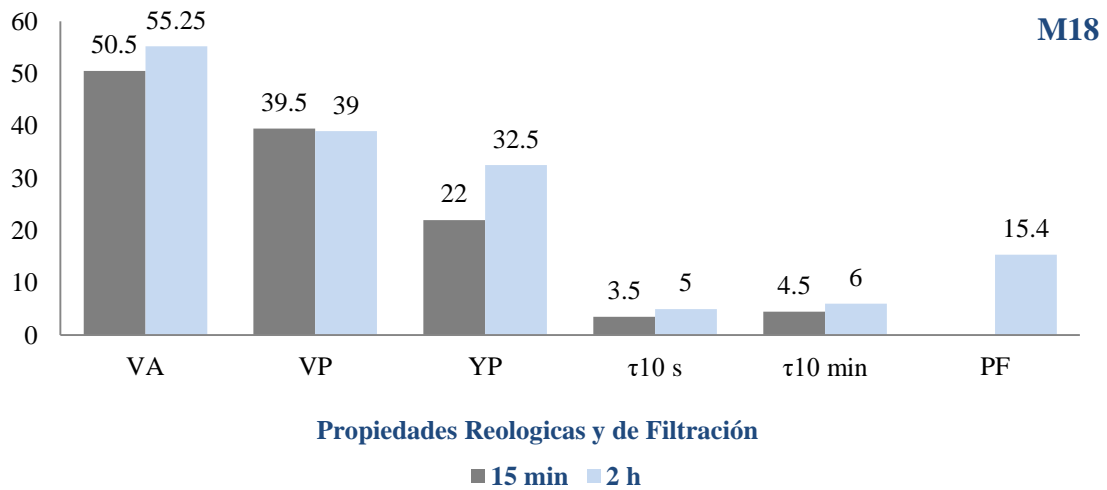
**Figura 54.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 16 después de 15 min y 2 h. de agitación.

De acuerdo con la figura 54 el YP y la VA son los dos parámetros que experimentan un aumento al pasar 2 h. en agitación, en el caso de la VP, la  $\tau_{10\text{s}}$  y a  $\tau_{10\text{min}}$  disminuyen a dicho tiempo. El valor del filtrado obtenido en esta suspensión es el tercero más alto.



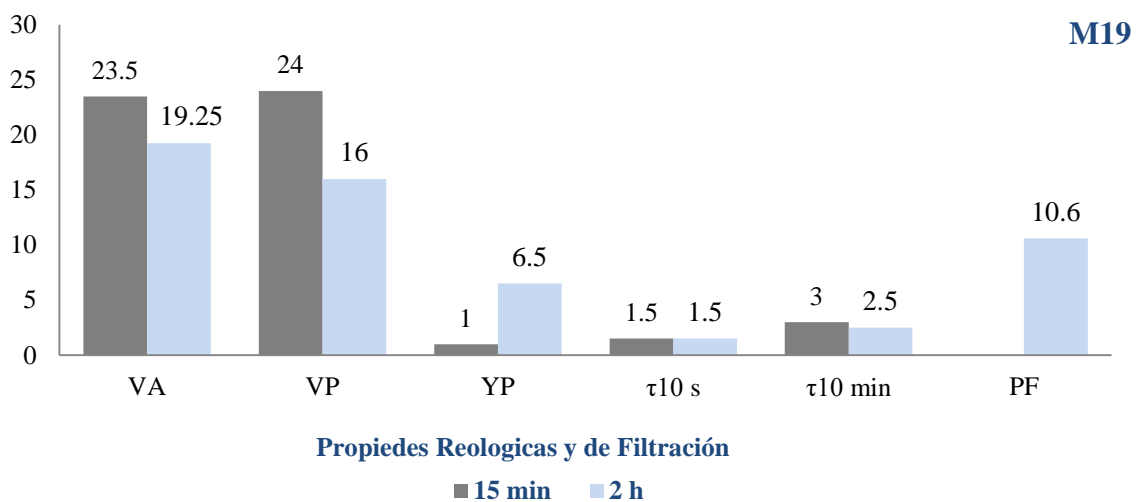
**Figura 55.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 17 después de 15 min y 2 h de agitación.

Cuando las 2 horas de agitación finalizaron se hizo evidente el aumento en la VA, YP y la  $\tau_{10\text{s}}$  (Figura 55), mientras que para la VP y  $\tau_{10\text{min}}$  los valores permanecieron constantes.



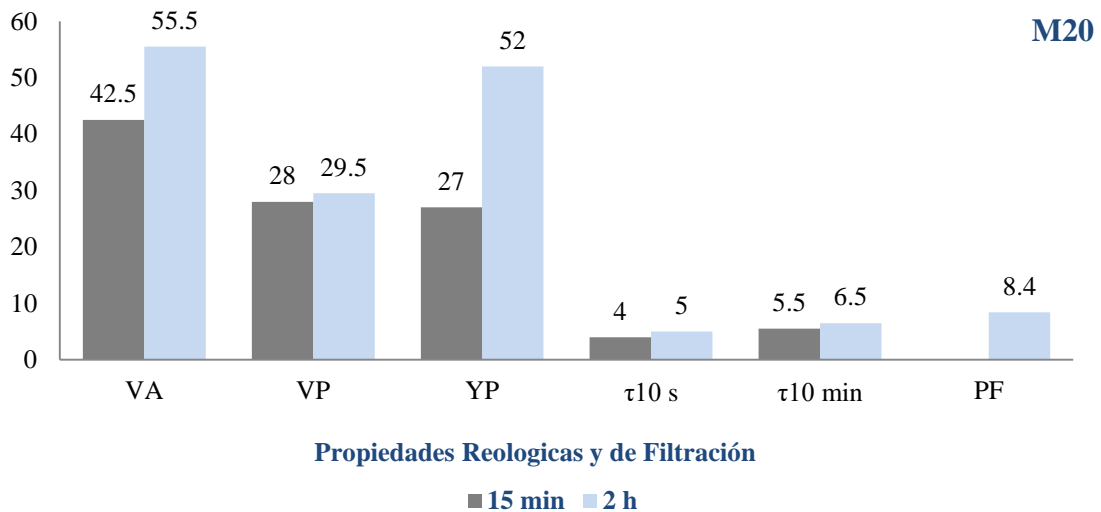
**Figura 56.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 18 después de 15 min y 2 h de agitación.

Las propiedades reológicas (figura 56) como la VA, YP,  $\tau_{10\text{s}}$  y  $\tau_{10\text{min}}$  aumentan al pasar las dos horas de agitación, excepto la VP que disminuye 0.5 cps.



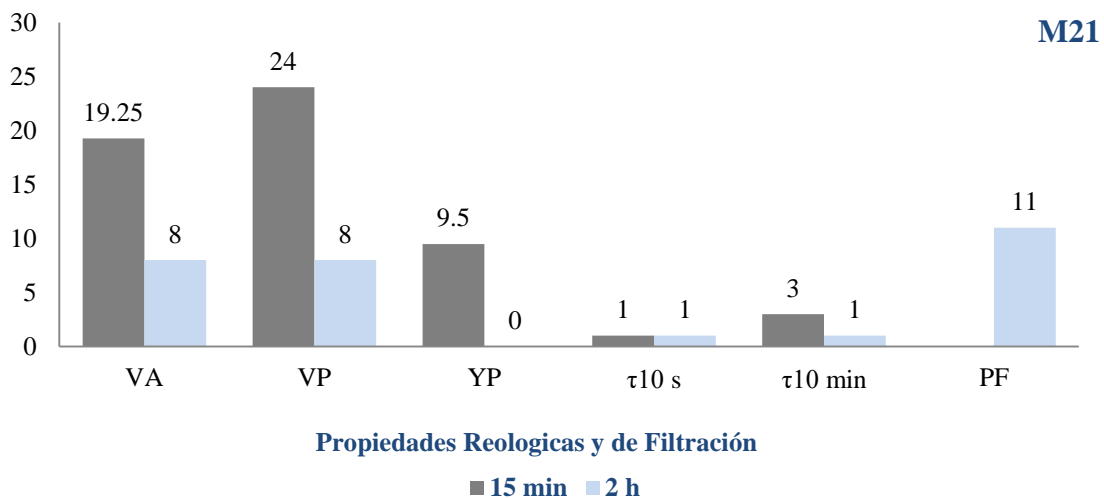
**Figura 57.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 19 después de 15 min y 2 h de agitación.

Cuando han sido 15 minutos el tiempo de agitación (figura 57) los valores de VA, VP y  $\tau_{10\text{min}}$ , son mayores con respecto a los valores obtenidos a dos horas. Lo contrario sucede con el valor de YP que es menor, mientras que el valor de la  $\tau_{10\text{s}}$  se mantiene.



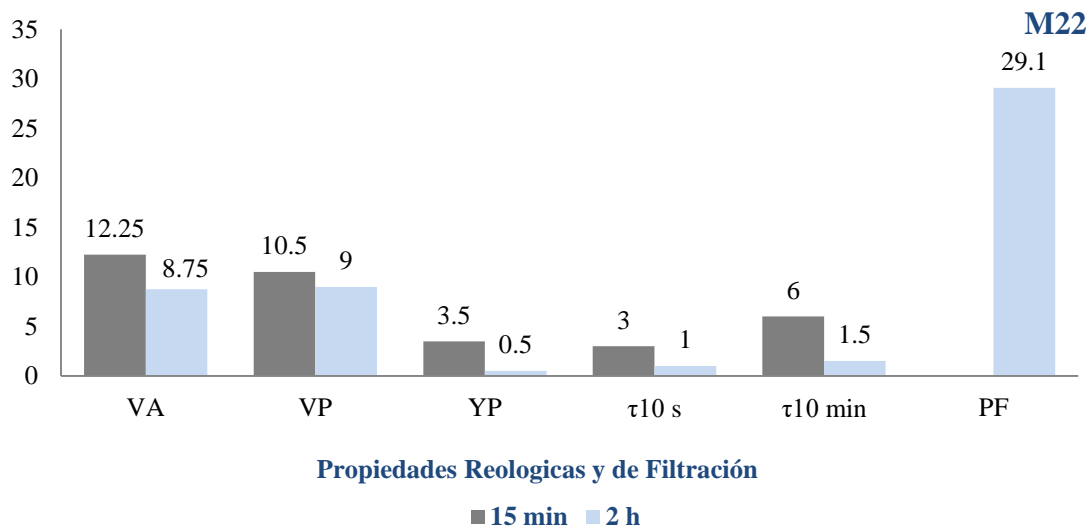
**Figura 58.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 20 después de 15 min y 2 h de agitación.

La figura 58 detalla los valores obtenidos para las propiedades reológicas en la cual se refleja claramente el aumento de los valores para todas las propiedades reológicas después de 2 horas de agitación.



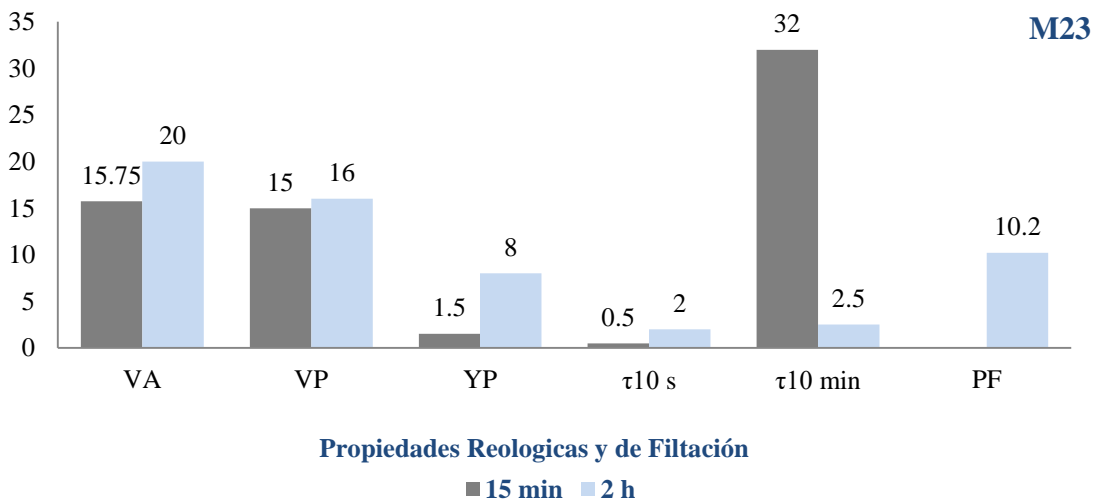
**Figura 59.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 21 después de 15 min y 2 h de agitación.

Los valores de VA, VP, YP y  $\tau_{10\text{min}}$  presentan una significativa disminución a 2 horas de agitación, mientras que el valor de  $\tau_{10\text{s}}$  se mantiene constante después de dos horas de agitación (figura 59).



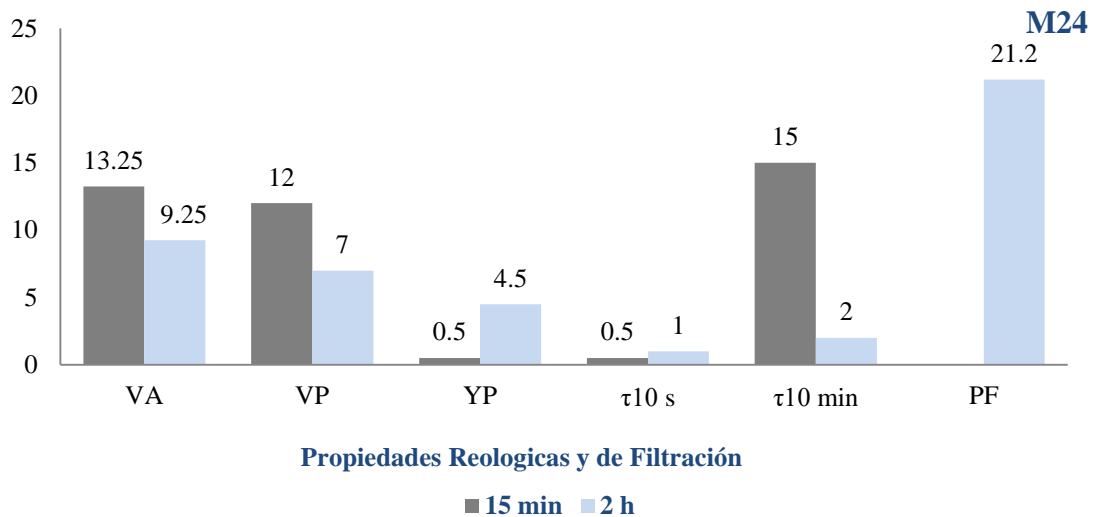
**Figura 60.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 22 después de 15 min y 2 h de agitación.

La suspensión 22 presenta una disminución en todos los valores de las propiedades reológicas después de 2 h de agitación, al comparar los valores obtenidos únicamente con 15 min de agitación.



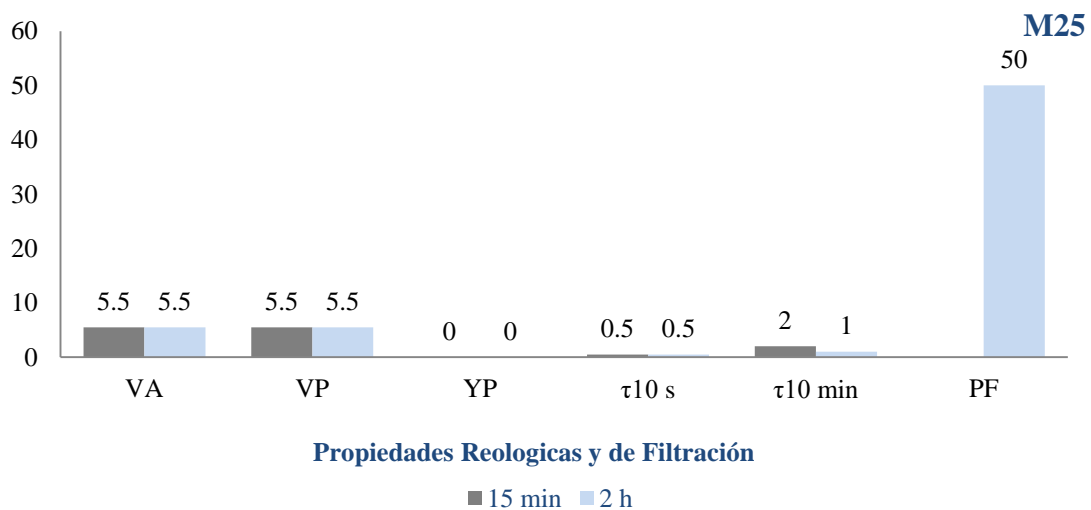
**Figura 61.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 23 después de 15 min y 2 h de agitación.

En la figura 61 es posible apreciar el aumento que se genera en los valores de las propiedades reológicas después de dos horas en agitación, exceptuando el valor de  $\tau_{10\text{min}}$  ya que presenta un cambio brusco en la medición, siendo esta 29.5 lb/100 pie<sup>2</sup>.



**Figura 62.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 24 después de 15 min y 2 h de agitación.

Con respecto a la figura 62 para los valores de las propiedades reológicas después de 2 h de agitación, la VA, VP y  $\tau_{10\text{min}}$  disminuyen, mientras que el YP y la  $\tau_{10\text{s}}$  aumentan.



**Figura 63.** Gráfico de propiedades reológicas y filtración de la muestra 25 después de 15 min y 2 h de agitación.

Para la muestra 25 (figura 63) se observa que los valores de la VA, VP, YP,  $\tau_{10\text{s}}$  se mantienen constantes, mientras que para la  $\tau_{10\text{min}}$  hay una disminución después de 2 h de agitación. La PF es el segundo valor más alto obtenido.

Cada valor obtenido de las propiedades reológicas y PF por muestra, se comparó con

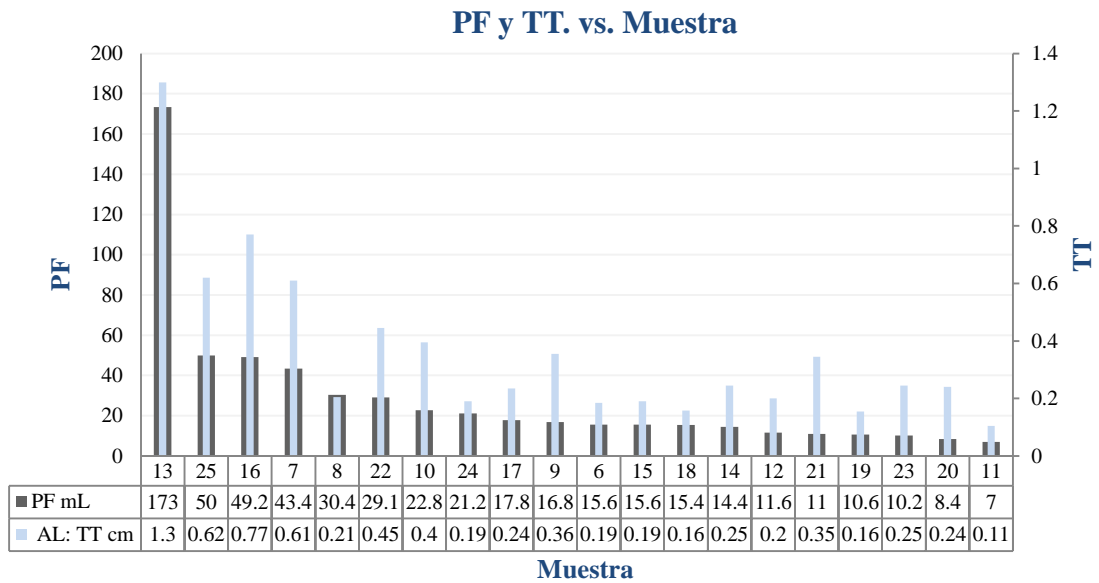
datos de referencia de tres etapas (*Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015*), cuyo resultado del contraste se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 27. Comparación de parámetros reológicos, pérdida de filtrado y revoque para tres etapas de referencia.**

Parámetros reológicas y PF																		
ETAPAS MUESTRA	VP			YP			$\tau_{10s}$			$\tau_{10min}$			PF			TT(DL)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	*	*	*	*	*	*
2	C	C	C	-	-	-	-	-	C	-	-	-	*	*	*	*	*	*
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*	*	*	*	*
4	+	+	+	+	+	+	C	C	C	-	C	C	*	*	*	*	*	*
5	-	-	C	-	-	-	-	-	-	-	-	C	*	*	*	*	*	*
6	+	+	+	+	+	+	C	C	C	-	-	-	C	C	+	-	-	C
7	-	-	C	C	C	C	-	-	C	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	-	-	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	C
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	C	+	+	-	-	C
10	C	C	C	-	-	-	-	-	C	-	-	-	+	+	+	C	+	+
11	C	+	C	+	+	+	C	C	C	-	C	C	-	-	-	-	-	-
12	-	-	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	C
14	C	C	C	C	C	C	-	-	-	-	-	-	C	C	+	-	-	C
15	-	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	+	C	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
17	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	-	-	C	+	+	-	-	C
18	+	+	+	+	+	+	-	-	C	-	-	-	C	C	+	-	-	C
19	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	-	-	-
20	+	+	+	+	+	+	-	-	C	C	C	-	-	-	C	C	C	+
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	-	-	C
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	C
23	C	C	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	C	C	+
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	C
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	C

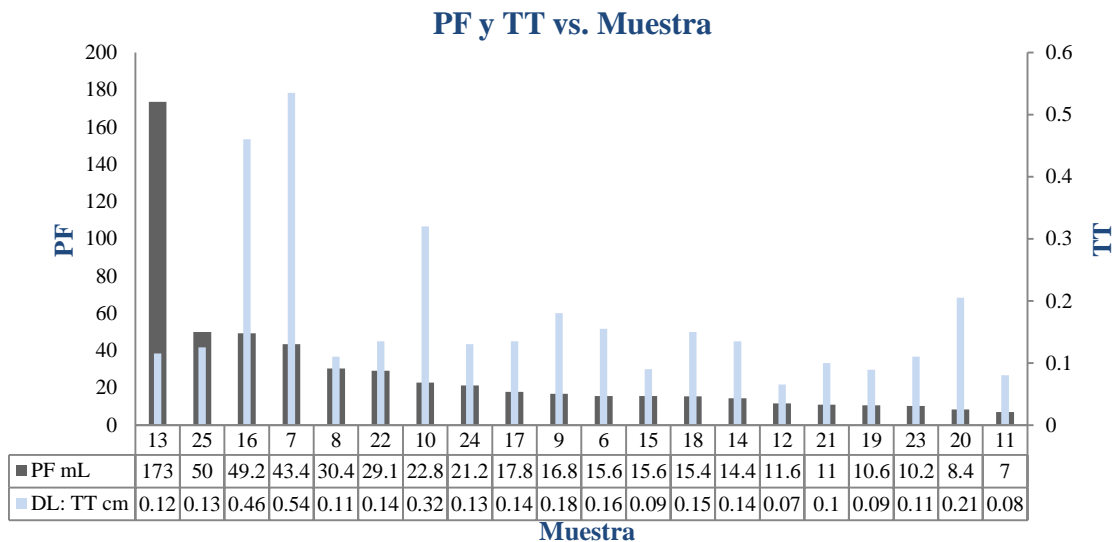
+ = valor superior a rango      - = Valor inferior a rango      C = cumple      \*= No se midió

La tabla 27 expone en qué etapa de perforación puede ser utilizada cada una de las muestras de acuerdo a los valores medidos de reología y pérdida de filtrado. Una de las muestras más importantes es la 17 ya que esta formulación puede ser útil en la primera etapa, aunque la  $\tau_{10min}$ , es menor de lo referenciado



**Figura 64. Gráfico de pérdida de filtrado y revoque (antes de lavar) después de 2 h de agitación.**

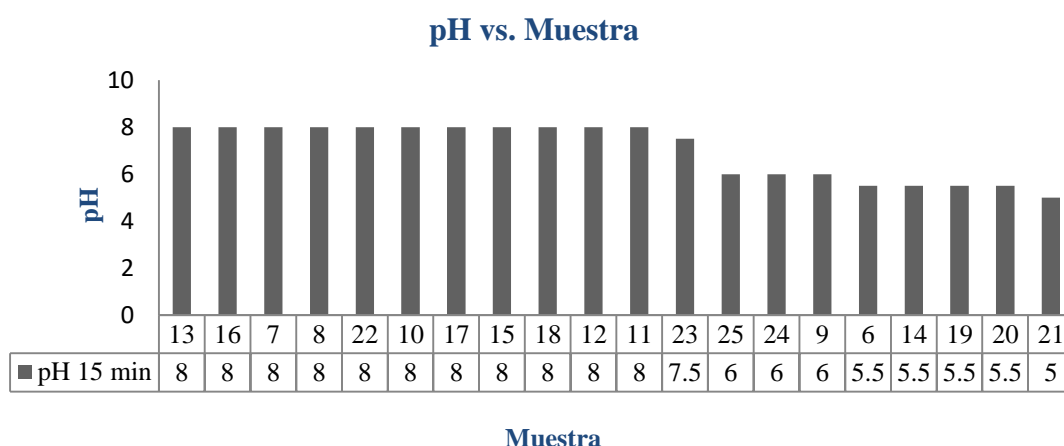
En la figura 64 se observa que antes de lavar el revoque, el volumen de filtrado y el revoque no están relacionados ya que a medida que aumenta el grosor de la torta el filtrado no disminuye.



**Figura 65. Gráfico de pérdida de filtrado y revoque (antes de lavar) después de 2 h de agitación.**

De acuerdo a (Calçada, Scheid, de Araújo, Waldmann, & Martins, 2011) “las tasas de filtración estática se controlan mediante el engrosamiento continuo del revoque de lodo”, pero bajo las condiciones que trabajamos después de lavar el revoque no se

evidencia ese patrón (Figura 65) ya que si fuese así el valor más grande de Rq. (0.54 cm) presentaría el valor menor de PF (7 mL). Aunque según los rangos de referencia para las tres etapas (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015), si el espesor del revoque aumentan también el volumen de filtrado, situación que tampoco se da. Sin embargo, Husein et al. (2012) señalan que; “el valor óptimo del espesor del revoque debe ser inferior a 0.1 cm para que pueda haber reducción de pérdidas de filtrado”, situación que se observa en las muestras 11, 19, 21 y 12 (de menor a mayor PF), que son las que presentan los datos más bajos para PF. Esto se contradice con las muestras 20 y 23 que presentan un PF de 8.4 y 10.2 mL con un espesor de revoque respectivamente de 0.21 y 0.11 cm.



**Figura 66. Gráfico de valores de pH obtenidos después de 15 minutos de agitación.**

La mayoría de los lodos a base de agua son alcalinos en el rango de pH de 9-11 (Amoco Production Company., 1994), circunstancia que no se presentó bajo el ambiente de trabajo, y que se aprecia en el gráfico de la figura 66 por que 11 de las muestra están a un pH de 8 y las demás de 5 a 7.

Además de evaluar los parámetros reológicos en conjunto por muestra, se analizó por separado cada propiedad: Viscosidad Aparente (VA), Viscosidad Plástica (VP), Punto Cedente (YP), Fuerza Gel a 10 segundos ( $\tau_{10s}$ ), Fuerza Gel a 10 minutos ( $\tau_{10min}$ )

incorporando las 20 muestras del diseño factorial en un solo gráfico y siempre para ambos tiempos: 15 minutos y 2 horas de agitación.

Además, dichos resultados se analizaron de forma estadística, utilizando la prueba t para medias de muestras emparejadas.

➡ **Viscosidad Aparente.**

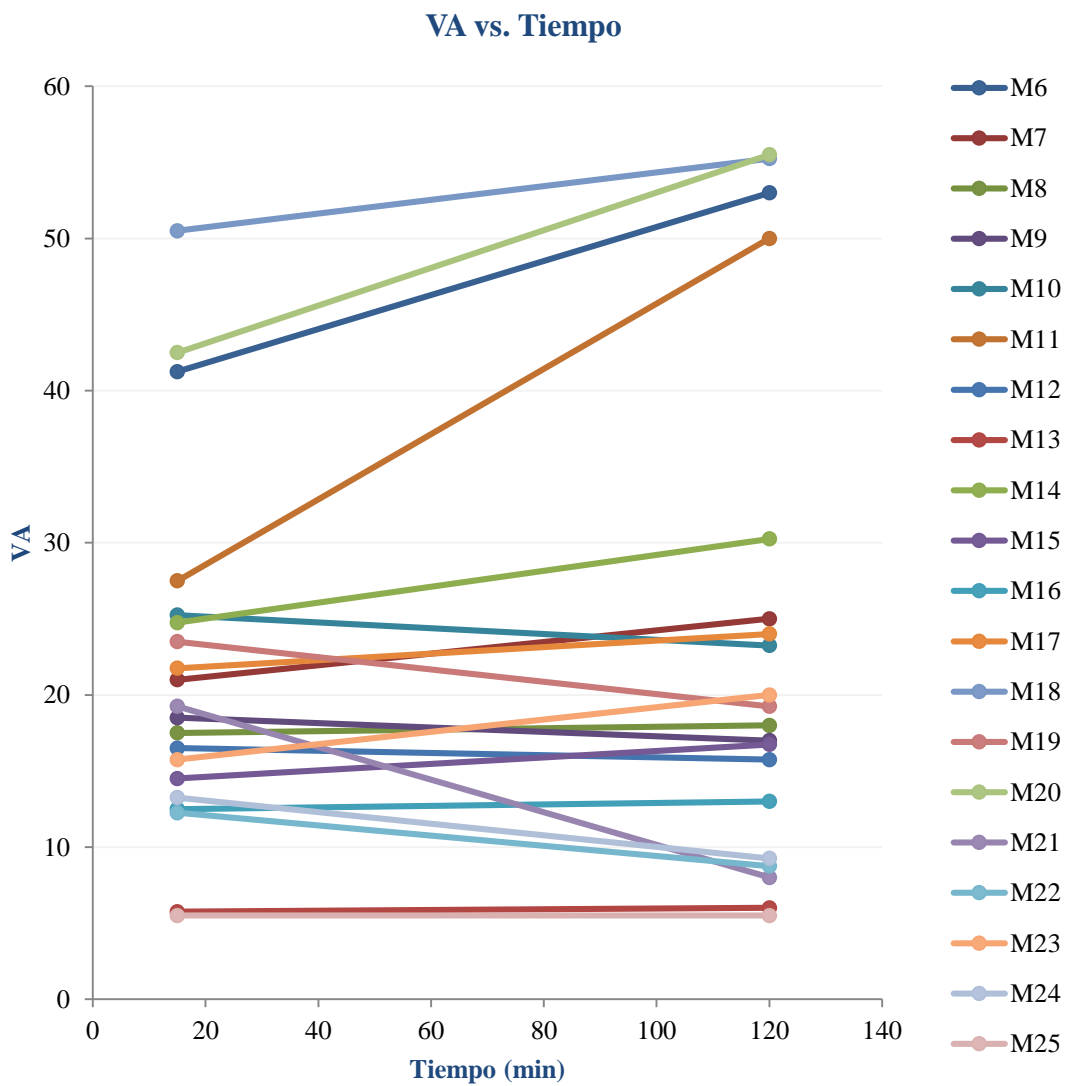


Figura 67. Gráfico de valores de VA después de 15 min y 2 h de agitación.

Con respecto a la figura 67 se esperaría que si se obtienen valores de 27.5 cps a 50.5 cps en 15 minutos a las dos horas fueran de 50 cps a 55.5 cps estos en relación a las muestras 6, 11, 20 y 18. Para las otras no se visualiza la misma tendencia, ni contraria a esta, ya que como pueden aumentar pueden disminuir o mantenerse después de 2 h.

Utilizando los valores de VA por cada muestra a los dos tiempos de agitación se llevó a cabo la prueba t para media de muestras emparejadas, obteniendo los datos presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 28. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas (VA).**

TÉRMINOS	VA 15 min	VA 120 min
Media	21.4625 cps	23.675 cps
Varianza	137.5149671 cps	276.9414474 cps
Observaciones	20	20
Coefficiente de correlación de Pearson	0.928031883	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	19	
Estadístico t	-1.368910181	
P(T<=t) una cola	0.093497417	
Valor crítico de t (una cola)	1.729132812	
P(T<=t) dos colas	0.186994833	
Valor crítico de t (dos colas)	2.093024054	

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Los valores de VA a 15 minutos y 2 horas son iguales.

$$H_1 = \mu_1 \neq \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Los valores de VA a 15 minutos y 2 horas son diferentes.

Debido a que la  $t$  calculada es menor que la  $t$  tabulada ( $t_{cal} < t_{tab}$ ) en un contraste de dos colas se acepta la hipótesis nula por lo tanto no hay diferencia significativa entre las medias para un 95 % de confianza. Esto nos permite decir que independiente del tiempo de agitación (entre 15 minutos y 2 horas.) los valores obtenidos son iguales, por lo que no es necesario agitar hasta 2 horas si no que basta con 15 minutos con respecto a esta propiedad.

➡ **Viscosidad Plástica.**

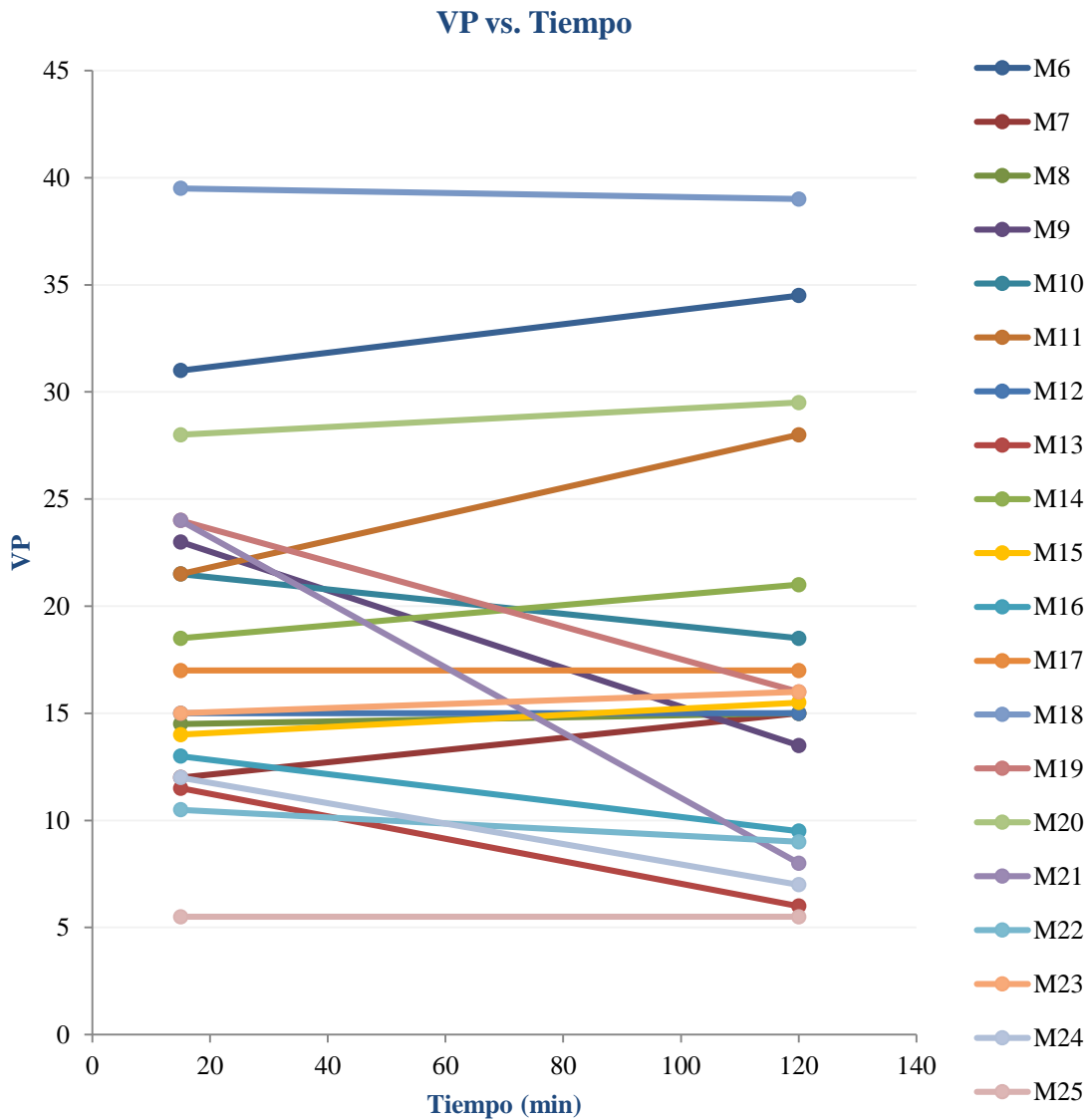


Figura 68. Gráfico de valores de VP después de 15 min y 2 h de agitación.

Para la VP según la figura 68 se observa que la muestra 6, 18 y 20 después de 2 horas de agitación tienen un mínimo cambio con ligera disposición a aumentar, lo cual nos indica que si tenemos datos de 28 cps a 39.5 cps en 15 min, para las 2 h tendremos de 29.5 cps a 39 cps con posibilidad de una pequeña disminución. En el caso de las demás M, los valores son menores a los rangos mencionados mostrando que no siguen una tendencia ni solo aumentar, a disminuir o únicamente a mantenerse; si no que una mezcla.

Para los valores de VP de cada muestra a los dos tiempos de agitación se llevó a cabo la prueba t para media de muestras emparejadas, obteniendo los datos presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 29. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas (VP).**

TÉRMINOS	VP 15 min	VP 120 min
Media	18.55 cps	16.925 cps
Varianza	65.57631579 cps	87.82302632 cps
Observaciones	20	20
Coefficiente de correlación de Pearson	0.833161529	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	19	
Estadístico t	1.400027905	
P(T<=t) una cola	0.088811267	
Valor crítico de t (una cola)	1.729132812	
P(T<=t) dos colas	0.177622534	
Valor crítico de t (dos colas)	2.093024054	

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 = 0$$

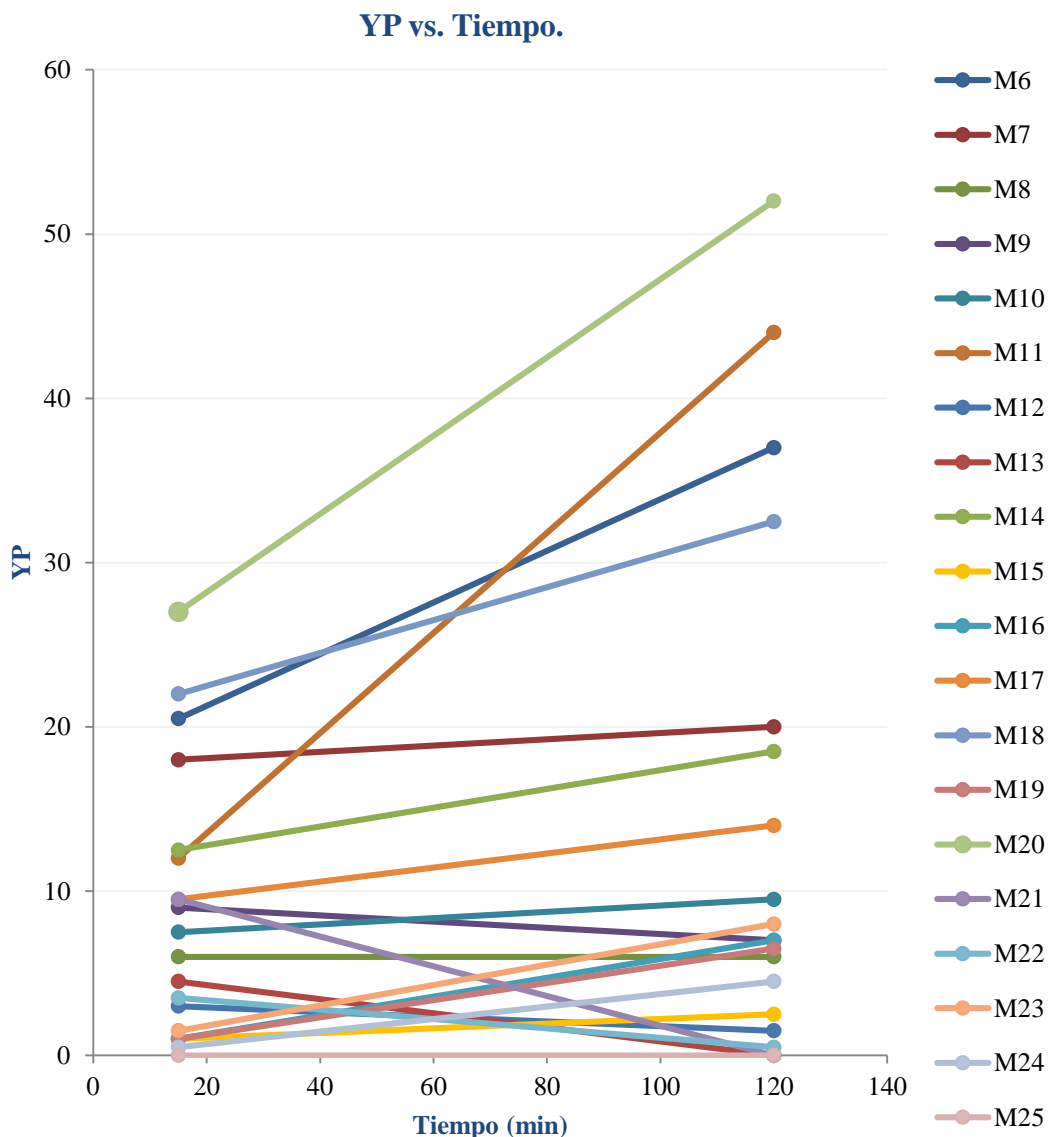
Los valores de VP a 15 minutos y 2 horas son iguales.

$$H_1 = \mu_1 \neq \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Los valores de VP a 15 minutos y 2 horas son diferentes.

Ya que la  $t$  calculada es menor que la  $t$  tabulada ( $t_{cal} < t_{tab}$ ) en un contraste de dos colas se acepta la hipótesis nula por lo tanto no haya diferencia significativa entre las medias para un 95 % de confianza. Con este resultado decimos que independiente del tiempo de agitación (15min y 2 h) los valores obtenidos son iguales, por lo que no es necesario agitar hasta 2 horas si no que basta con 15 minutos.

➡ **Punto Cedente.**



**Figura 69.** Gráfico de valores de YP después de 15 min y 2 h de agitación.

La figura 69 refleja que las 20 muestras después de 2 horas de agitación no presentan tendencia a solo aumentar, a disminuir o únicamente a mantenerse; si no que una

combinación, en la cual sobresale la muestra 11 seguida de la 20 que exhiben un aumento muy marcado, de 15 minutos a 2 horas.

Con los valores de YP por cada muestra a los dos tiempos de agitación se llevó a cabo la prueba t para media de muestras emparejadas, obteniendo los datos presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 30. Tabla. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas (YP).**

TÉRMINOS	YP 15min	YP 120 min
Media	8.475 lb / 100pie <sup>2</sup>	13.55 lb / 100pie <sup>2</sup>
Varianza	64.30197368 lb / 100pie <sup>2</sup>	246.8921053 lb / 100pie <sup>2</sup>
Observaciones	20	20
Coefficiente de correlación de Pearson	0.852045742	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	19	
Estadístico t	-2.310629555	
P(T<=t) una cola	0.016120982	
Valor crítico de t (una cola)	1.729132812	
P(T<=t) dos colas	0.032241964	
Valor crítico de t (dos colas)	2.093024054	

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Los valores de YP a 15 minutos y 2 horas son iguales.

$$H_1 = \mu_1 \neq \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Los valores de YP a 15 min y 2 horas son diferentes.

Como la  $t$  calculada es mayor que la  $t$  tabulada ( $t_{cal} > t_{tab}$ ) en un contraste de dos colas se rechaza la hipótesis nula por lo tanto hay diferencia significativa entre las medias para un 95 % de confianza. A diferencia de las dos propiedades anteriores para esta sí es

necesario el tiempo de agitación por lo que no da lo mismo si es en 15 min o 2 h. Con respecto a este resultado este parámetro es dependiente de la cantidad de tiempo en que se agite y es importante para fines prácticos.

Debido a que el análisis del contraste de dos colas nos indicó que, si había diferencia significativa entre los valores de YP para ambos tiempos, se realizó el análisis para contraste de una cola (tabla 30) generando las siguientes hipótesis, manteniendo la nula y cambiando la alternativa:

$$\mathbf{H}_0 = \mu_1 = \mu_2$$

Los valores de YP a 15 minutos y 2 horas son iguales.

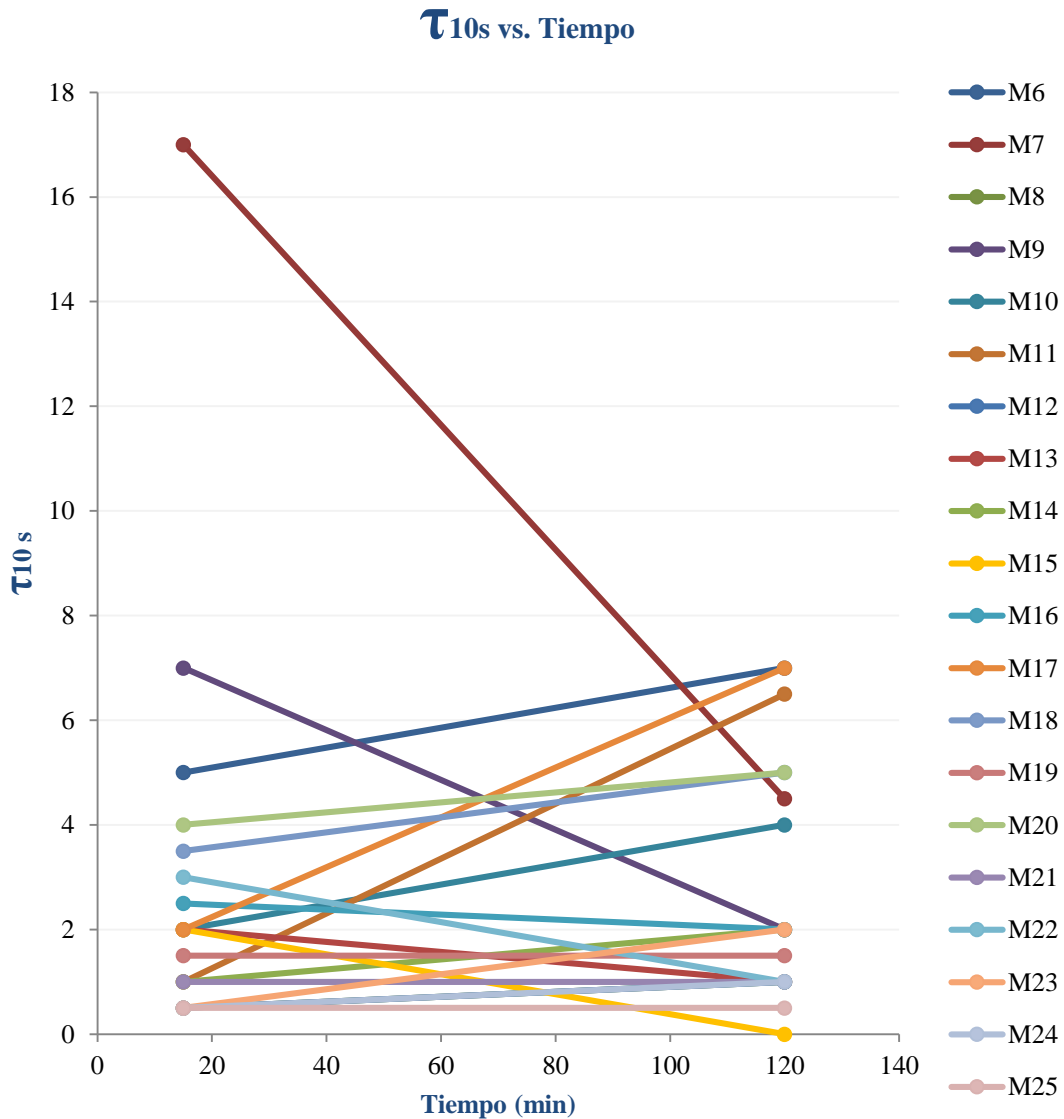
$$\mathbf{H}_1 = \mu_1 < \mu_2$$

Los valores de YP a 15 minutos son menores que a 2 horas.

Debido a que la  $t$  calculada es mayor que la  $t$  tabulada ( $t_{cal} > t_{tab}$ ) en un contraste de una cola se rechaza la hipótesis nula por lo tanto la media uno ( $\mu_1$ ) es menor que la media dos ( $\mu_2$ ) para un 95 % de confianza. Lo que comprueba que es importante el tiempo que permanece agitándose la suspensión, en este caso los valores de YP a dos horas son mayores que a 15 minutos.

Con este análisis se determina estadísticamente que la proporcionalidad es directa por lo tanto si el tiempo aumenta también lo harán los valores de YP.

► **Fuerza Gel a 10 segundos.**



**Figura 70. Gráfico de valores de  $\tau_{10s}$  después de 15 min y 2 h de agitación.**

Lo que se observa en la figura 70 es que a las dos horas de agitación los valores para algunas muestras aumentan, para otras se mantienen y las demás disminuyen, pero entre todos los resultados la M7 es la que presenta una disminución muy marcada de un tiempo de agitación de 15 minutos a 2 horas.

Con los valores de  $\tau_{10s}$  por cada muestra a los dos tiempos de agitación se llevó a cabo la prueba t para media de muestras emparejadas obteniendo los datos presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 31. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas ( $\tau_{10s}$ ).**

TÉRMINOS	$\tau_{10s}$ 15 min	$\tau_{10s}$ 120 min
Media	2.85 lb / 100pie <sup>2</sup>	2.75 lb / 100pie <sup>2</sup>
Varianza	14.02894737 lb / 100pie <sup>2</sup>	5.25 lb / 100pie <sup>2</sup>
Observaciones	20	20
Coefficiente de correlación de Pearson	0.323501775	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	19	
Estadístico t	0.120708542	
P(T<=t) una cola	0.452594631	
Valor crítico de t (una cola)	1.729132812	
P(T<=t) dos colas	0.905189263	
Valor crítico de t (dos colas)	2.093024054	

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Los valores de  $\tau_{10s}$  a 15 minutos y 2 horas son iguales.

$$H_1 = \mu_1 \neq \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Los valores de  $\tau_{10s}$  a 15 min y 2 horas son diferentes.

Debido a que la  $t$  calculada es menor que la  $t$  tabulada ( $t_{cal} < t_{tab}$ ) en un contraste de dos colas se acepta la hipótesis nula por lo tanto estadísticamente no hay diferencia significativa entre las medias para un 95 % de confianza. Al igual que la VA y la VP no es necesario agitar a los dos tiempos (15min y 2 h) ya que con este resultado decimos que independiente del tiempo de agitación los valores obtenidos son iguales.

► **Fuerza Gel a 10 minutos.**

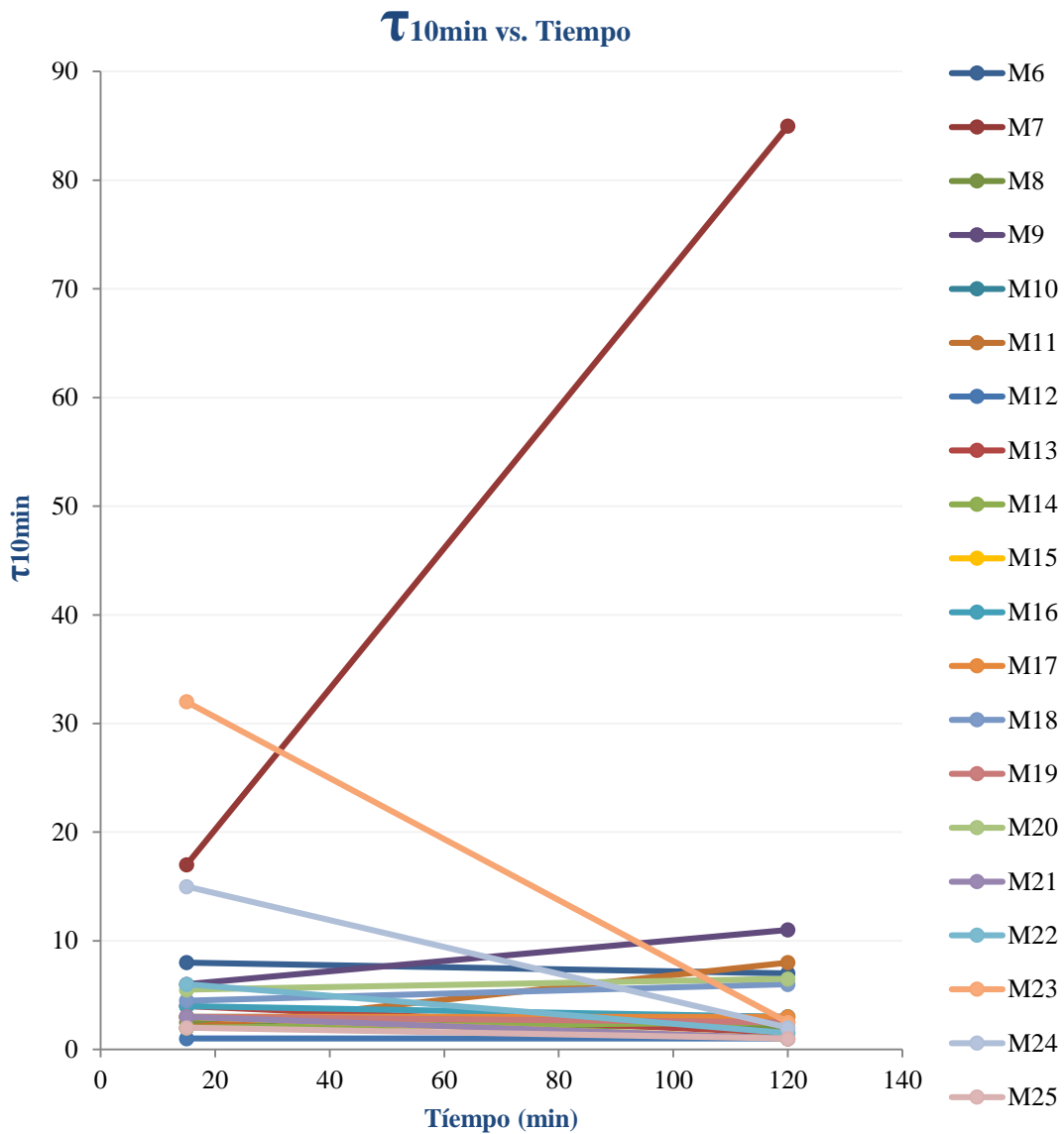


Figura 71. Gráfico de valores de  $\tau_{10\text{min}}$  después de 15 min y 2 h de agitación.

A las 2 horas de agitación los valores para las muestras 7, 23 y 24 presentan cambios más evidentes que los otras, siendo el de mayor notoriedad el de la M7, la cual de 17 lb/100 pie<sup>2</sup> aumenta a 85 lb/100 pie<sup>2</sup> y las otras dos disminuyen en menor proporción. Las demás muestras no exhiben cambios tan drásticos (figura 71)

Con los valores de  $\tau_{10\text{min}}$  por cada muestra a los dos tiempos de agitación se llevó a cabo la prueba t para media de muestras emparejadas obteniendo los datos presentados en la siguiente tabla:

**Tabla 32. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas ( $\tau_{10min}$ ).**

TÉRMINOS	$\tau_{10min}$ 15 min	$\tau_{10min}$ 120 min
Media	6.325 lb / 100pie <sup>2</sup>	7.55 lb / 100pie <sup>2</sup>
Varianza	53.71776316 lb / 100pie <sup>2</sup>	339.971053 lb / 100pie <sup>2</sup>
Observaciones	20	20
Coefficiente de correlación de Pearson	0.339680099	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	19	
Estadístico t	-0.315306739	
P(T<=t) una cola	0.377982826	
Valor crítico de t (una cola)	1.729132812	
P(T<=t) dos colas	0.755965652	
Valor crítico de t (dos colas)	2.093024054	

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Los valores de  $\tau_{10min}$  a 15 minutos y 2 horas son iguales.

$$H_1 = \mu_1 \neq \mu_2 \text{ ó } \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Los valores de  $\tau_{10min}$  a 15 min y 2 horas son diferentes.

Debido a que la  $t$  calculada es menor que la  $t$  tabulada ( $t_{cal} < t_{tab}$ ) en un contraste de dos colas se acepta la hipótesis nula por lo tanto estadísticamente no hay diferencia significativa entre las medias para un 95 % de confianza. Así como para la VA, la VP y  $\tau_{10min}$  no es necesario agitar a 15min y 2 h debido a que con este resultado expresamos que independiente del tiempo de agitación los valores obtenidos son iguales.

En general los valores de las propiedades reológicas medidas del fluido de perforación estadísticamente no depende del tiempo de agitación con respecto a los dos que utilizamos: 15 min y 2 h debido a que de los cuatro parámetros medidos solo uno resulto con diferencia significativa en las medidas entre 15 min y 2 horas de agitación, es por eso que se considera importante no dejar de lado esa condición ya que es el conjunto de propiedades las que califican como bueno o malo un fluido de perforación.

## Análisis estadístico.

Se elaboró dos gráficos de cada propiedad medida para la M6 a la M25.

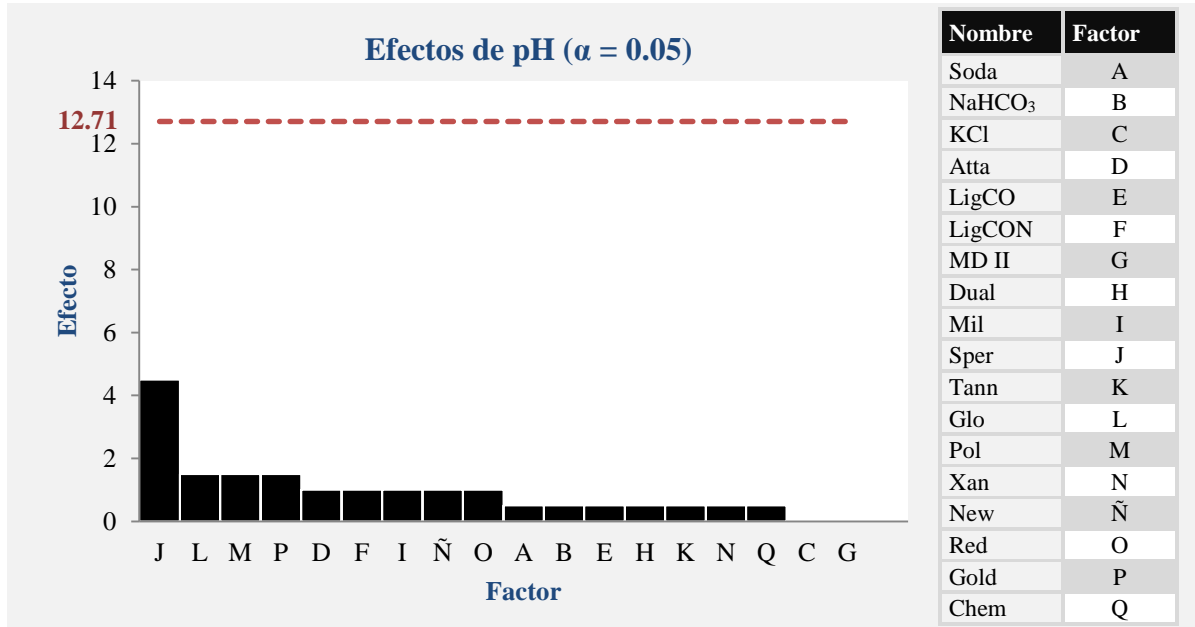
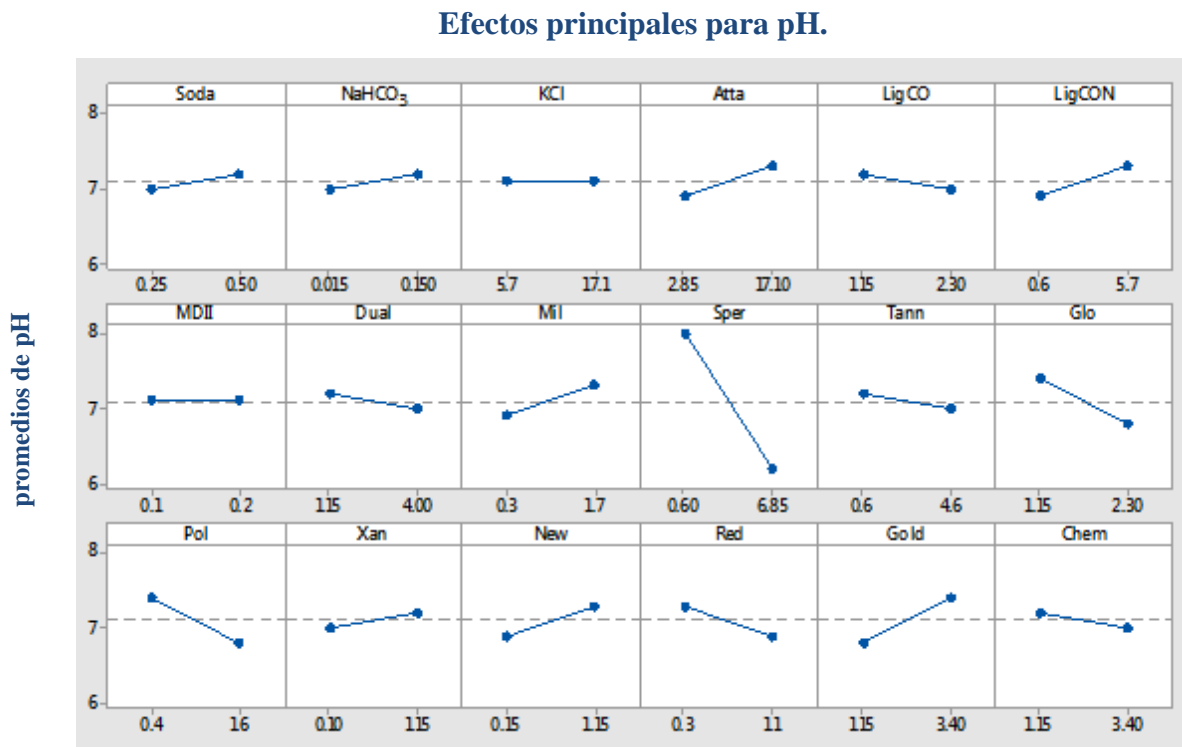


Figura 73. Gráfico de Pareto del pH.



Gramos de aditivos empleados para 400 mL de agua geotérmica.

Figura 72. Efecto de los aditivos en el pH.

Con la Figura 72 se evidenció el impacto de los aditivos utilizados en la formulación para cada una de las muestras en el pH, identificando al más influyente: el SPERSENE, sin embargo, con la Figura 73 se demostró que la influencia de este no es positiva en la formulación con respecto al pH, ya que no ayuda en el incremento de éste sino más bien lo disminuye dificultando que algunos aditivos cumplan su función en las suspensiones.

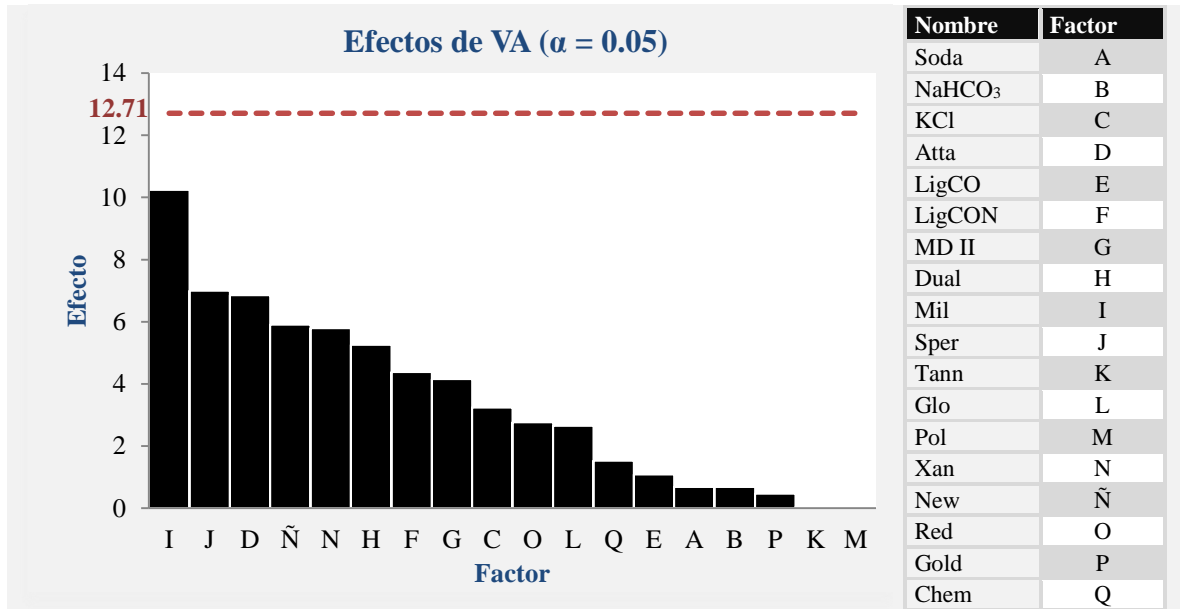


Figura 74. . Gráfico de Pareto de la Viscosidad Aparente.

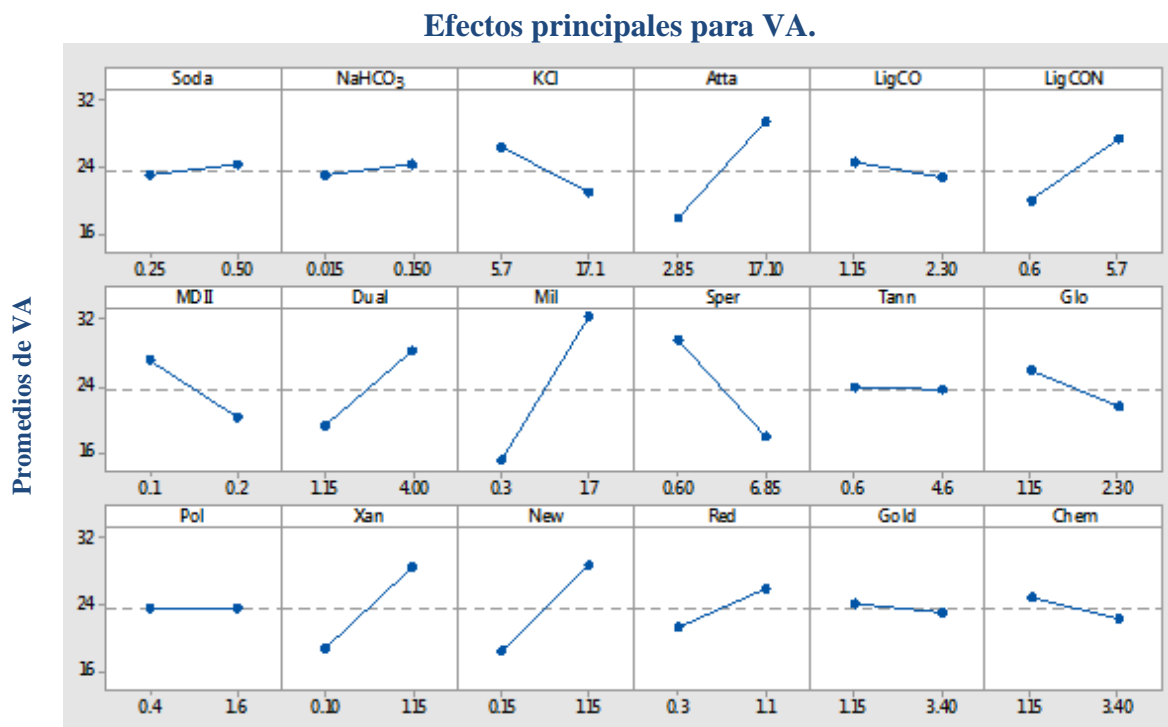


Figura 75. Efecto de los aditivos en la Viscosidad Aparente.

Según la figura 74 el más predominante de los aditivos para la VA es el MILK PACK lo que tiene el MIL PACK frente a este parámetro es que ayuda en el control de la VA al igual que la ATAPULGITA, según sea conveniente para cada etapa de la perforación, caso contrario al SPERSENE; quién disminuye evidentemente la VA al utilizarse con la máxima concentración según la figura 75.

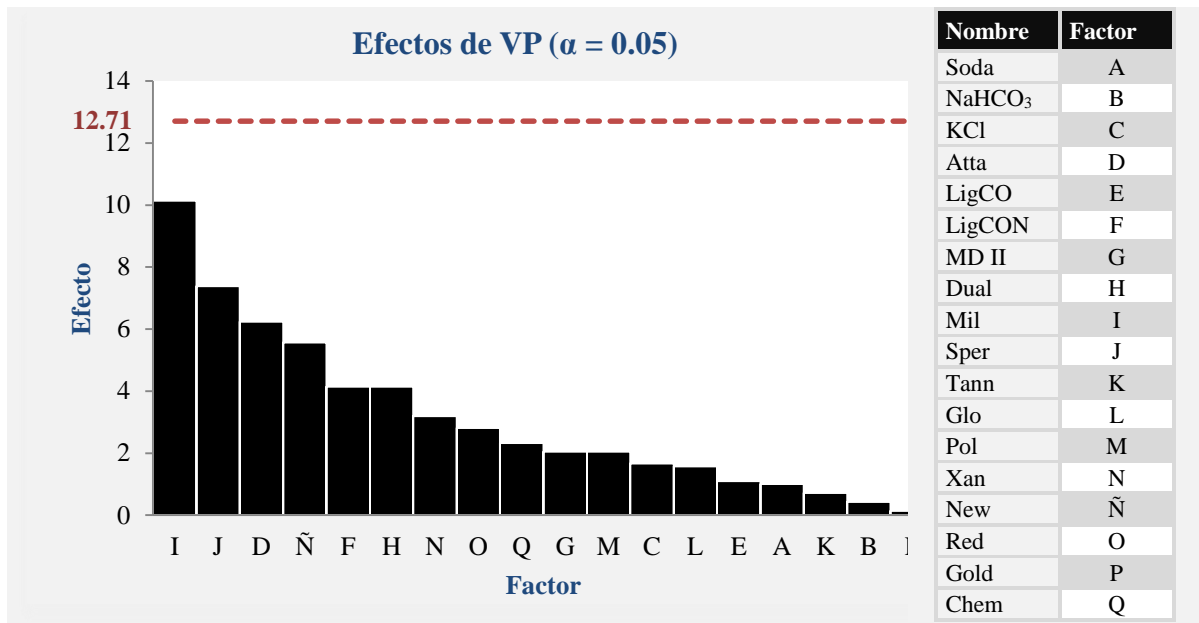
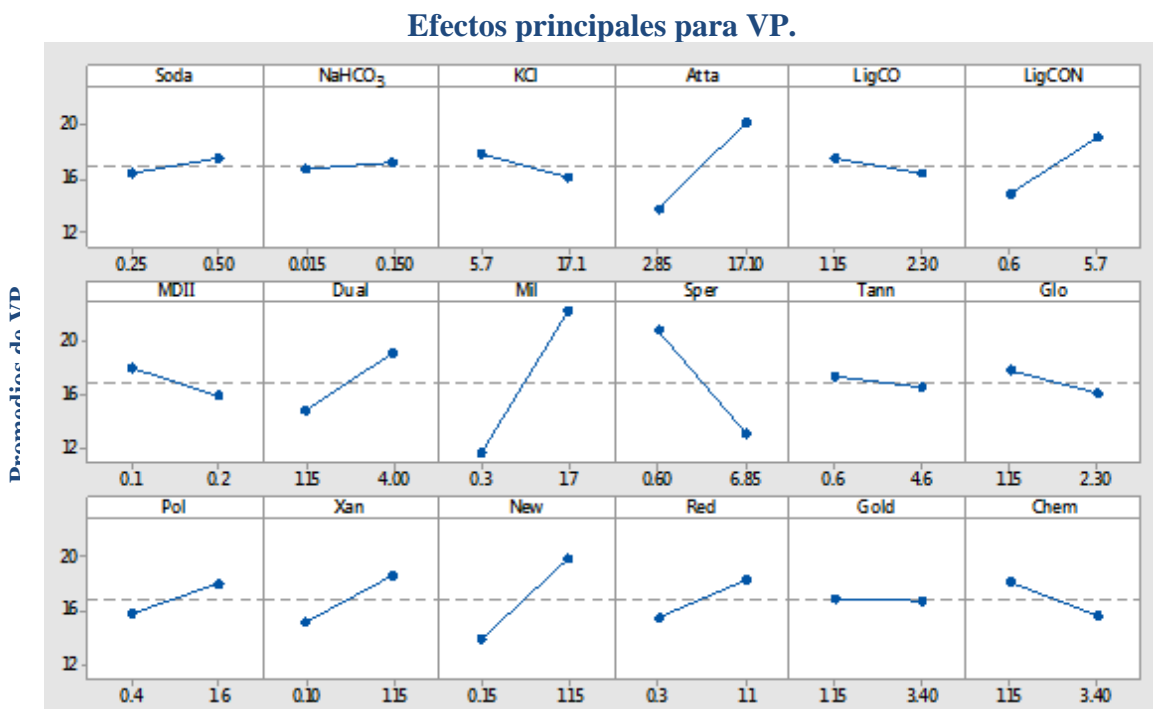


Figura 76. Gráfico de Pareto de la Viscosidad Plástica.



Gramos de aditivos empleados para 400 mL de agua geotérmica.

Figura 77. Efecto de los aditivos en la Viscosidad Plástica.

Igual que en la VA el MIL PACK presenta mayor influencia en la VP según la Figura 76. En la Figura 77 se aprecia el incremento de ésta al utilizar MIL PACK con máxima concentración, además, en el grafico Pareto de la VP la ATAPULGITA predomina, su influencia no es mayor de la que representa el MIL PACK, tomando en cuenta que la concentración que se utilizó de ATAPULGITA es mayor que la del MIL PACK.

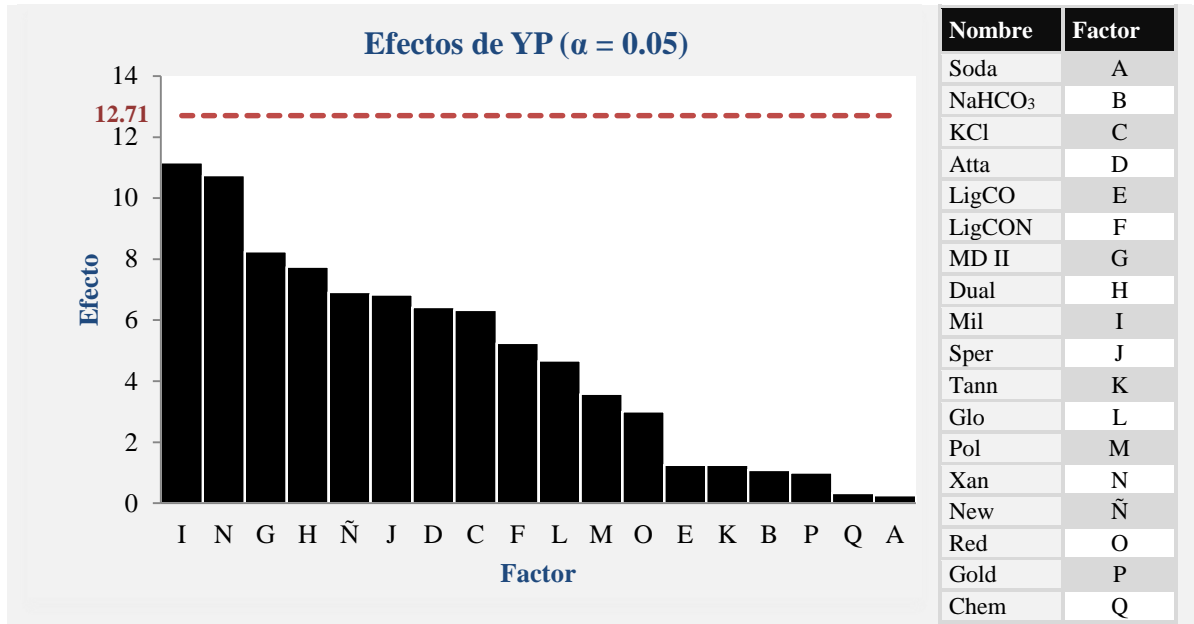


Figura 78. Gráfico de Pareto del Punto Cedente.

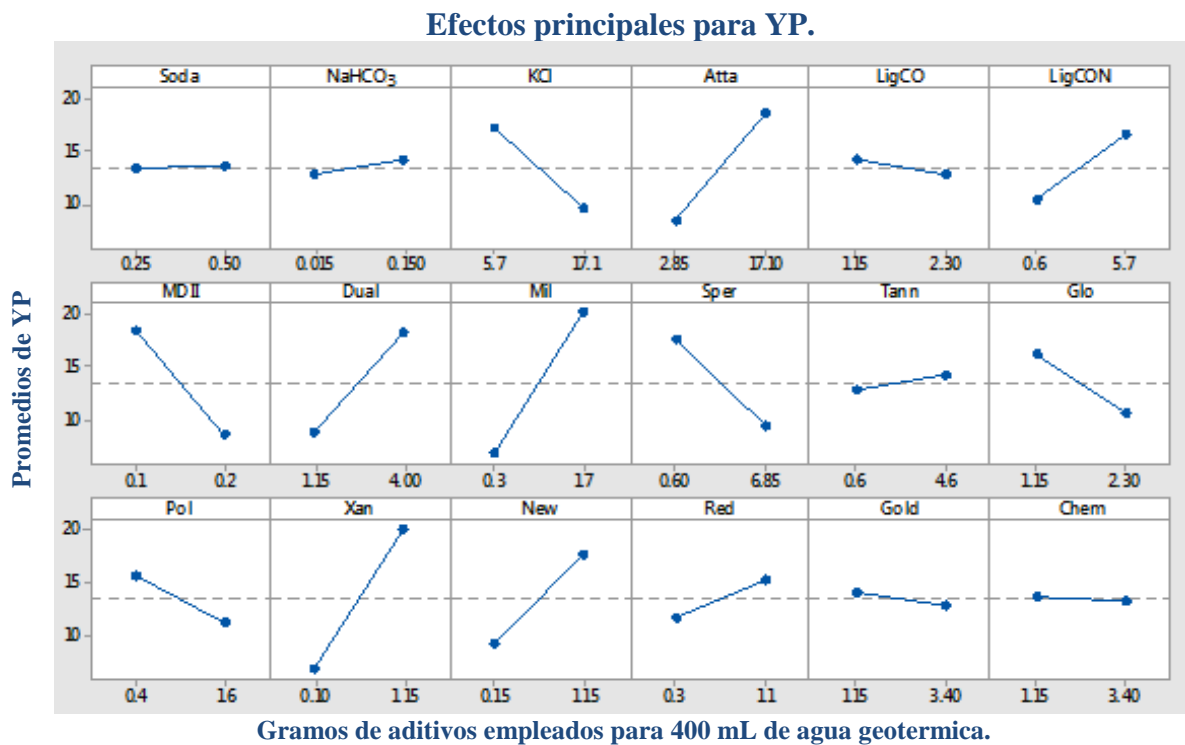


Figura 79. Efecto de los aditivos en el Punto Cedente.

Una vez más el MIL PACK es uno de los aditivos más significativos, seguido del XAN PLEX otro sumamente importante para el YP según la Figura 78, evidenciando que ambos aumentan el YP utilizando la máxima concentración, como tercer aditivo influyente en la Figura 79 es la ATAPULGITA. Un dato importante es que el SPERSENE es quién disminuye los parámetros reológicos nuevamente.

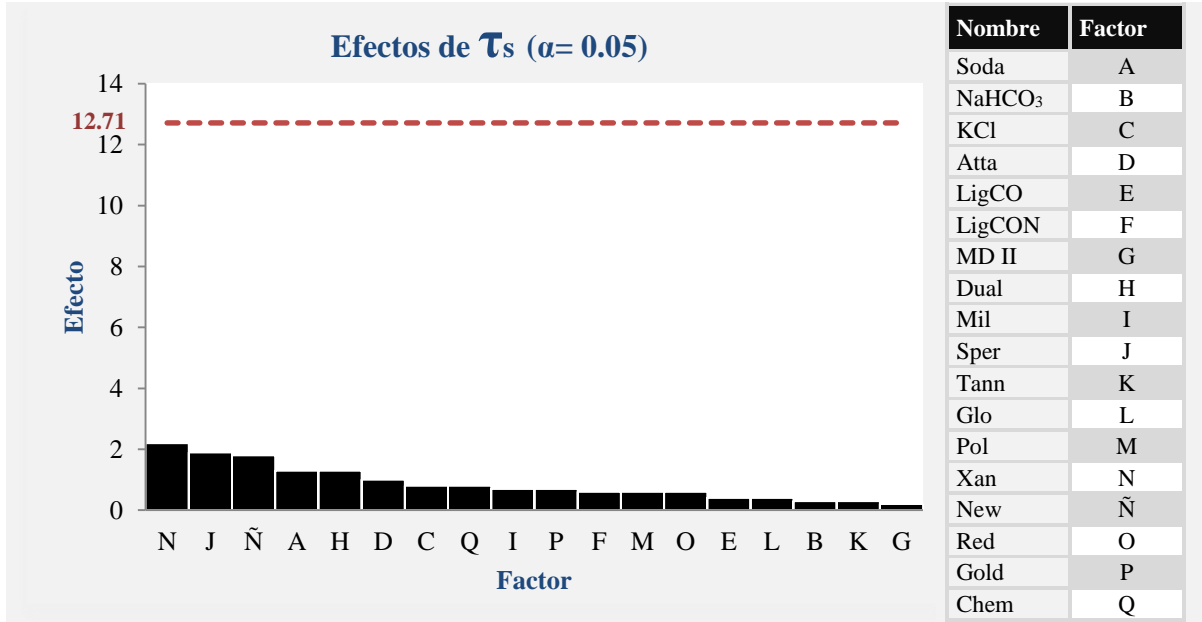
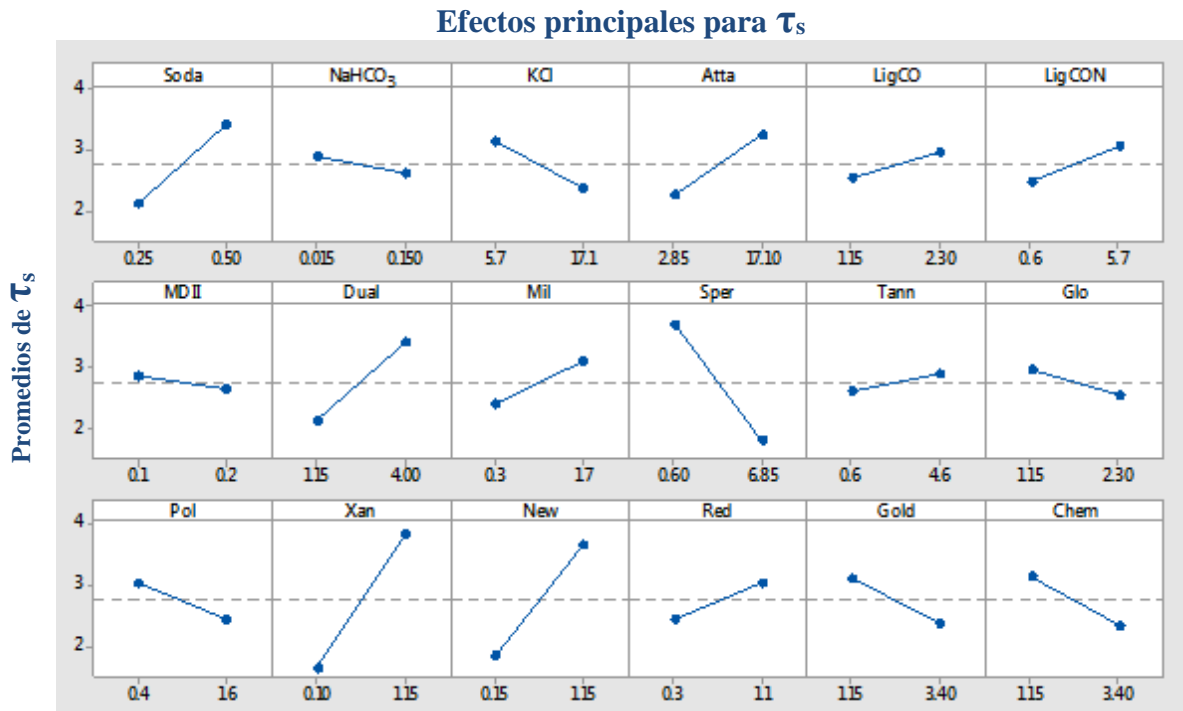


Figura 80. Gráfico de Pareto para la Fuerza Gel a 10 segundos.



Gramos de aditivos empleados para 400 mL de agua geotérmica.

Figura 81. Efecto de los aditivos en la Fuerza Gel a 10 segundos.

En la Figura 80 se identificaron tres aditivos predominantes para el parámetro de la  $\tau_s$ : XAN PLEX, NEW DRILL y SPERSENE, siendo el primero el de mayor influencia, seguido del segundo. A diferencia de los dos antes mencionados, el tercero disminuye la  $\tau_s$ , según la Figura 81. A pesar que los tres son los de mayor influencia en este parámetro, ninguno es estadísticamente significativo según la Figura 80.

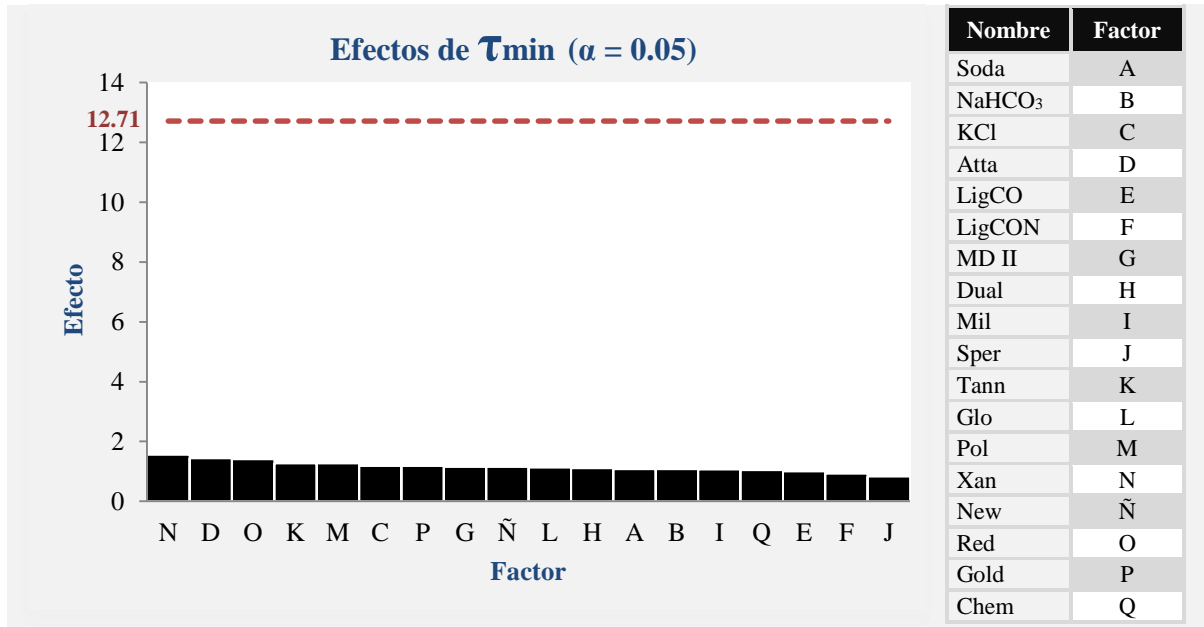


Figura 82. Gráfico de Pareto de la Fuerza Gel a 10 minutos.

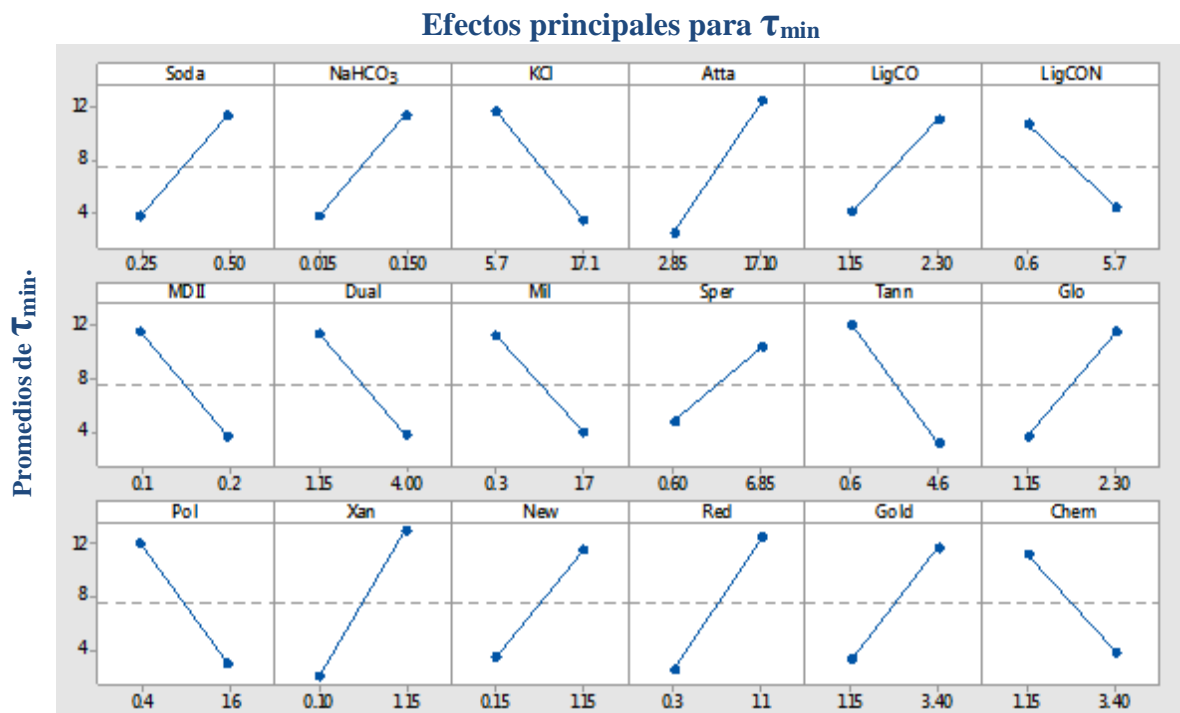


Figura 83. Efecto de los aditivos en la Fuerza Gel a 10 minutos.

Como en la,  $\tau_s$ , la  $\tau_{min}$  es afectada por el XAN PLEX, los que se posicionan debajo son la ATAPULGITA y el REDI COAT. Una diferencia notoria es que estos aditivos no presentan influencia notoria (Figura 82) a diferencia de la  $\tau_s$  (Figura 80). Los tres aditivos antes mencionados incrementan la  $\tau_{min}$  según la figura 83.

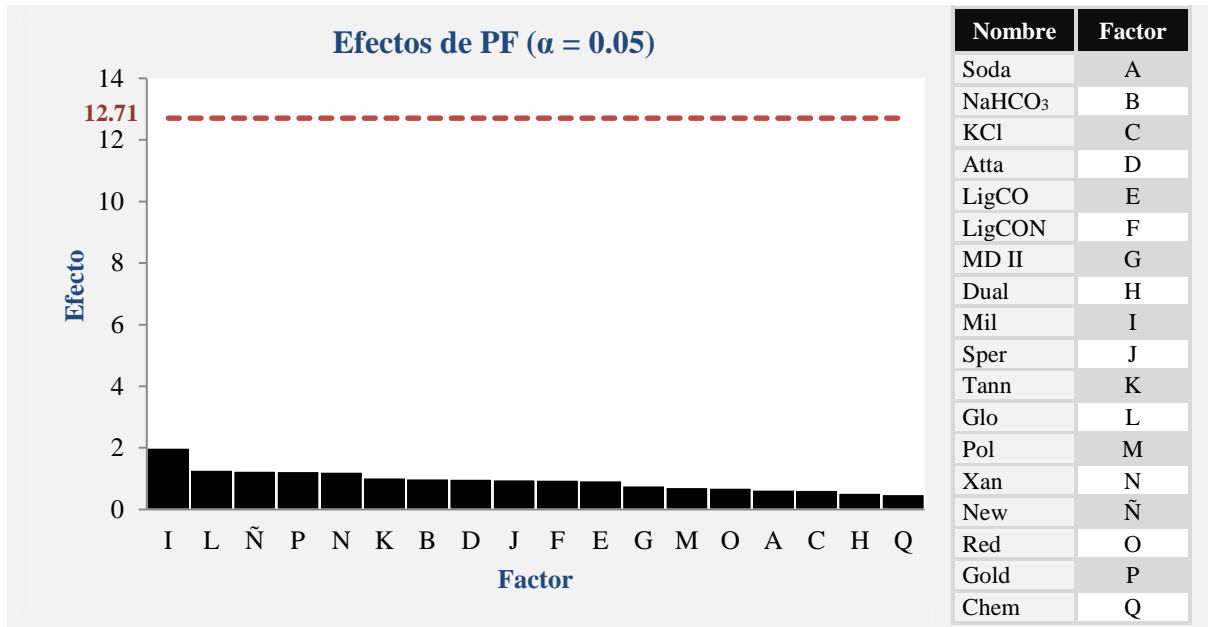


Figura 84. Gráfico de Pareto para la Pérdida de Filtrado.

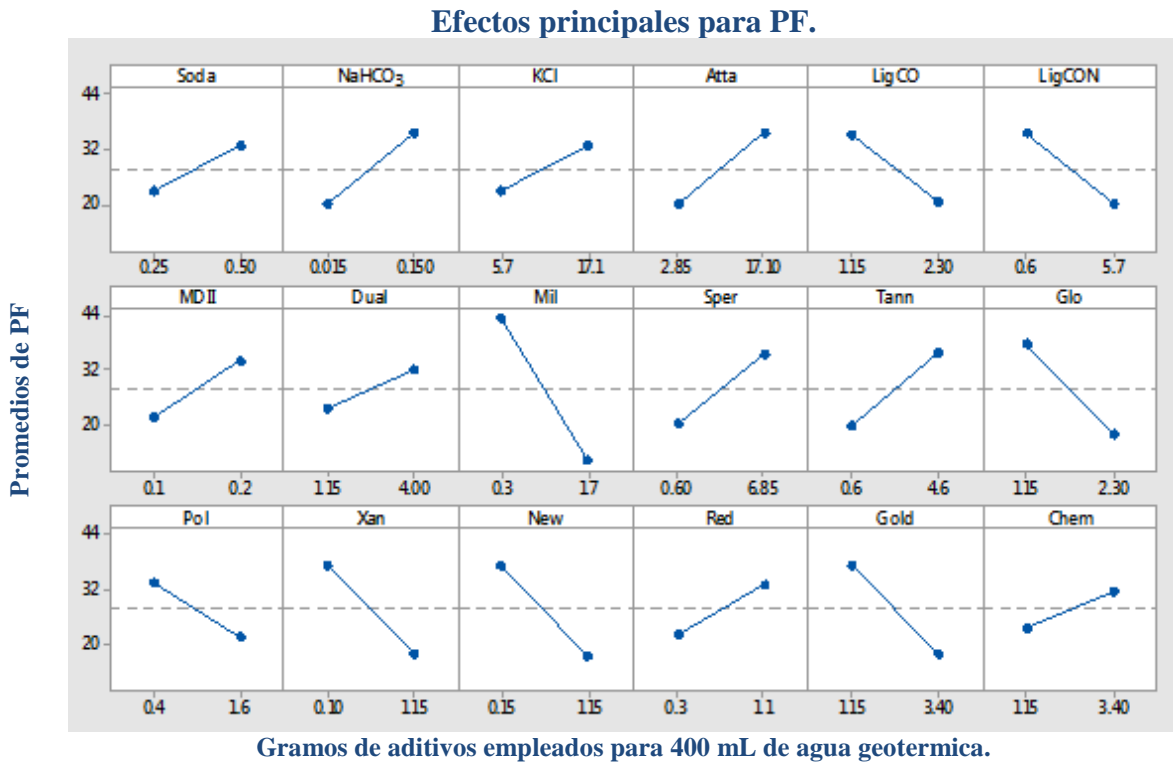


Figura 85. Efecto de los aditivos en la Pérdida de Filtrado.

Se aprecia en la figura 84 que el MIL PACK tiene mayor impacto sobre la PF, el cual lo disminuye según la figura 85 afectando positivamente la PF, al igual que el GLO LIG y el NEW DRILL, quienes se posicionan abajo del MIL PACK, caso contrario al SPERSENE, que aumenta la PF afectando negativamente.

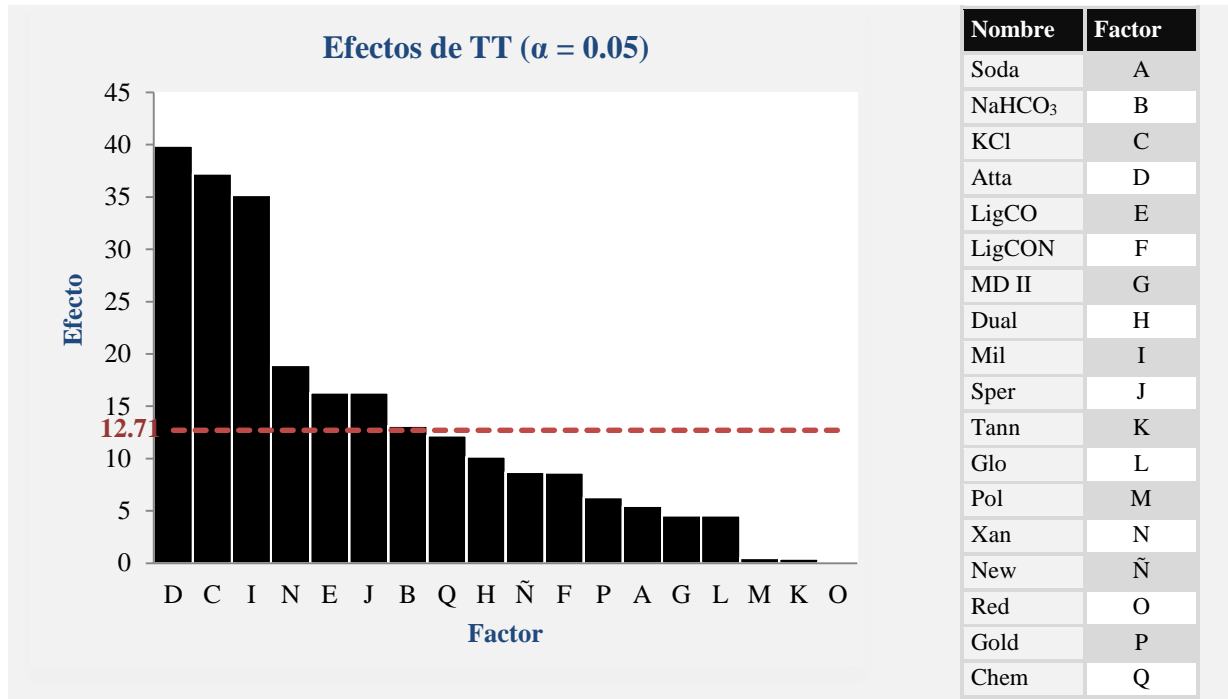


Figura 86. Gráfico de Pareto para el tamaño de revoque.

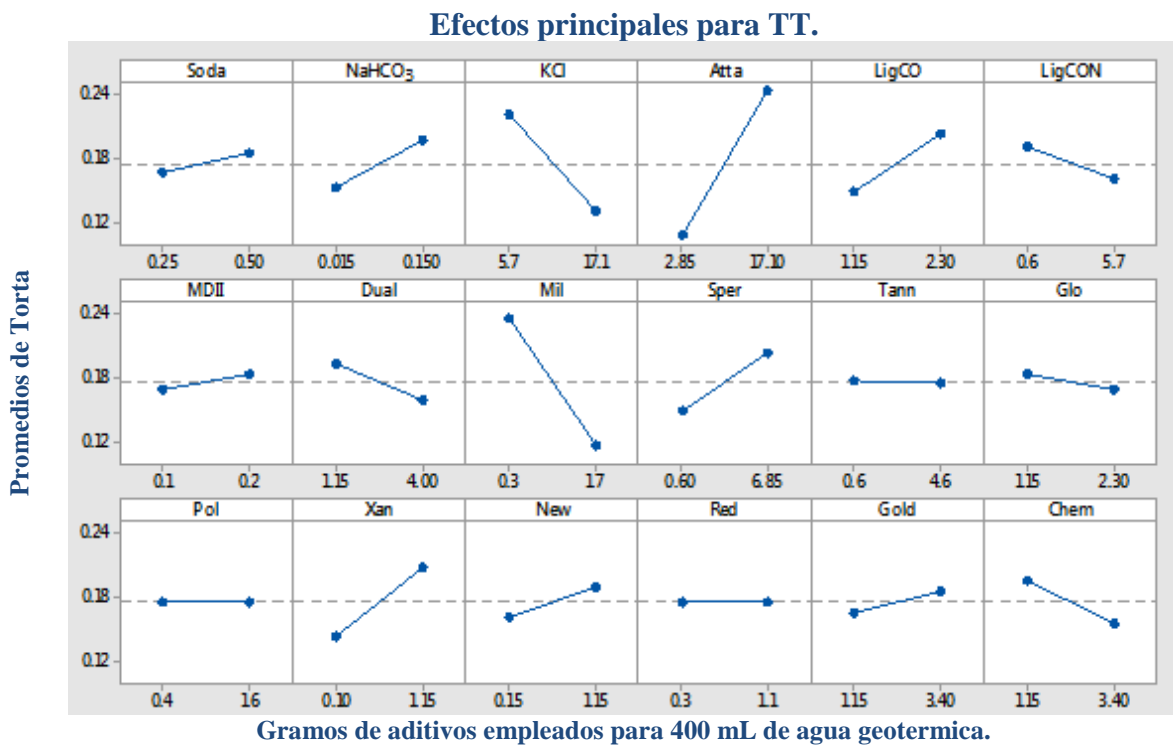


Figura 87. Efecto de los aditivos en el revoque.

Algunas de las propiedades del revoque como su espesor, tenacidad, resbalamiento y permeabilidad son de gran importancia, ya que la torta que se forma en las zonas permeables del pozo puede causar atascamiento en las tuberías entre otros problemas de perforación, aunque un cierto grado de acumulación del revoque es aconsejable para aislar las formaciones de los fluidos de perforación. Uno de los aditivos que mostró tener mayor impacto en este parámetro es la ATAPULGITA (Figura 86) afectando negativamente el tamaño del revoque, seguido del MIL PACK un aditivo que ayuda a disminuir el tamaño de este (Figura 87) según concentración empleada.

Para evaluar las relaciones entre cada par de parámetros a la vez se realizó una gráfica matricial que es una matriz de diagramas de dispersión (Figura 88).

Este tipo de matriz crea un gráfico para cada combinación posible y es efectiva cuando se tiene muchas variables.

Los parámetros evaluados fueron, pH, Viscosidad Aparente, Viscosidad Plástica, Punto Cedente, Fuerza Gel a 10 segundos y 10 minutos, pérdida de filtrado y torta o revoque.

La interpretación de este diagrama nos muestra que la viscosidad aparente y plástica tienen relación lineal, mientras que las demás no la presentan, así como ningún otro tipo de relación.

Diagrama de Matriz de variables.

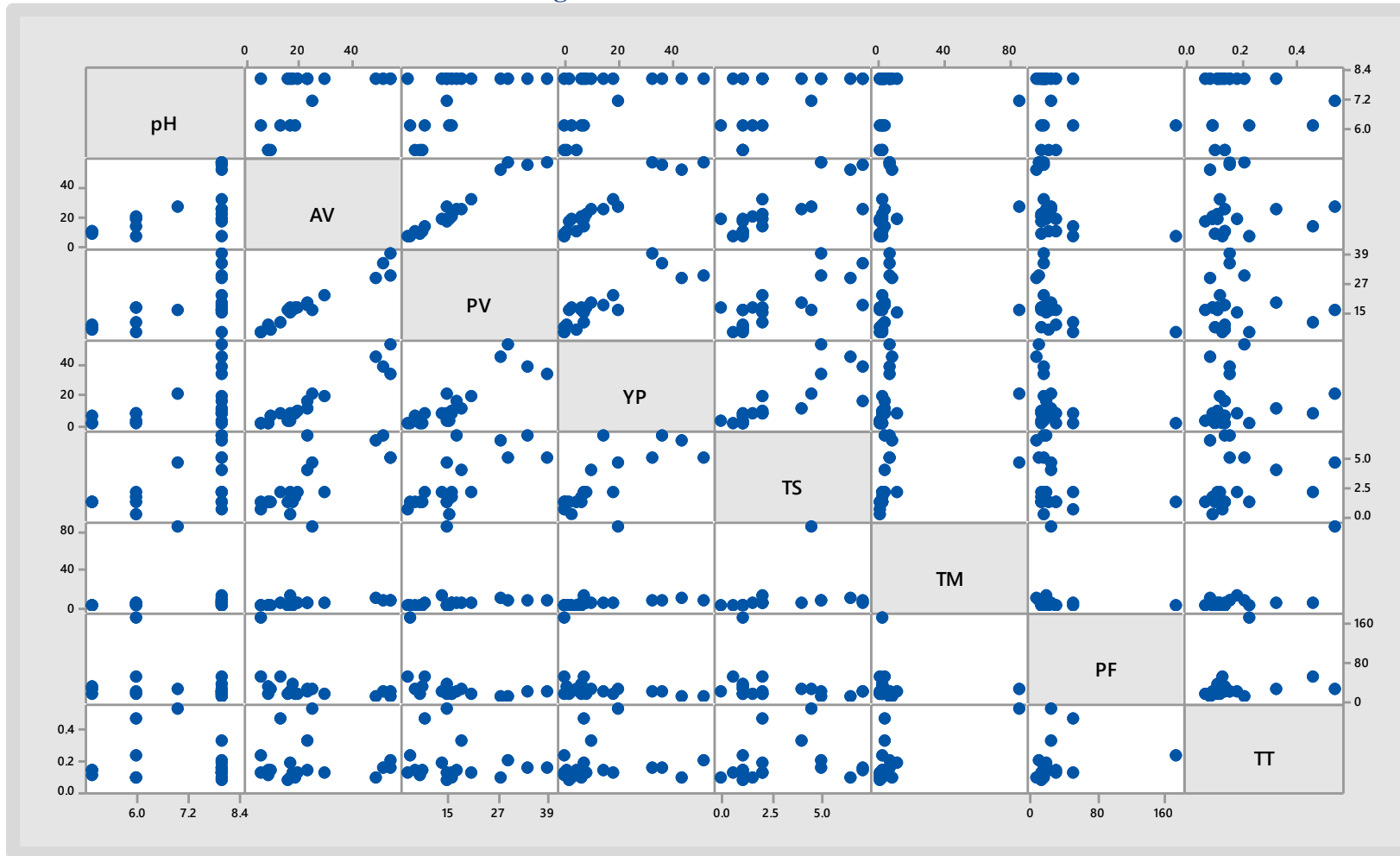


Figura 88. Diagrama de Matriz de pH, VA, VP, YP,  $\tau_s$ ,  $\tau_{min}$ , PF, TT (Rq.).

Al finalizar las 20 pruebas del cribado de variables se logró identificar cuáles de los 18 aditivos, incluida la arcilla, fueron los que tuvieron mayor impacto con respecto a la concentración utilizada según los datos estadísticos en las propiedades reológicas y filtrado del lodo de perforación, identificando como principales 6 de ellos, ya que en la mayor concentración favorecen ciertas propiedades: MIL PACK aumenta viscosidad y pH, disminuye filtrado y grosor de torta, XAN PLEX disminuye filtrado, aumenta viscosidad, fuerza gel y pH, ATAPULGITA aumenta viscosidad, fuerza gel a 10 minutos y pH, GLO LIG aumenta fuerza gel a 10 minutos, disminuye filtrado y grosor de torta, NEW DRILL disminuye filtrado, aumenta viscosidad, pH y fuerza gel a 10 minutos, por último GOLD BORE disminuye filtrado, aumenta pH y fuerza gel a 10 minutos. Con la concentración menor sucede lo contrario.

Un parámetro de suma importancia para la elaboración de un lodo de perforación es el pH ya que este se encarga de mantener el óptimo control de algunos sistemas en el lodo de perforación. Como se identificó en la Figura 72 el SPERSENE fue el que mayor influencia tuvo entre todos los aditivos; a pesar de esto, el SPERSENE es un aditivo que no favorece el aumento en el pH sino que provoca una disminución por lo que se convierte en un aditivo poco viable para la formulación del fluido; el SPERSENE sin lugar a dudas es el aditivo que mayor influencia negativa tiene en los parámetros reológicos y la pérdida de filtrado al utilizarse en la preparación de las muestras, ya que afecta significativamente en comparación de los demás aditivos que se utilizaron y su ineffectividad se debe a que el SPERSENE es un aditivo que necesita un medio alcalino de alrededor de 9.5 para cumplir con un óptimo desempeño en las funciones que este realiza, que consisten en disminuir la pérdida de filtrado y estabilizar la viscosidad del fluido de perforación; sin embargo el aditivo que provoca un aumento en el pH es el GOLD BORE pero este es un incremento poco favorable por que no ayuda en el cumplimiento de la mayoría de los parámetros establecidos para un óptimo desempeño en el proceso de perforación. MIL PACK es el nombre comercial de un aditivo que está compuesto principalmente de celulosa polianiónica, la cual ayuda a regular y controlar la pérdida de filtrado, la viscosidad del fluido, entre otras propiedades importantes en un lodo de perforación, este aditivo cumple las mismas funciones que la carboximetilcelulosa, un aditivo que se utiliza actualmente en los procesos de

perforación. Es el aditivo que mayor impacto tiene en las propiedades reológicas y la pérdida de filtrado en la elaboración de las suspensiones.

Un aditivo que no se encuentra en el listado de aquellos que tienen un mayor impacto en la reología y filtrado del lodo es el LIGCON, su principal función en los fluidos de perforación es proporcionar una distribución uniforme entre las partículas sólidas en el agua, en este caso agua geotérmica, dando lugar a un sistema de estabilidad por tiempos largos lo que es de suma importancia en los procesos de perforación. Además, según el análisis estadístico aumenta pH y viscosidad, disminuye filtrado junto con grosor de revoque en la concentración mayor.

### Preliminares parte B.

En esta etapa se llevó a cabo el análisis de optimización para una serie de muestras utilizando los aditivos que se identificaron en la etapa anterior, obteniendo los siguientes resultados:

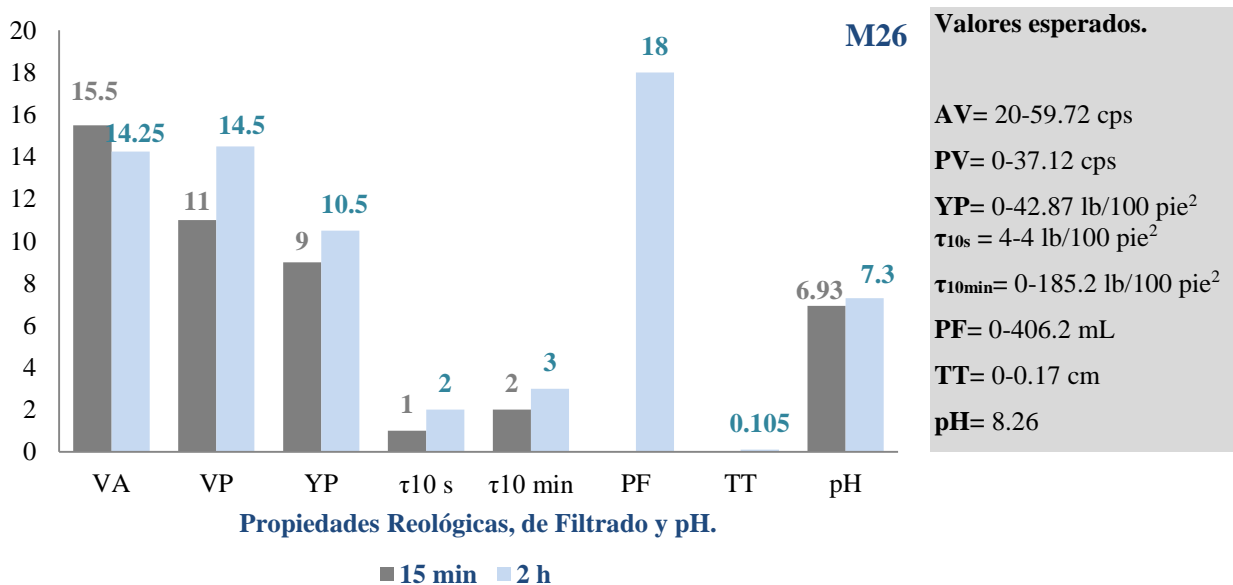


Figura 89. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 26.

Para la muestra 26 (2 horas), los datos obtenidos de la VP, YP,  $\tau_{10\text{min}}$ , PF y TT se encontraron dentro del rango de los esperados por el análisis de optimización, la  $\tau_{10\text{s}}$  y el pH (no presenta rango) fueron menores (figura 89).

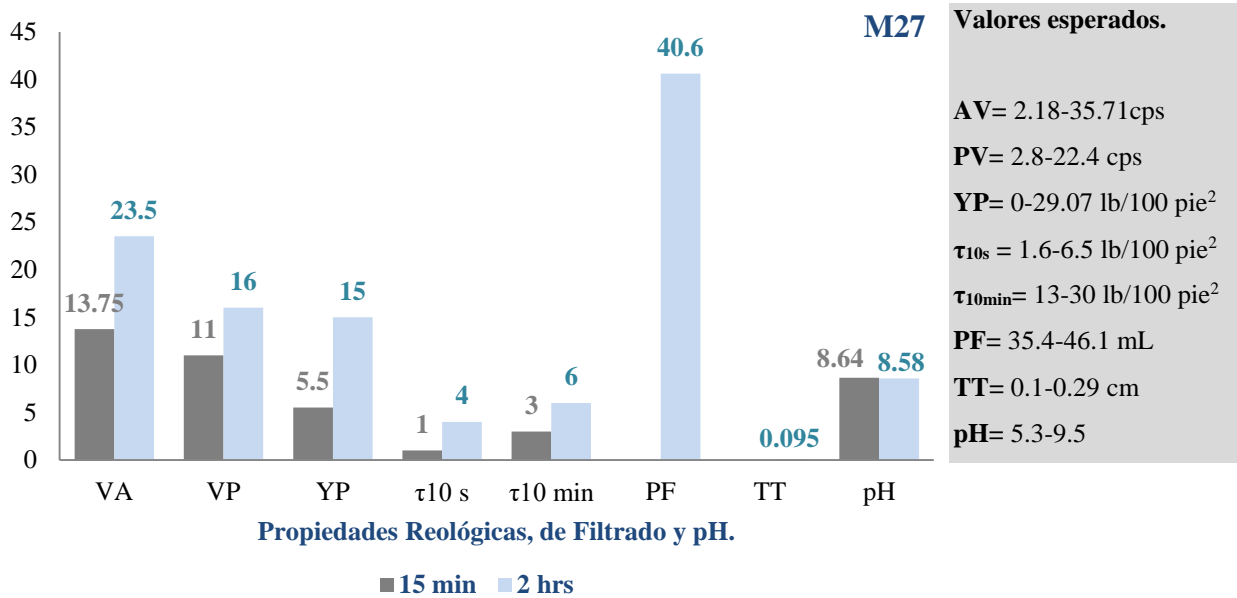


Figura 90. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 27.

De los datos obtenidos en la muestra 27 (figura 90) se encontraron dentro del rango de los esperados por el análisis de optimización la VA, VP, YP,  $\tau_{10\text{s}}$ , PF y pH (no presenta rango), menos la TT que fue menor.

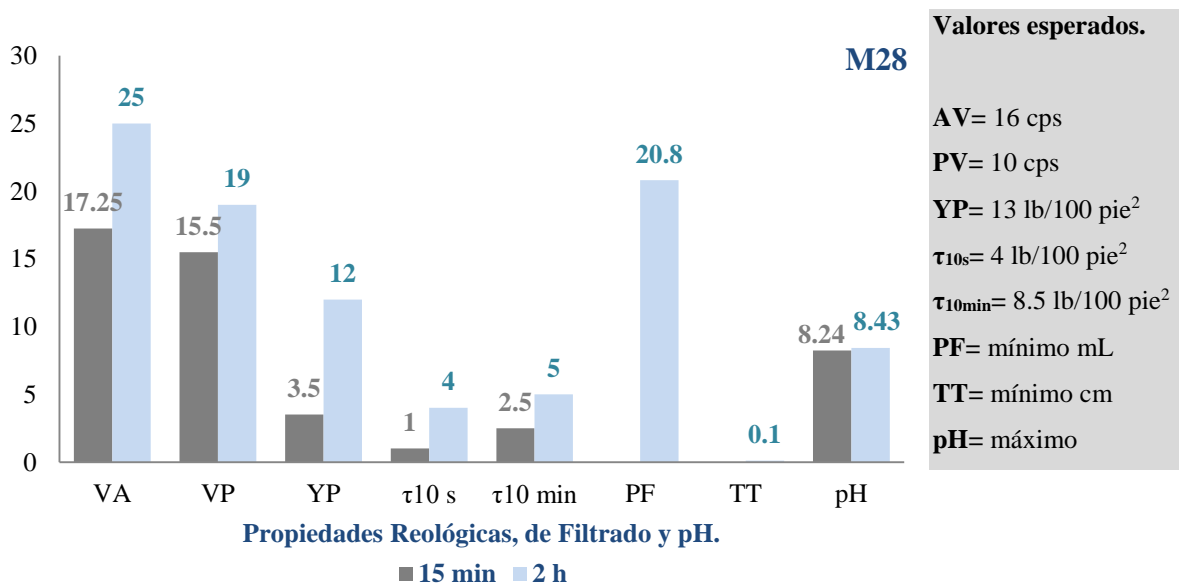


Figura 91. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 28.

En la figura 91 se observa que los valores para la muestra 28 no se encontraron dentro de los esperados por el análisis de optimización a excepción de la  $\tau_{10s}$ .

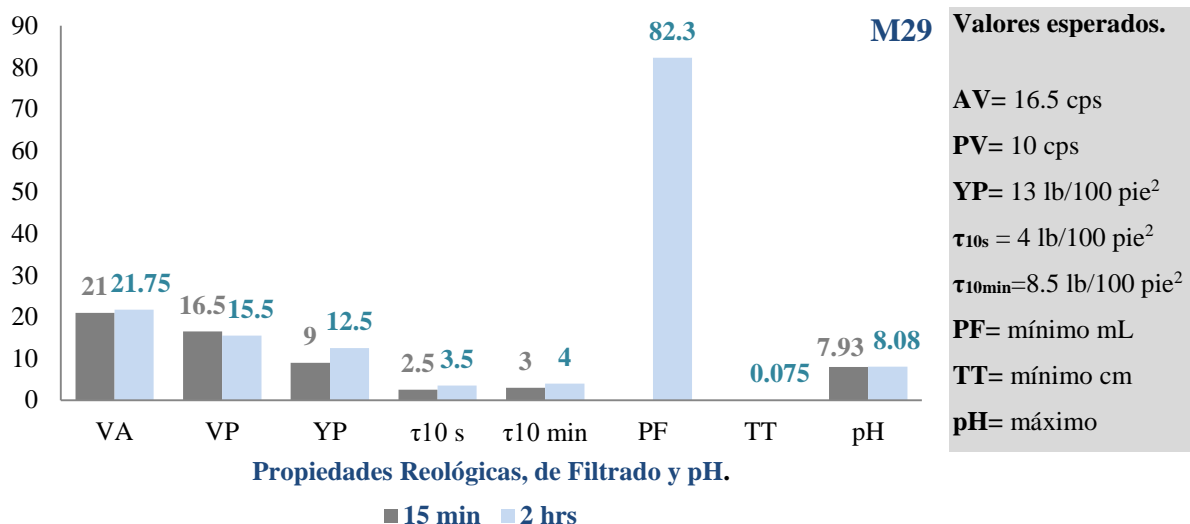


Figura 92. Gráfico de las Propiedades Reológicas, filtración y pH a 15 min. y 2 hrs. de la muestra 29.

Los resultados de la figura 92 exponen que los valores para la muestra 29 no se encontraron dentro de los esperados por el análisis de optimización.

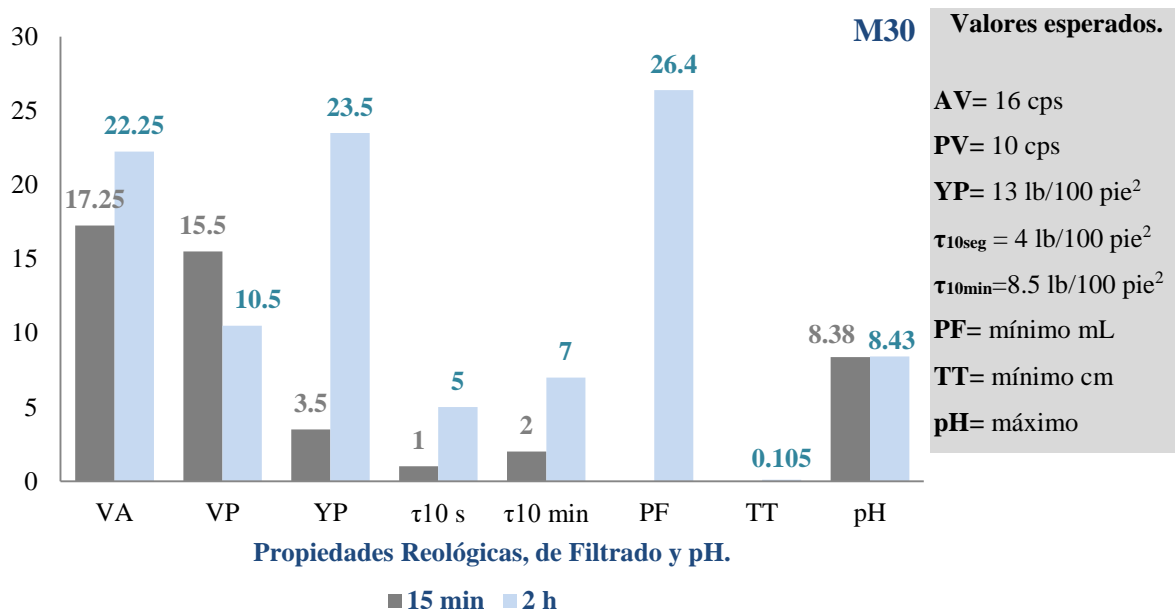


Figura 93. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 30.

Según muestra la figura 93 los parámetros sufren un aumento en sus valores, exceptuando la VP que fue la única en la cual su valor después de dos horas de

agitación disminuyó. Además, los valores esperados fueron superados en el caso de propiedades reológicas, menos la  $\tau_{10\text{min}}$  que fue menor.

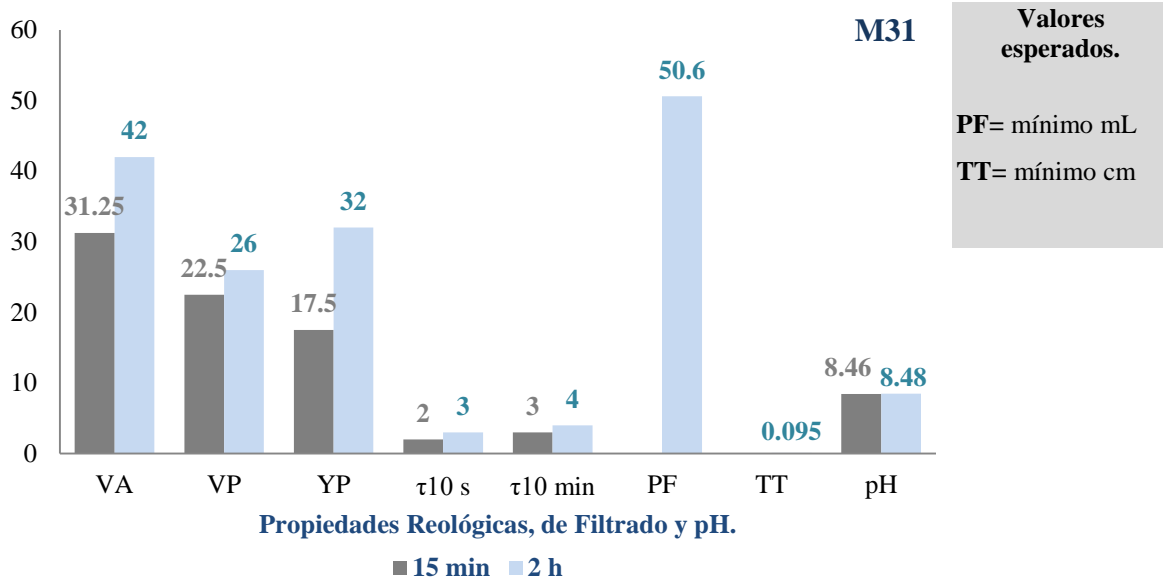


Figura 94. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 31.

En la figura 94 se encuentran medidas todas las propiedades reológicas, pero las de mayor interés en la muestra 31 son la PF y TT debido a los aditivos y las cantidades utilizadas según la tabla 20. Se demuestra que el TT cumple con los valores esperados mientras que la PF resultó ser un valor elevado, muy lejos de lo esperado.

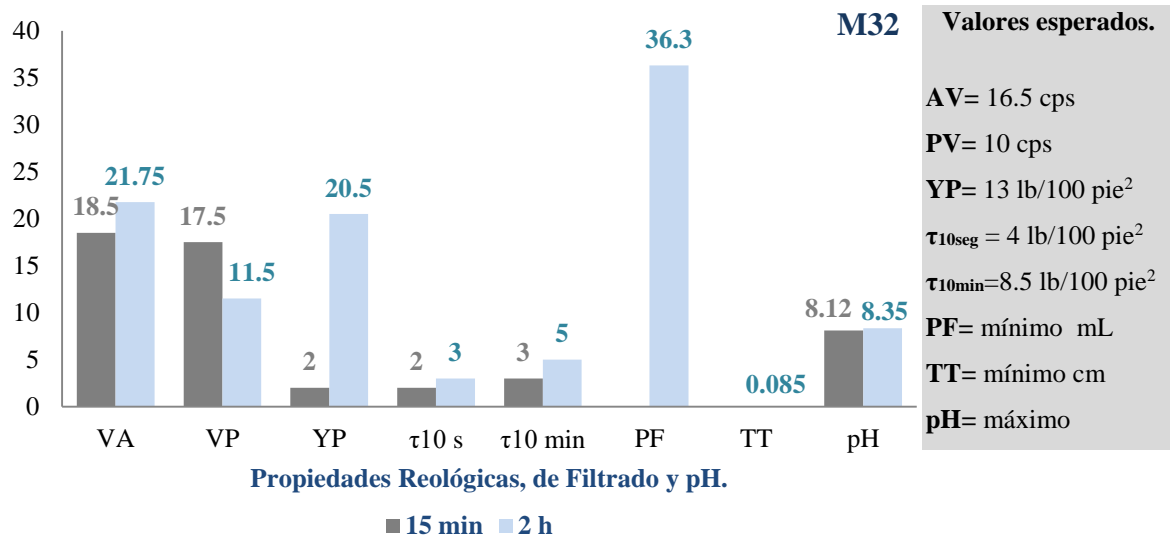


Figura 95 . Gráfico de las Propiedades Reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h de la muestra 32.

Las propiedades reológicas medidas para la muestra 32 se reflejan en la figura 95 en donde es evidente que los valores de las propiedades después de dos horas de agitación aumentaron exceptuando el de la VP que disminuyó, de esta manera también se evidencia que únicamente TT cumple con los valores esperados después de dos horas de agitación.

Cada valor obtenido de las propiedades reológicas y PF por muestra, se comparó con datos de referencia de tres etapas (*Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015*), cuyo resultado del contraste se muestra en la siguiente tabla:

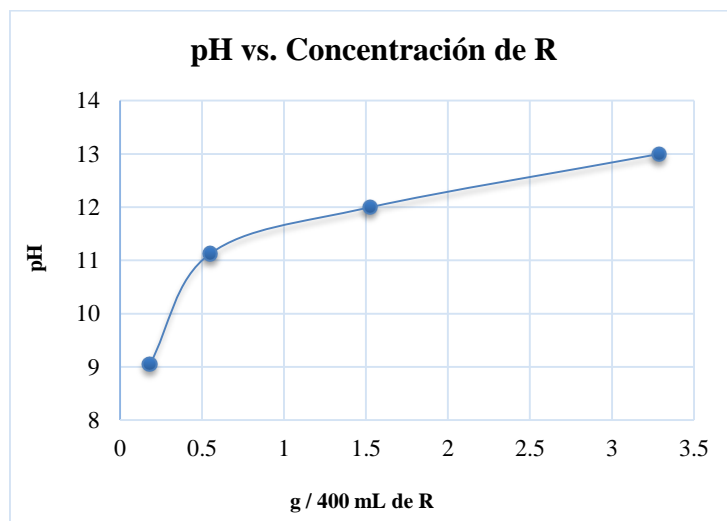
**Tabla 33. Comparación de parámetros reológicos, de pérdida de filtrado y pH para tres etapas de referencia.**

Parámetros reológicas, de PF y pH.																						
		VP			YP			$\tau_{10s}$			$\tau_{10min}$			PF			TT			pH		
ETAPAS	MUESTRA	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	26	-	-	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	+	+	-	-	C	-	-	-
	27	C	C	C	C	C	C	-	-	C	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	28	C	C	C	-	-	C	-	-	C	-	-	-	+	+	+	-	-	C	-	-	-
	29	-	-	C	-	-	C	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	30	-	-	-	C	C	+	-	-	C	-	-	-	+	+	+	-	-	C	-	-	-
	31	C	+	C	+	+	+	-	C	C	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	32	-	-	-	C	C	C	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-

+ = valor superior a rango      - = Valor inferior a rango      C = cumple

La tabla 35 expone las etapas en las que las formulaciones de la parte B pueden ser utilizadas, según los datos reflejados existen valores de muestras que pueden ser empleados en más de una etapa en el proceso de perforación, principalmente en la etapa I y III. Pero de las suspensiones analizadas ninguna cumple con todos los datos y esto es para las tres etapas.

Como ya se mencionó, en la parte A e inicios de la parte B no se obtuvo el pH necesario para operar en los procesos de perforación de pozos, es por ello se hizo uso de R, aditivo que no fue considerado al principio de la investigación y elaboración del cribado de variables. Con este aditivo se realizaron pruebas preliminares para asegurar un aumento significativo en el pH, y protección de la broca como de las tuberías. Con los datos de la tabla 24 se realizó una curva de pH versus concentración de R (figura 96).



**Figura 96. Curva de pH vs. Gramos de R para 400mL de agua geotérmica.**

En esta determinación se notó que al llegar a pH = 11.63 e ir agregando más R el cambio de pH fue regularmente constante, por lo que se atribuye a la formación de un buffer, esto fue así hasta finalizar dicha prueba. Esta curva se asemeja un poco a la que presenta dicho compuesto en agua destilada que en agua salada. (*Schlumberger, 2007*)

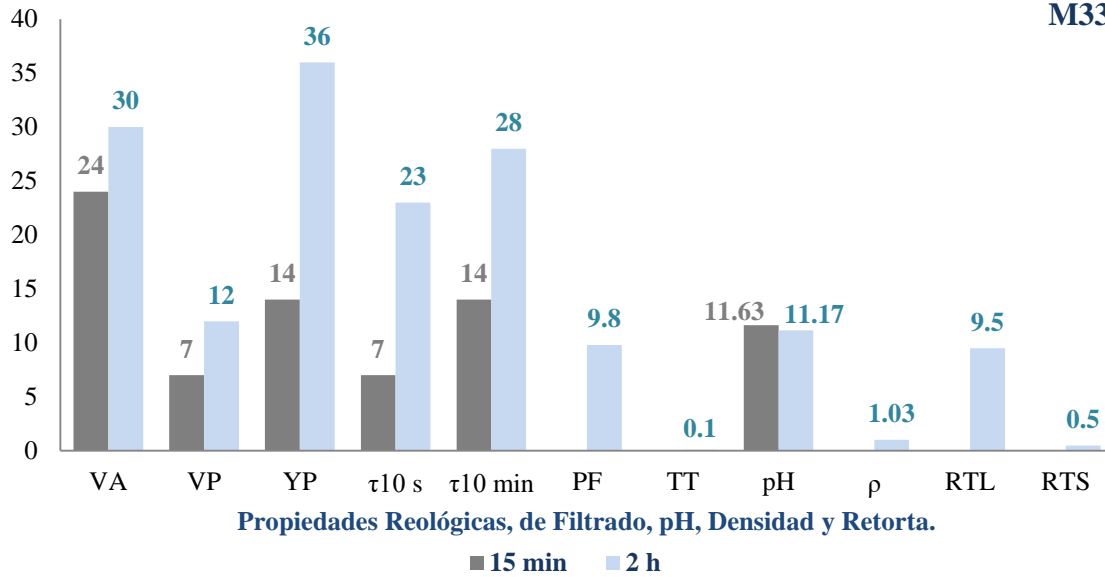


Figura 97. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h, agregando a este último  $\rho$  y RT de la muestra 33.

La figura 97 muestra un parámetro que no se había medido con anterioridad el cual es la densidad y según (De la O, 2012) los valores medidos para la muestra 33 cumple con el rango aceptable para un fluido de perforación. Eso sin tomar en cuenta la RT, cuyos valores se representan como RTL que es la cantidad de líquidos presente en el fluido y RTS la cantidad de sólidos para un volumen de 10 mL.

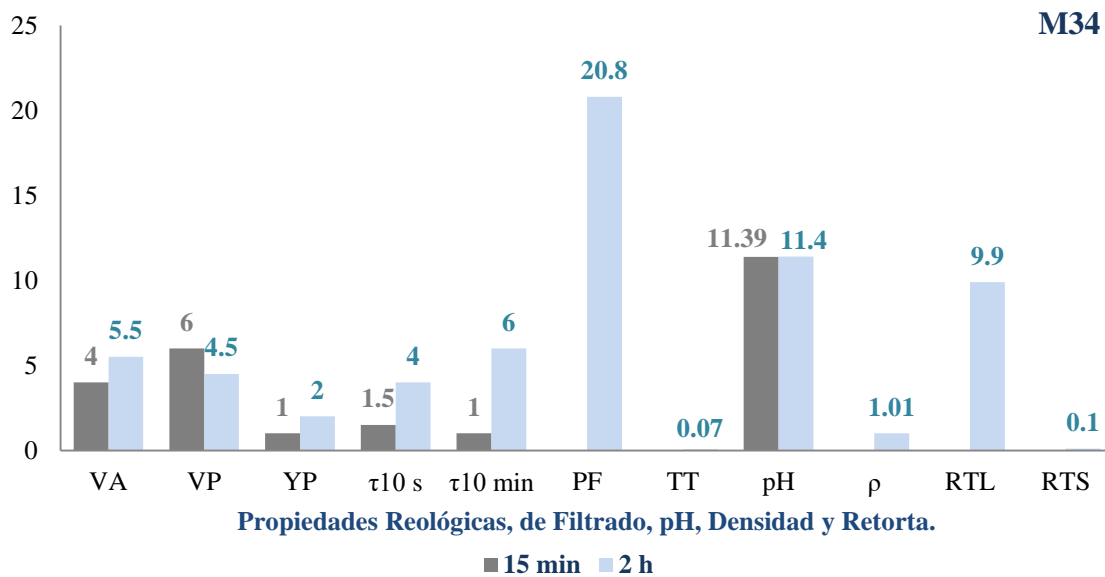


Figura 98. Gráfico de las propiedades reológicas, filtración y pH a 15 min y 2 h, agregando a este último  $\rho$  y RT de la muestra 34.

Según lo muestra la figura 98 la densidad no cumple con el parámetro establecido por (De la O, 2012), además un aspecto importante a retomar es que todos los parámetros aumentaron después de dos horas de agitación, sin embargo la VP fue la única que disminuyó después de las dos horas que se mantuvo en agitación la muestra 34. En el caso de la RTL es mayor y RTS es menor que en la suspensión 33.

Cada valor obtenido de las propiedades reológicas, PF, pH, densidad y RT por muestra, se comparó con datos de referencia de tres etapas (Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015), cuyo resultado del contraste se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 34. Comparación de parámetros reológicos, de filtrado, pH, densidad y retorta para tres etapas de referencia.**

Parametro reológicas, PF, densidad y RT																											
ETAPAS Muestras	VP			YP			$\tau_{10seg}$			$\tau_{10min}$			PF			TT			pH			$\rho$			RTS		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
33	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	C	-	-	C	C	+	+	-	-	-	C	C	C
34	-	-	-	-	-	-	-	-	C	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-

+ = valor superior a rango      - = Valor inferior a rango      C = cumple

La tabla 34 presenta la información completa acerca de los parámetros medidos para la suspensión 33 y 34, en donde ninguna cumple en su totalidad con las tres etapas. También se tiene que tomar en cuenta que para estas dos muestras se utilizó la variable temperatura el cual es un factor que influye en los resultados.

## X. CONCLUSIONES.

Como se ha descrito anteriormente, los fluidos de perforación cumplen muchas funciones importantes en el proceso de perforación de un pozo geotérmico. Para que dichas funciones puedan cumplirse es necesario que las propiedades reológicas sean las adecuadas según la etapa de perforación y aditivos. El análisis estadístico y la elaboración de las 34 muestras demostró que no es necesario la utilización de los 18 aditivos con los que se contaba inicialmente, ya que según los resultados obtenidos los que mayor impacto tuvieron en las formulaciones solamente fueron 5 aditivos, incluida en esta lista la arcilla que se está usando como base para la formulación de las suspensiones.

Según datos bibliográficos y en contraste con los resultados que se obtuvieron al medir las propiedades reológicas de las 34 suspensiones, se demostró que la Atapulgita es capaz de cumplir una función importante en la reología de las mezclas, principalmente puede hacerse uso de esta arcilla utilizando agua geotérmica y con el rango de temperatura empleado sin afectar la función de esta como viscosificante y gelificante.

El volumen de filtrado y el revoque no están relacionados ni de forma inversa ni directa ya que a medida que aumenta el grosor de la torta el filtrado no disminuye. Según lo expresado por (*Calçada, Scheid, de Araújo, Waldmann, & Martins, 2011*) y (*Parada, Maldonado, Mejía, & Tenelanda, 2015*), las cuales indican una relación directa entre el tamaño de revoque y filtrado.

De acuerdo a la prueba t para dos muestras emparejadas de la VA, no es necesario agitar hasta 2 horas si no que basta con 15 minutos.

Varias muestras mostraron valores de parámetros dentro de los rangos citados para las tres etapas, aunque no en su totalidad, esto no significa que estos parámetros no se puedan implementar ya que el suelo de cada pozo perforado presenta propiedades

diferentes en las cuales se puede ver afectada positivamente o negativamente por dichos valores y aditivos.

En la parte B para las dos muestras analizadas obtuvimos que la pérdida de filtrado, el punto cedente, la retorta de sólidos, la fuerza gel a 10 segundos y 10 minutos están dentro de la combinación del diseño factorial de concentración máxima y mínima establecida en esta investigación, contrario a este resultado tenemos el revoque, la densidad y viscosidad plástica ya que los valores de la muestra al máximo y mínimo son inferior a lo esperado, por lo tanto la concentración máxima establecida puede ser utilizada como la mínima definiendo una nueva para esta. Diferente situación es la del pH por que supera los valores de los rangos establecidos. Todo esto da la pauta para afirmar que al desarrollar más estudios de muestras puede crearse un modelo que permita desarrollar un fluido según las necesidades de la etapa de perforación.

## **RECOMENDACIONES Y DIFICULTADES.**

### **11.1 Recomendaciones.**

- ✓ Utilizar un agitador mecánico en lugar de un magnético ya que este no realizó su función debido a la viscosidad del fluido.
- ✓ Tomar en cuenta las dificultades que se pueden presentar a la hora de utilizar los equipos necesarios para las medidas como el reómetro y contar con los equipos necesarios.
- ✓ Dejar reposar 15 minutos el Reómetro después de 30 minutos de uso para evitar un sobre calentamiento.
- ✓ Manipular cuidadosamente la arcilla (Atapulgita) ya que se esparce en el aire con facilidad.
- ✓ Controlar el tiempo de agitación para cada una de las muestras.
- ✓ Contar con la suficiente cantidad de agua geotérmica que se utilizará en la formulación de las muestras.
- ✓ Contar con la cantidad suficiente de aditivos que se utilizaran en la formulación de las muestras.

- ✓ Utilizar el mismo tipo de papel filtro (Fann de 9 cm de diámetro) para todo el proceso o un tipo por cada etapa del proceso experimental para homogenizar resultados.

## 11.2 Dificultades.

- ✓ Con el agitador magnético a medida se agregaban los aditivos a la muestra 1, se hacía más difícil agitar, por lo tanto, se recurrió al uso de un agitador mecánico.
- ✓ Se presentaron problemas con el filtro prensa debido a que los empaques de este ya estaban en mal estado por lo tanto se debe recurrir a mayor fuerza de torsión para asegurar el sellado utilizando una llave Stillson. También las conexiones que unen el manómetro con la manguera (se encontraban en mal estado) presentaron fuga.

## XI. ANEXOS.

### 12.1 Anexos parte A.

#### Anexo 1. Muestra 9.

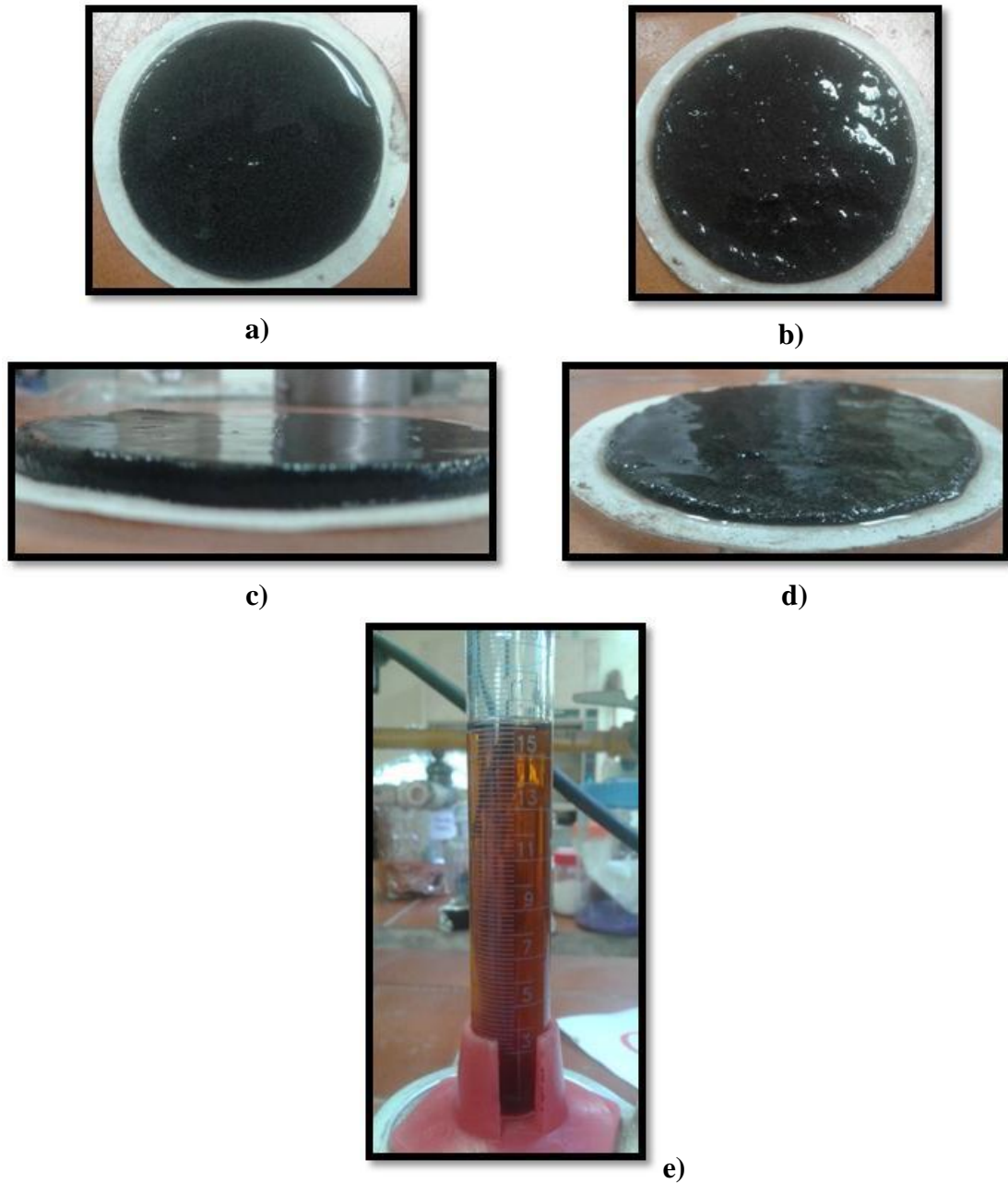
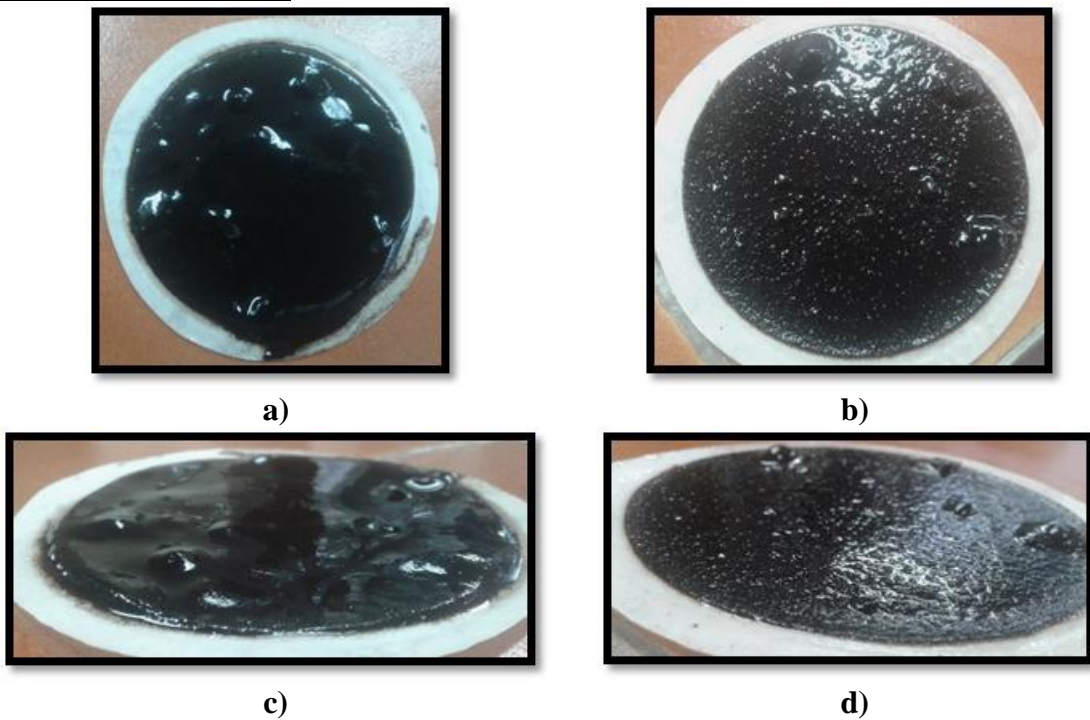


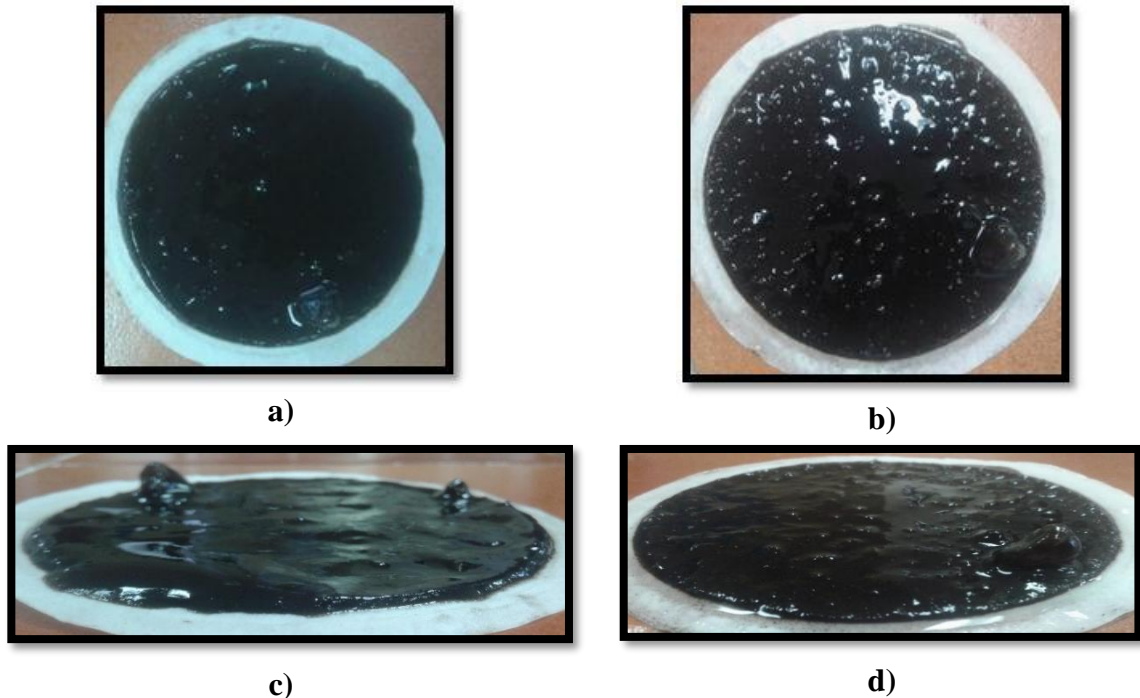
Figura 99. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado.

**Anexo 2. Muestra 12.**



**Figura 100. Fotos del revoque obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque y d) grosor después de lavar el revoque.**

**Anexo 3. Muestra 17.**

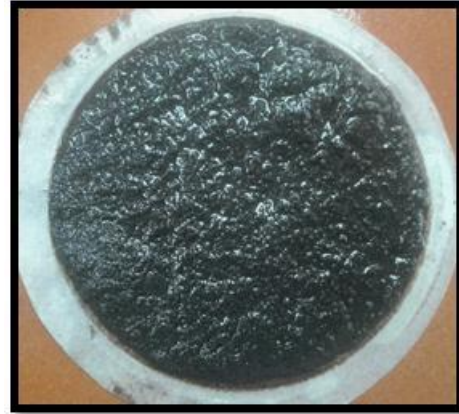


**Figura 101. Fotos del revoque obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque y d) grosor después de lavar el revoque.**

**Anexo 4. Muestra 13.**



a)

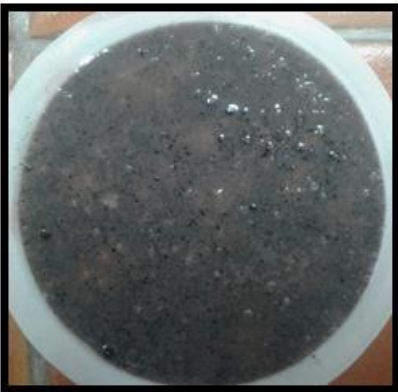


b)

Figura 102. Fotos del revoque obtenido en la prueba de filtración parte A: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque.

12.2Anexos parte B.

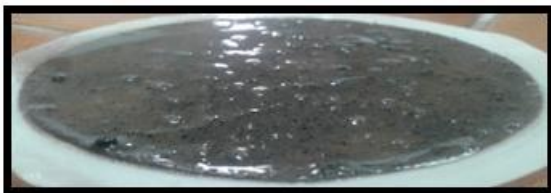
**Anexo 5. Muestra 27.**



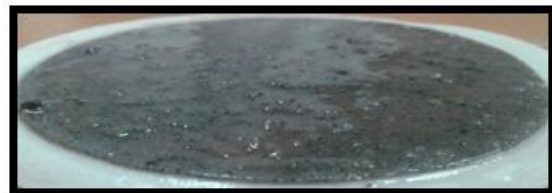
a)



b)



c)



d)



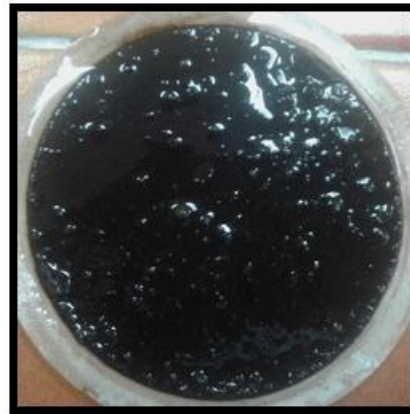
e)

Figura 103. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado.

**A nexos 6. Muestra 31.**



a)



b)



c)



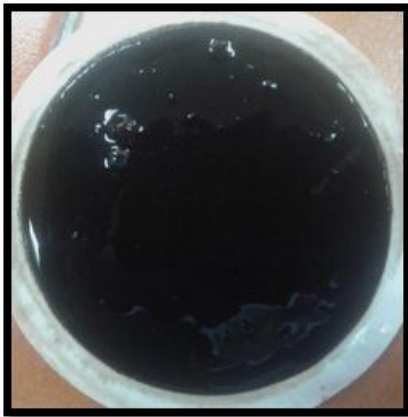
d)



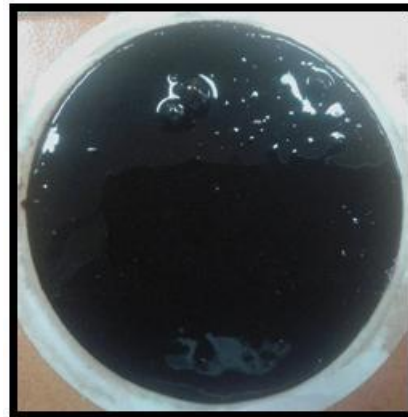
e)

Figura 104. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado.

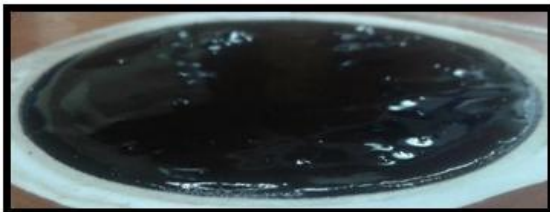
**Anexo 7. Muestra 31 (primera modificación).**



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 105. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque, d) grosor después de lavar el revoque y e) coloración del filtrado.

**Anexo 8. Muestra 31 (segunda modificación).**



a)



b)



c)



d)

Figura 106. Fotos del revoque y filtrado obtenido en la prueba de filtración parte B: a) apariencia antes de lavar el revoque, b) apariencia después de lavar el revoque, c) grosor antes de lavar el revoque y d) grosor después de lavar el revoque.

## XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Abdou, M. I., Al-sabagh, A. M., & Dardir, M. M. (2013). Evaluation of Egyptian bentonite and nano-bentonite as drilling mud. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22(1), 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.07.002>
2. Aboudi Mana, S. C., Hanafiah, M. M., & Chowdhury, A. J. K. (2017). Environmental characteristics of clay and clay-based minerals. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(3), 155-161. <https://doi.org/10.1080/24749508.2017.1361128>
3. Altun, G., & Serpen, U. (2005). Investigating Improved Rheological and Fluid Loss Performance of Sepiolite Muds Under Elevated Temperatures. *Congreso Mundial de Geotermia 2005.*, 12. Recuperado de <https://bit.ly/2GkpQfQ>
4. Amoco Production Company. (1994). *Drilling Fluids Manual* . (pp. 1-1, 1-2, 4-15, 4-16,4-17,4-19, 4-20, 8-3) [Manual.]. Recuperado de LaGeo S.A de C.V.
5. Andrade, F. A., Al-Qureshi, H. A., & Hotza, D. (2011). Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, 51(1-2), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>
6. Arias, D. (2015, septiembre 13). Funciones de los fluidos de perforación. [Blog.]. Recuperado 20 de junio de 2018, de Funciones de los fluidos de perforación. website: <https://bit.ly/2IrPXn4>
7. Artiga, K. P. A., & Mata, J. B. A. (2004). *Evaluación y análisis de los beneficios de la ecoeficiencia en el proceso de la perforacion de pozos geotérmicos.* (Postgrado., Universidad de El Salvador). Recuperado de <https://bit.ly/2SaC8JAYala>, J. A. (2014). *GAS - Mineral equilibrium in the Berlin*

- geothremal field, El Salvador*. (Investigativo. N.º 14). Recuperado de United Nations University (UNU). website: <https://bit.ly/2BIb3Yr>
8. Baker Hughes INTEQ. (1998). *Fluidos*. (pp. 1-13, 1-14, 1-15, 1-16) [Manual de Ingeniería.]. Recuperado de LaGeo S.A de C.V.
  9. Basto, C. G., & Cjamarca, S. A. (2017). *Determinación dela superficie específica en suelos Caoliníticos y Bentónicos mediante la aplicación de adsorción de azul de metileno aplicando diferentes gradientes térmicos*. (Tesis de pregrado., Universidad Católica de Colombia.). Recuperado de <https://bit.ly/2SxAcf1>
  10. Bautista, A. Maria. (2006). *Formulación y evaluación de fluidos de perforación de base agua de alto rendimiento aplicados al campo Balcón como sustitutos de lodo base aceite*. (Postgrado., Universidad Industrial de Santander.). Recuperado de <https://bit.ly/2SS6ynZ>
  11. Caballero, E., & Cisneros, C. J. (2006). Proceso de hidratación de la Bentonita mediante SEM Ambiental. *Macla.*, 6, 113-115.
  12. Caenn, R., Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (2011a). Introduction to Drilling Fluids. En *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (6th Edition., pp. 1-37). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383858-2.00001-9>
  13. Caenn, R., Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (2011b). The Filtration Properties of Drilling Fluids. En *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (pp. 271-306). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383858-2.00006-8>

14. Caenn, R., Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (2011c). The Rheology of Drilling Fluids. En *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (pp. 179-269). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383858-2.00005-6>
15. Calçada, L. A., Scheid, C. M., de Araújo, C. A. O., Waldmann, A. T. A., & Martins, A. L. (2011). Analysis of dynamic and static filtration and determination of mud cake parameters. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 5(3), 159-170. <https://doi.org/10.5419/bjpg2011-0016>
16. Catálogo de Equipo Baroid. [Tienda online]. (s. f.). Recuperado 11 de julio de 2019, de Proeti website: <https://bit.ly/2wlBnEu>
17. Chemwotei, S. C. (2011). *Geothermal Drilling Fluids*. (Revisión. N.º 10; pp. 149-176). Recuperado de United Nations University (UNU). website: <https://bit.ly/2GxpwJT>
18. Chesworth, W. (Ed.). (2008). *Encyclopedia of soil science*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
19. Chhabra, R. P. (2010). Non-Newtonian Fluids: An Introduction. En J. M. Krishnan, A. P. Deshpande, & P. B. S. Kumar (Eds.), *Rheology of Complex Fluids* (pp. 3-34). [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6_1)
20. Christidis, George. E., & Huff, Warren. D. (2009). Geological Aspects and Genesis of Bentonites. *Elements*, 5(2), 93-98. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.2.93>
21. Chryssikos, G. D., Gionis, V., Kacandes, G. H., Stathopoulou, E. T., Suarez, M., Garcia-Romero, E., & Del Rio, M. S. (2009). Octahedral cation distribution in palygorskite. *American Mineralogist*, 94(1), 200-203. <https://doi.org/10.2138/am.2009.3063>

22. Clem, A. G., & Doehler, R. W. (1960). Industrial applications of Bentonite. *Clays and Clay Minerals.*, 272-283.
23. Porter-Cable. (2006). *Pancake Compressor*. (p. 51,52) [Instruction manual.]. Recuperado de <https://bit.ly/2Q7DzYu>
24. Correía, J., Godoy, G., García, M., & Vega, R. (2015). Formulación de un fluido de perforación base Diesel de bajo Impacto Ambiental. *Boletín de Geología*, 37(2). Recuperado de <https://bit.ly/2GK4B6s>
25. De la O, J. E. (2012). *Estudio experimental para la evaluación de hundimiento de barita acreción en sistemas base no acuosa empleados en la perforación de aguas profundas*. (Postgrado., Universidad Nacional Autónoma de México.). Recuperado de <https://bit.ly/2EdYK7H>
26. Díaz Rodríguez, L. A., & Torrecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 41(5), 459-470. <https://doi.org/10.3989/cyv.2002.v41.i5.665>
27. Drilling through direct circulation. [Coprporativa]. (2000, 2019). Recuperado 20 de junio de 2018, de Massenza Rigs website: <https://bit.ly/2V7nJ2l>
28. Egloffstein, T. A. (2001). Natural bentonites Finfluence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes.*, 19, 427-444.

29. Electrochemistry - 200 Series Meter /Model 225 [Tienda online]. (2010). Recuperado 25 de junio de 2018, de Denver Instrument website: <https://bit.ly/2JrA90c>
30. Estrada, D., & Conde, C. (1967). Estudio y caracterización de una atapulgita. *Ciencia y Técnica*, 6(6), 717-730.
31. Fann Instrument Company. (2018). Viscometer - Model 35 - FANN® [Tienda online]. Recuperado 25 de junio de 2018, de fann. website: <https://bit.ly/2DcENPI> Galan, E. (1996). Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay Minerals*, 31(04), 443-453. <https://doi.org/10.1180/claymin.1996.031.4.01>
32. Fann Kit Retorta Aceite y Agua 10ml. [Tienda online]. (2011). Recuperado 11 de julio de 2019, de Eurosul Fornecedora de Navios Ltda website: <https://bit.ly/2GaWoal>
33. Galan, E. (1996). Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay Minerals*, 31(04), 443-453. <https://doi.org/10.1180/claymin.1996.031.4.01>
34. García-Rivas, J., Sánchez del Río, M., García-Romero, E., & Suárez, M. (2017). An insight in the structure of a palygorskite from Palygorskaja: Some questions on the standard model. *Applied Clay Science*, 148, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.006>
35. Glas-Col. (2014). *Stirrers - G.K.H. Stirring Systems* (p. 55) [Instruction manual.]. Recuperado de <https://bit.ly/2RkSw9Y>
36. Guidos, J., & Burgos, J. (2011). *Geothermal activity and development in El Salvador producing and developing*. (p. 12) [Investigativo.]. Recuperado de United Nations University (UNU) y LaGeo. website: <https://bit.ly/2BNUk5V>

37. Gutiérrez, X., Carolina. (2008). *Estudio Geoquímico de gases en tonrno a la falla el Hoyon, Belín, Usulután*. (Postgrado., Universidad de El Salvador). Recuperado de <https://bit.ly/2T4gQRY>
38. Haden, W. L. (1961). Attapulgitite: Properties and Uses. *Clays and Clay Minerals*, 10(1), 284-290. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1961.0100123>
39. Hensen, E. J. M., & Smit, B. (2002). Why Clays Swell. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(49), 12664-12667. <https://doi.org/10.1021/jp0264883>
40. Kahr, G., & Madsen, F. T. (1995). Determination of the cation exchange capacity and the surface area of bentonite, illite and kaolinite by methylene blue adsorption. *Applied Clay Science*, 9(5), 327-336. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(94\)00028-O](https://doi.org/10.1016/0169-1317(94)00028-O)
41. Karnland, O. (2010). *Chemical and mineralogical characterization of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository* (p. 9.) [Reporte Técnico]. Recuperado de Gestión de Residuos y Combustibles Nucleares (SKB) website: <https://bit.ly/2OWNnrT>
42. Ketterings, Q., Reid, S., & Rao, R. (2007). *Cation Exchange Capacity (CEC)*. (Hoja informativa N.º 22; pp. 1-2). Recuperado de Department of Crop and Soil Sciences website: <https://bit.ly/2JrqUxc>
43. LaGeo - Energía Geotermica en El salvador, centrales. [Corporativa.]. (1999, 2019). Recuperado 9 de mayo de 2018, de LaGeo - GrupoCEL. website: <http://www.lageo.com.sv/index.php?cat=1008&title=Central%20Geot%20E9rmica%20Berl%20EDn&lang=es>
44. Lutita [Educativa.]. (2019). Recuperado 29 de julio de 2019, de Schlumberger Oilfield Glossary website: <https://bit.ly/331lvX5>

45. Márquez, S. B., Correa, F. B. C., & Espinosa, G. A. A. (2014). Mejoramiento de los fluidos de perforación usando nanopartículas funcionalizadas; reducción de las pérdidas de filtrado y del espesor de la torta. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 0(35), 5-14. <https://doi.org/10.15446/rbct.n35.43179>
46. Marroquín, B. A., Pérez, G. C., & Rivera, L. I. (2012). *Evaluación fisicoquímica de arcillas naturales existentes en el campo geotérmico de Berlín, Usulután y elaboración del diagnóstico de su comportamiento reológico durante la perforación de pozos geotérmicos*. (Tesis de pregrado., Universidad de El Salvador). Recuperado de <https://bit.ly/2xDT7dF>
47. MI SWACO. (2004). *Viscosificador Salt Gel*. (p. 1) [Boletín de producto.]. Recuperado de Proporcionado por LaGeo
48. Min, L. (2015). *博士論文最終版-臧利敏 (Preparation and Electrical Properties of Conducting Polypyrrole Composites Based on Different Kinds of Dopants)* (Tesis doctoral, Akita). Recuperado de <file:///C:/Users/OTERO/Downloads/博士論文最終版-臧利敏.pdf>
49. Morera, B. J. P., & Calderón, J. T. T. (2017). *Determinación de la superficie específica en suelos Caoliníticos y Bentoníticos mediante la Técnica de Adsorción de agua destilada aplicando diferentes gradientes térmicos*. (Tesis de pregrado., Universidad Católica de Colombia.). Recuperado de <https://bit.ly/2AAPDw0>
50. Mumpton, F. A. (1956). New Data on Sepiolite and Attapulgite. *Clays and Clay Minerals*, 5(1), 136-146. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1956.0050111> }Murray, H. H. (2006). Chapter 2 Structure and Composition of the Clay Minerals and their Physical and Chemical Properties. En *Developments in Clay Science* (Vol. 2, pp. 7-31). [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(06\)02002-2](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(06)02002-2)

51. Naveena, B. J., Altaf, Md., Bhadriah, K., & Reddy, G. (2005). Selection of medium components by Plackett–Burman design for production of l(+) lactic acid by *Lactobacillus amylophilus* GV6 in SSF using wheat bran. *Bioresource Technology*, 96(4), 485-490. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.020>
52. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (1978). *Visión del estado actual de la geotermia en America Latina*. (Investigativo. N.º 2; pp. 1-345). Recuperado de <https://bit.ly/2U0ndmE>
53. Ovarlez, S., Giulieri, F., Delamare, F., Sbirrazzuoli, N., & Chaze, A.-M. (2011). Indigo–sepiolite nanohybrids: Temperature-dependent synthesis of two complexes and comparison with indigo–palygorskite systems. *Microporous and Mesoporous Materials*, 142(1), 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.12.025>
54. Parada, L. F., Maldonado, C., Mejía, M. J., & Tenelanda, E. (2015). *Propuestas de diseño para la perforación de pozos exploratorios*. (Tesis de pregrado., Universidad de El Salvador). Recuperado de <https://bit.ly/2Gy0Tg5>
55. Pérez, R., M. (2011). *Diseño de fluidos viscoelásticos para la perforación de hoyos productores de los campos Borburata y la Victoria*. (Postgrado., Universidad Central de Venezuela.). Recuperado de <https://bit.ly/2V1htsT>
56. Petruzzello, M., Rafferty, J. P., Bauer, P., & Duignan, B. (1994, 2019). Drilling mud | excavation [Educativa]. Recuperado 9 de mayo de 2018, de Encyclopedia Britannica website: <https://bit.ly/2JpPC0N>
57. Prasetia, A. E., Salazar, A. T. N., & Toralde, J. S. S. (2010). Corrosion Control in Geothermal Aerated Fluids Drilling Projects in Asia Pacific. *Corrosion Control in Geothermal Aerated Fluids Drilling Projects in Asia Pacific*, 7. Recuperado de <https://bit.ly/2SES1g0>

58. Rautureau, M., Figueiredo Gomes, C. de S., Liewig, N., & Katouzian-Safadi, M. (2017). Clay and Clay Mineral Definition. En M. Rautureau, C. de S. Figueiredo Gomes, N. Liewig, & M. Katouzian-Safadi, *Clays and Health* (pp. 5-31). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42884-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42884-0_2)
59. Richardson, E. (2018). Faults. [Educativa.]. Recuperado 1 de marzo de 2019, de Earth 520: Plate Tectonics and People. website: <https://bit.ly/2C1c7GP>
60. Robertson, R. H. S. (1950). Some Notes on Attapulgite. *Clay Minerals*, 0(4), 125-131. <https://doi.org/10.1180/claymin.1950.000.4.1>
61. Rodríguez, V. A. (2005). *Analysis of temperature and pressure measurements and production data for Berlín geothermal field, El Salvador*. (Investigativo. N.º 16; pp. 297-332). Recuperado de United Nations University (UNU). website: <https://bit.ly/2BJrILd>
62. Romero, E. (2004). *Génesis de arcillas magnéticas en la cuenca de Madrid: interrogantes planteadas* (Boletín Geológico y Minero. N.º 4; p. 634). Recuperado de Universidad Complutense de Madrid. website: <https://bit.ly/2SqQwyl>
63. Saboori, R., Sabbaghi, S., Kalantariasl, A., & Mowla, D. (2018). Improvement in filtration properties of water-based drilling fluid by nanocarboxymethyl cellulose/polystyrene core-shell nanocomposite. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8(2), 445-454. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0432-9>
64. Sachs-Barrable, K., Darlington, J. W., & Wasan, K. M. (2014). The effect of two novel cholesterol-lowering agents, disodium ascorbyl phytostanol phosphate (DAPP) and nanostructured aluminosilicate (NSAS) on the expression and

- activity of P-glycoprotein within Caco-2 cells. *Lipids in Health and Disease*, 13(1), 153. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-13-153>
65. Santamarina, J. C., Klein, K. A., Wang, Y. H., & Prencke, E. (2002). Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), 233-241. <https://doi.org/10.1139/t01-077>
66. Suárez, M., & García-Romero, E. (2011). Advances in the Crystal Chemistry of Sepiolite and Palygorskite. En *Developments in Clay Science* (Vol. 3, pp. 33-65). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53607-5.00002-5>
67. Toka, B., & Toka, N. (2015). Preparing Drilling Fluid Compositions for Geothermal Reservoirs. *World Geothermal Congress*, 8. Recuperado de <https://stanford.io/2VgYCxA>
68. Ubowska, A. (2010). Montmorillonite as a Polyurethane Foams Flame Retardant. *Archivum Combustionis*, 30(4), 459-462.
69. Vivaldi, J. L. M., & Gonzalez, J. L. (1962). A random intergrowth of Sepiolite and Attapulgite. En *Clays and Clay Minerals* (Vol. 11, pp. 592-602). Recuperado de <https://bit.ly/2X1NZwS>
70. Wang, W., & Wang, A. (2016). Recent progress in dispersion of palygorskite crystal bundles for nanocomposites. *Applied Clay Science*, 119, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.030>
71. Zhang, T., Li, T., Liu, Y., Li, Y., Guo, G., Cui, J., & Zhou, F. (2017). Preparation and Rheological Properties of Attapulgite Gel for Aqueous Suspensions. *Proceedings of the 2016 7th International Conference on Education, Management, Computer and Medicine (EMCM 2016)*. Presentado en 2016 7th International Conference on Education, Management, Computer and

Medicine (EMCM 2016), Shenyang, China. <https://doi.org/10.2991/emcm-16.2017.263>

- 72.** Zhao, L. Z., Zhou, C. H., Wang, J., Tong, D. S., Yu, W. H., & Wang, H. (2015). Recent advances in clay mineral-containing nanocomposite hydrogels. *Soft Matter*, *11*(48), 9229-9246. <https://doi.org/10.1039/C5SM01277E>
- 73.** Zhou, F., Li, T., Yan, Y., Cao, C., Zhou, L., & Liu, Y. (2015). Enhanced Viscosity of Aqueous Palygorskite Suspensions through Physical and Chemical Processing. *Advances in Materials Science and Engineering.*, *2015*, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2015/941580>