

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**"Caracterización física y mineralógica de muestras de  
materiales naturales y expandibles, que se utilizan en la  
industria de la perforación de pozos, tomando como  
comparación una muestra de suelos expandibles de la ciudad  
de Manta."**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

**Examen Complexivo**

**Previo la obtención del Título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**Presentado por:**

**HUMBERTO DAVID RODRÍGUEZ GONZÁLEZ**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2016**

## AGRADECIMIENTO

A mis padres, a las personas que me guían desde el cielo (Néstor Humberto y Clara Matilde). A mis hermanos, familiares y amigos que colaboraron en la realización de este trabajo de graduación

## DEDICATORIA

A MI MADRE

A MI ESPOSA

A MIS HIJOS

A MIS HERMANOS

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

Mauricio Cornejo Martínez Ph.D.

VOCAL



---

Kathy López Escobar Ph.D.

VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

\*La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de examen complejo me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL\*

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Humberto Rodríguez González

## RESUMEN

Durante estudios ingenieriles para la construcción de infraestructuras en la ciudad de Manta, se han reconocido suelos que se expanden al estar en contacto con agua. El objetivo del trabajo es caracterizar el suelo y reconocer una posible aplicación tecnológica como lodo de perforación. De acuerdo al estudio de mercado realizado entre 2000-2007, el mayor uso de estos suelos en Ecuador, es como lodo de perforación y su nombre comercial es bentonita. Para efectos de comparación se seleccionaron muestras de bentonitas, una importada y otra del mercado local. En la caracterización de las muestras se realizó ensayos reológicos, granulométricos y de difracción de rayos X. Los resultados permitieron distinguir presencia de arcillas expandibles por hidratación como esmectita y motmorillonita acompañadas de illita. Para los ensayos reológicos se utilizó material del pasante del tamiz 200 y las pruebas fueron: filtrado - prensa, el tiempo de embudo de Marsh, la viscosidad y el pH. El análisis granulométrico nos indicó que las tres muestras son limos de alta plasticidad. ***Los resultados obtenidos de las pruebas se comparan con normas internacionales y se evidencia que los suelos "Manta" y "Progreso" no cumplen con los requisitos mínimos para su aplicación como lodo de perforación.***

## ÍNDICE GENERAL

	Pág
RESUMEN	2
ÍNDICE GENERAL	3
ABREVIATURAS	6
SIMBOLOGÍA	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPITULO 1	11
1. ANTECEDENTES	
1.1.    Materiales expandibles en el Ecuador	15
1.2.    Aplicación tecnológica como lodo de perforación	18
1.3.    Ubicación de la zona de estudio	18
1.4.    Geología de la localidad	20
1.5.    Estudio de Mercado	21
1.5.1. Producción Nacional, Importación y Exportación	21
1.5.2. Principales aplicaciones de la bentonita	23
CAPÍTULO 2	25
2 ENSAYOS TECNOLÓGICOS	
2.1 Descripción de muestras	25

2.2	Análisis Reológicos	26
2.2.1	Densidad	26
2.2.2.	Viscosidad	27
2.2.2.1.	Viscosidad de embudo de Marsh	27
2.2.2.2.	Viscosidad aparente	28
2.2.2.3	Viscosidad plástica	29
2.2.2.4	Punto cedente	29
2.2.3.	Concentración iónica de Hidrógeno (pH)	30
2.2.4	Filtro – prensa	31
2.2.5	Ensayos Reológicos	31
2.2.5.1	Objetivos del ensayo	31
2.2.5.2	Equipos utilizados	31
2.2.5.3	Procedimiento y cálculos	32
2.3	Análisis de Suelos	34
2.3.1	Granulometría y Clasificación ASTM	34
2.3.1.1.	Ensayos de granulometría	35
2.3.1.1.1	Objetivos del ensayo	35
2.3.1.1.2	Instrumentos y equipos	35
2.3.1.1.3	Procedimiento	36
2.3.2	Límites de Atterberg	41
2.3.2.1	Determinación de los límites de Atterberg	43
2.3.2.2	Objetivo de la práctica	43

2.3.2.3	Instrumentos y equipos utilizados	43
2.3.2.4	Procedimiento	44
2.4	Difractograma de rayos X	51
2.4.1	Natural, glicolado y calcinado	52
CAPÍTULO 3		53
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	53
3.1	Ensayos reológicos	53
3.2	Granulometría	56
3.3	Difracción de rayos X	57
3.3.1	Caracterización de minerales en roca total	57
3.3.2	Caracterización de minerales en fracción arcil	61
CAPÍTULO 4		65
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
4.1	Conclusiones	66
4.2	Recomendaciones	67
APÉNDICES		69
BIBLIOGRAFÍA		71

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
API	American Petroleum Institute
DRX	Difracción de rayos X
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS 84	World Geodetic System 1984
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
NE	Noreste
E	Este
S	Sur
BCE	Banco Central del Ecuador
rpm	Revoluciones por minuto
op. cit	Obra citada
et al.	y otros

## SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de Hidrógeno
Kg/cm <sup>2</sup>	Kilogramo / centímetro cuadrado
g/cm <sup>3</sup>	Gramos / centímetros cúbicos
cm/s <sup>2</sup>	Centímetros / segundos al cuadrado
cP	Centipoises
Na <sup>+</sup>	Ión sodio
IP o I <sub>P</sub>	Índice de plasticidad
W <sub>L</sub> o L <sub>L</sub>	Límite líquido
W <sub>P</sub> o L <sub>P</sub>	Límite plástico
W <sub>C</sub> o L <sub>C</sub>	Límite de contracción
W <sub>n</sub>	Humedad natural
V <sub>h</sub>	Volumen de suelo húmedo
V <sub>s</sub>	Volumen de suelo seco
m <sub>s</sub>	Masa de suelo seco
γ <sub>w</sub>	Densidad del agua
F	Feldespato
Sm	Esmectita
Qz	Cuarzo
I	Illita

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Señal indicativa sobre el carretero Guayaquil – Manta.	18
Figura 1.2.- Mapa de Ecuador donde se indica zona de estudio	19
Figura 1.3.- Afloramiento en Manta, donde se extrajo la muestra	20
Figura 1.4.- Principales usos de la bentonita en Ecuador	23
Figura 2.1.- Muestras para estudio en laboratorio de la FICT	25
Figura 2.2.- Balanza electrónica y Balanza de Baroid	27
Figura 2.3.- Embudo de Marsh	28
Figura 2.4.- Viscosímetro de Fann	29
Figura 2.5.- Filtro – Prensa	30
Figura 2.6.- Ejemplo de formación de "cake"	31
Figura 2.7.- Curva Granulométrica, muestra MANTA	39
Figura 2.8.- Curva Granulométrica, muestra IMPORTADA	41
Figura 2.9.- Límites de consistencia o de Atterberg	42
Figura 2.10 Contenido de humedad vs N° de golpes, PROGRESO	46
Figura 2.11 Contenido de humedad vs N° de golpes, muestra MANTA	49
Figura 3.1.-DRX en Roca Total "MANTA"	58
Figura 3.2.-DRX en Roca Total "PROGRESO"	59
Figura 3.3.-DRX en Roca Total "IMPORTADA"	60
Figura 3.4.-DRX en fracción arcilla 10 micrones "MANTA"	62
Figura 3.5.-DRX en fracción arcilla 10 micrones "PROGRESO"	63

Figura 3.6.-DRX en fracción arcilla 10 micrones 'IMPORTADA'

64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Datos de importación de bentonita	22
Tabla 1.2	Países que han exportado a Ecuador	22
Tabla 2.1	Datos análisis reológico	33
Tabla 2.2	Resultados de análisis reológico	34
Tabla 2.3	Datos para prueba de granulometría, muestra MANTA	38
Tabla 2.4	Datos para granulometría, muestra IMPORTADA	40
Tabla 2.5	Datos para determinar límite líquido, PROGRESO	45
Tabla 2.6	Datos para determinar límite plástico, PROGRESO	47
Tabla 2.7	Datos para determinar límite a la contracción, PROGRESO	48
Tabla 2.8	Datos para determinar límite líquido, MANTA	49
Tabla 2.9	Datos para determinar límite plástico, MANTA	50
Tabla 2.10	Datos para determinar límite a la contracción, MANTA	50
Tabla 3.1	Resultados de los ensayos reológicos y de consistencia	54
Tabla 3.2	Resultados de granulometría	56

## INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país que basa su economía en la venta de petróleo. El gobierno ecuatoriano explora, perfora y explota hidrocarburos. Para la perforación petrolera uno de los principales materiales es la bentonita, nombre comercial de una arcilla expandible, que se utiliza en el sostenimiento de las paredes de los pozos.

Durante la construcción de infraestructuras, puentes, vías y demás en la ciudad de Manta, ingenieros civiles y arquitectos se encontraron con problemas en el diseño y construcción de sus obras por la presencia de material expandible; es por esta razón que se realizó el estudio en esta ciudad.

En el capítulo 1 se analiza los estudios locales realizados desde 1991 hasta el 2006, en el tema de arcillas; además, se menciona trabajo de caracterización realizado por Vega, Verdeja, Sancho & García en Perú. De esta manera se reconoce una gran necesidad de estos materiales en el mercado internacional y el poco aporte tecnológico que se realiza en Ecuador para el aprovechamiento de estos recursos, que son abundantes en nuestro territorio. Perugachi, Paredes & Cornejo (2006) destacan los estudios que realiza la ESPOL a través de sus investigadores y como benefician los resultados. Morales, Varejao, Mendes & Carrión (2006)

analizaron arcillas de la ciudad de Guayaquil, perteneciente al grupo Ancón y con los resultados obtenidos concluyeron que se trata de una arcilla bentonítica cálcica. Ensayos de activación ácida mostraron que es posible obtener arcilla modificada químicamente que podría ser utilizada en nuevas industrias. Perugachi (2006) trabaja con arcillas cálcicas modificando su propiedad hidrofílica y organofóbica a nivel nanométrico con la finalidad de generar posibles aplicaciones. Por otro lado Morales (2003) da a conocer zonas en la península de Santa Elena, con materiales de arcillas. Cárdenas & Pacheco (2002) caracterizan materiales no metálicos (feldespatos, arcillas, sílice y talcos) para su aplicación en la industria cerámica. Se mencionan otros dos estudios realizados en la provincia del Cañar con reconocimiento de materiales arcillosos expandibles pero que al ser ensayados no cumplen con las especificaciones técnicas necesarias para aplicación industrial. En este capítulo también, se explica en detalle la zona de estudio, se introduce los valores guía de materiales expandibles, según Lorenz y Gwosdz, (2004) para aplicación como lodos de perforación, se reconoce la geología del sector del material de estudio como Formación Tablazo del Cuaternario y un estudio de mercado entre los años 2000 y 2007, cuya información se obtuvo del sitio web del Banco Central del Ecuador que permite reconocer la gran necesidad de reemplazar las importaciones de arcillas expandibles conocidas como bentonitas para el mercado nacional de construcción de pozos petroleros.

Dentro del capítulo 2 se presenta la caracterización de tres muestras, la muestra de nuestro estudio obtenida en la ciudad de Manta que se denominó "Manta" y las otras dos muestras que son de referencia, se las denominó "Progreso" e "Importada", estos nombres en alusión a su procedencia. A éstas, se les realizó ensayos reológicos, granulométricos y de difracción de rayos X. Los ensayos granulométricos, obedecen a la clasificación de la ASTM y lo establecido en los límites de consistencia de Atterberg, donde se destaca las ecuaciones de límites de: contracción, líquido y plástico; además, el índice de plasticidad. Para los ensayos reológicos se utiliza el principio de la Ley de Stokes y las ecuaciones de Marsh, Fann y Stormer para determinar las distintas viscosidades. Para la difracción de rayos X se cumple la Ley de Bragg, que pronostica la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal. La fundamentación teórica fue extraída del sitio web Quiminet.

En el capítulo 3 se enseña la tabla de resultados de los ensayos tecnológicos (reología, granulometría y difractogramas). Del ensayo de granulometría se concluye que las tres muestras son limos de alta plasticidad. Los análisis reológicos permiten señalar que las muestras "Manta" y "Progreso" tienen bajo tiempo de embudo de Marsh, bajo pH, la altura de la costra es ínfima y sus viscosidades no cumplen con las normas

para su aplicación como lodo de perforación. Los difractogramas de rayos X en roca total y en fracción arcilla 10 micrones indican la presencia de motmorillonitas, es decir pueden ser consideradas bentonitas.

En el capítulo 4 se presenta el análisis de los resultados de los ensayos tecnológicos realizados a la muestra producto de nuestro estudio en comparación con una bentonita comercializada en Guayaquil (vía a la Costa) y una muestra utilizada como lodo de perforación en el campo Sacha. Además, se señala las conclusiones y recomendaciones fruto del estudio. **La principal conclusión es el rechazo de la muestra "Manta", que comparada con valores guía para uso como lodos de perforación son inaceptables.** Dentro de las recomendaciones se debe destacar la necesidad de realizar estudios similares para lograr que estos tipos de suelo sean utilizados tecnológicamente y se pueda cubrir en parte la demanda de la bentonita en el país.

# CAPITULO 1

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 MATERIALES EXPANDIBLES EN ECUADOR

En Ecuador, hasta la fecha que se realizó esta investigación, se tiene las siguientes referencias en estudios similares:

Perugachi et al. (2006) presentan un análisis de la aplicación tecnológica de nanoarcillas en Ecuador, mencionando que el mercado internacional está en crecimiento superior al 200% y que en Ecuador nos falta desarrollo de tecnología que permita a la industria nacional aprovechar nuestros recursos naturales y aplicar el uso de estas arcillas a reducidos costos, beneficiándonos con la reducción de importación de materiales.

Morales et al. (2006) cuantificaron las principales fracciones granulométricas mediante análisis por difracción de rayos X y su composición química. Esto permitió tener un conocimiento inicial de la mineralogía y las proporciones químicas mayores. Cuantificaciones de densidad y de superficie específica, además de análisis térmicos, espectroscopia en infrarrojo y microscopía electrónica de barrido permitieron obtener mayores detalles sobre las características físicas, mineralógicas y morfológicas. Con todos los resultados obtenidos se pudo concluir que trataron con una arcilla bentonítica cálcica.

Ensayos de activación ácida mostraron que es posible obtener arcilla modificada químicamente que podría ser utilizada en nuevas industrias, además de las actuales de cemento y cerámicas donde tiene un uso tradicional y a pequeña escala.

Perugachi op. cit (2002), pretende obtener la nanoarcilla mediante la modificación a nivel nanométrico intercambiando el ión sodio ( $\text{Na}^+$ ) por iones orgánicos convirtiéndolas, de esta manera, de arcillas organofóbicas (hidrofilicas) en arcillas organofilicas (hidrofóbicas) para hacerla compatible a muchos más materiales orgánicos. Una vez obtenida la nanoarcilla finalmente procederá a caracterizarla y sugerir su uso en nuevas aplicaciones que fomenten la producción y explotación de nuestros recursos naturales.

A la altura del kilómetro 18 de la vía Guayaquil – Progreso, Morales op. cit. (2003) realizó un estudio de arcillas donde caracterizó las muestras obtenidas en el sector, mediante difractogramas de rayos X los que determinaron la capacidad de intercambio catiónico e identificó el calcio como principal catión intercambiable en esta bentonita. Las bentonitas cálcicas, como es el caso de Morales, de bajo poder de expansión, pueden ser transformadas en sódicas por tratamiento con álcalis.

INEMIN – TECHNOSTONE S.P.A. (1988) realizó un estudio de los yacimientos minerales no metálicos y rocas ornamentales, entre los cuales investigó acerca de las arcillas de Charasol. Este yacimiento está situado en la provincia de Cañar, a pocos kilómetros de la ciudad de Azogues. Obtenidos los resultados de reología y rendimientos API concluyeron que la bentonita en bruto estudiada no cumplía las normas para fangos de perforación, esencialmente en lo que se refiere al agua libre. En lo que tiene que ver con la utilización en fundería y peletización no existe valores que se contrapongan a su uso.

Simbala (1981) realizó un estudio de arcillas bentoníticas en la provincia del Cañar, específicamente en la región de Charasol, dentro de la hoya sedimentaria Azogues – Cuenca, al suroeste de nuestro país, buscando arcillas bentoníticas para la aplicación como lodos de perforación petrolífera. Este autor llegó a concluir que las arcillas encontradas en estado natural no servían para la aplicación como fluidos de perforación, debido a que no cumple con las especificaciones mínimas necesarias para este uso.

Vega et al. (1993) caracterizan 20 muestras de bentonita correspondientes a 5 yacimientos de la zona de Amotape, sector NO de Perú. El análisis químico y mineralógico determinó que las bentonitas estudiadas eran del tipo Wyoming.

## 1.2 APLICACIÓN TECNOLÓGICA COMO LODO DE PERFORACIÓN

En el apéndice A se mencionan algunos valores guía de los materiales expandibles conocidas como esmectitas, para la aplicación como lodos de perforación y construcción subterránea (Lorenz y Gwosdz, 2004).

Para aplicación como lodos de perforación la densidad de la bentonita debe estar entre 1 y 2 g/cm<sup>3</sup>, el pH variar entre 7 y 9, la humedad no debe superar el 15%, la viscosidad aparente debe ser mayor o igual a 15 centipoises, la viscosidad plástica debe ser mayor o igual a 8 centipoises y la pérdida por filtración debe ser menor a 15.

## 1.3 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona estudiada se localiza en la ciudad costera de Manta, su ubicación exacta se explica a continuación



Figura 1.1.- Señal indicativa sobre el carretero Guayaquil – Manta.

En el carretero Guayaquil – Manta, después de pasar la población de Montecristi, y siguiendo un hemicírculo que bifurca tres carreteros (Fig. 1.1), se sigue a la izquierda vía al puerto marítimo de Manta y a la población de Puerto López. Aproximadamente a 6,2 kilómetros, de esta carretera, se encuentra la ciudadela URBIRIOS, donde encontramos el afloramiento de material en estudio.

Las coordenadas de ubicación de la zona es UTM WGS 84 9.891.638/530.834 en la provincia de Manabí dentro de la parte NE del Cantón Manta, como se indica en la Fig. 1.2.



**Figura. 1.2.- Mapa de Ecuador donde se indica zona de estudio**

El material se encuentra depositado en forma de estratos sub-horizontales, como se observa en la Fig. 1.3, con rumbo N°90E y una inclinación de 5°S.



**Figura 1.3.- Afloramiento en Manta, donde se extrajo la muestra**

#### **1.4 GEOLOGÍA DE LA LOCALIDAD**

Según la geología de la zona, estos estratos están asignados a la Formación Tablazo del Cuaternario. Pero la Formación Tablazo es una superficie plana elevada constituida por depósitos de areniscas calcáreas bioclásticas y conglomerados. Por otro lado bajo la formación Tablazo, en el área entre Manta y Montecristi, se puede encontrar la Formación Tosagua que en el ámbito geológico se la conoce como compuesta de lutitas suaves. Por esta razón y de esta forma se reconoce que el material en estudio es asignado a la Formación Tosagua que corresponde al Oligoceno, de la época del Terciario.

## **1.5 ESTUDIO DE MERCADO.**

Debido a la gran expectativa que generaron estos materiales antes de este tema investigativo, se realizaron estudios de mercado a nivel nacional, entre los años 2000 y 2007, fecha en que se terminó este trabajo de graduación.

### **1.5.1 Producción Nacional, Importación y Exportación**

Entre enero del año 2000 y noviembre del año 2007, Ecuador ha importado 14'942.220 kilogramos de bentonita (Tabla 1.1); que indica que existen pocos yacimientos donde se aprovecha la explotación de bentonita nacional o a su vez no se han realizado estudios de caracterización en búsqueda de este tipo de materiales. En la tabla 1.2 se presenta los países que exportaron a Ecuador y sus cantidades.

De acuerdo al Sistema de Administración de Derechos Mineros, desde el año 1997 hasta el año 2005 la producción nacional de bentonita fue de 40.960 kilogramos.

Se tiene conocimiento que la ESPOL ha emprendido investigaciones en dos sectores de la costa ecuatoriana, con la intención de encontrar bentonita y buscar aplicaciones dependiendo los resultados de la caracterización: Grupo

Ancón (carretero Guayaquil – Salinas a 18Km. de Guayaquil) y en el cantón General Villamil. Morales op.cit. (2003).

**Tabla 1.1.- Datos de importación de bentonita <sup>1</sup>**

<b>AÑO</b>	<b>MILES DE KILOGRAMOS</b>
2000	954,08
2001	1.984,19
2002	1.642,88
2003	1.727,26
2004	2.291,84
2005	1.896,13
2006	1.906,96
2007	2.538,88

<sup>1</sup> Fuente: Banco Central del Ecuador. ([www.bce.fin.ec/comercioexterior](http://www.bce.fin.ec/comercioexterior))

**Tabla 1.2.- Países que importaron a Ecuador entre 2000 y 2007<sup>1</sup>**

<b>PAÍS EXPORTADOR</b>	<b>MILES DE KILOGRAMOS</b>
Estados Unidos	5.187,88
Colombia	3.961,13
Perú	3.624,12
México	195,05
Chile	432,28
Venezuela	98

<sup>1</sup> Fuente: Banco Central del Ecuador. ([www.bce.fin.ec/comercioexterior](http://www.bce.fin.ec/comercioexterior))

### 1.5.2. Principales aplicaciones de la bentonita

Basados en la información recabada del website del Banco Central del Ecuador la industria ecuatoriana que trabaja con bentonitas la utiliza en: lodos de perforación; aceites y grasas; pinturas y lacas; para la elaboración de alimentos de animales; para productos químicos y farmacéuticos. En la figura 1.4 se resume los principales usos de la bentonita en el país.



**Figura 1.4.- Principales usos de la bentonita en Ecuador**

Antes, la principal aplicación de la bentonita era la perforación de pozos petrolíferos, pero hoy en día se la utiliza en la elaboración de: alimentos para animales, productos químicos y farmacéuticos, pinturas y lacas.

Aguilar & Rigail (2006), probaron los efectos de nanoarcillas u organoarcillas añadiendo un 5% de dos tipos de organoarcillas modificadas con sales de alkylamoinum a los dos sistemas epóxicos/aminas, con la finalidad de mejorar las propiedades anticorrosivas de los recubrimientos epóxicos.

Cárdenas et al. (2002) caracterizan materiales no metálicos para posible utilización en la industria de la cerámica.

## CAPÍTULO 2

### 2. ENSAYOS TECNOLÓGICOS

En este capítulo se presenta las muestras tomadas y sus características, la parte teórica de los ensayos tecnológicos realizados, los ensayos con sus objetivos, metodología y procedimiento, tabla de datos y gráficos.

#### 2.1 Descripción de muestras

La muestra de la zona de estudio es un material de color marrón claro que en contacto con agua se vuelve plástica, a esta muestra se la denominó "MANTA". Para efectos de comparación en este estudio se analizaron otras 2 muestras, denominadas PROGRESO e IMPORTADA.



**Figura 2.1.- Muestras para estudio en laboratorio de la FICT**

- Muestra "MANTA", tomada en la zona de estudio (sur de Manta)

- Muestra "IMPORTADA", bentonita usada en perforación de pozos petroleros, traída de la Amazonia.
- Muestra "PROGRESO", adquirida en local de la vía Guayaquil – Progreso.

La muestra MANTA fue colocada al horno para secarla y pasada por tamiz pasante 200, para luego realizar los diferentes ensayos reológicos. Los ensayos fueron realizados en los laboratorios de suelos y de petróleos de la FICT, ver Figura 2.1. A continuación se describe en qué consiste cada uno de ellos.

## **2.2. Análisis Reológicos**

**Reología.** - Es la ciencia que trata la deformación y el flujo de la materia.

**2.2.1.- Densidad,** define la capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes de la perforación, controlando de este modo las presiones litostática e hidrostática existentes en las formaciones perforadas.

Se determina pesando en una balanza un volumen conocido de lodo. La escala de la balanza (Baroid) da directamente el valor de la densidad del lodo.

Ver Fig.2.2

La densidad tiene una influencia directa en la capacidad de extracción del detritus, pues al regirse, de forma aproximada por la ley de Stoke es proporcional a la densidad del flujo considerado.

$$v = \frac{1}{18} d^2 \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\mu}$$

V = velocidad de caída de las partículas (consideradas esféricas) en cm/s.

d = diámetro de las partículas (en cm)

$\gamma_f$  = peso específico del material de las partículas (g/cm<sup>3</sup>)

$\mu$  = viscosidad del fluido (en poises)

g = gravedad (cm/s<sup>2</sup>)



**Figura 2.2 Balanza electrónica y balanza de Baroid**

**2.2.2. Viscosidad.**- Es la resistencia interna de un fluido a circular.

**2.2.2.1 Viscosidad de embudo de Marsh.**- El embudo de Marsh es un instrumento de campo que mide el tiempo, en segundos; requerido para que

un cuarto de galón fluya a través de él. El embudo tiene un diámetro de 6" en la parte superior y una longitud de 12". En la parte inferior un tubo liso de 2" con un diámetro interior de 3/16". No es la viscosidad verdadera, pero sirve como medida cualitativa de cuán espeso es el lodo. La viscosidad de embudo es útil para comparaciones relativas.



**Figura 2.3.- Embudo de Marsh**

**2.2.2.2. Viscosidad aparente.-** La viscosidad aparente se lee del viscosímetro de lodos o de Fann a 300 rpm. El viscosímetro de Fann también llamado de indicación directa, es utilizado para medir la viscosidad y la resistencia de gel de un lodo de perforación. Este instrumento está compuesto por un cilindro giratorio y una plomada. Hay dos velocidades de rotación, a 300 y 600 rpm

El instrumento está calibrado de manera que la lectura del dial a cualquier número fijo de rpm nos da la tensión de corte en lb/100 pies<sup>2</sup>, para esa velocidad de corte. La unidad convencional es el centipoise, que es una unidad

derivada del sistema métrico. La fórmula para viscosidad aparente es la mitad de la lectura del viscosímetro de Fann a 600 rpm

$$VA = \text{Fann a 600 rpm} / 2$$



**Figura 2.4 Viscosímetro de Fann**

**2.2.2.3 Viscosidad plástica.-** Se describe como la parte de resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica y se calcula a partir de los datos del viscosímetro de Fann a 600 y 300 rpm

$$VP = F(600\text{rpm}) - F(300\text{rpm})$$

**2.2.2.4 Punto cedente.-** Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento. El punto cedente en libras por 100 pies cuadrados se calcula a partir de los datos del viscosímetro de Fann:

$$PC = F(300\text{rpm}) - VP$$

**2.2.3. Concentración Iónica de Hidrógeno (pH).**- Un lodo bentonítico es estable cuando su pH está comprendido entre 7 y 9,5. Para corregir y mantener el pH dentro de los límites adecuados se pueden utilizar diferentes productos.

**2.2.4 Filtro – Prensa.**- Un buen lodo debe permitir la formación de costra. La capacidad de construir el "cake" del lodo depende del agua libre de éste, así como de la permeabilidad de las paredes del sondeo. Para estimar estas capacidades se utiliza un filtro-prensa normalizado (ver Fig. 2.5), haciéndose pasar el lodo durante 30 minutos, con la prensa tarada a una presión máxima de 7 Kg/cm<sup>2</sup>.



**Figura 2.5 Filtro - Prensa**

Un lodo de perforación de buenas características, no debe dejar pasar más de 20 cm<sup>3</sup> de filtrado, formando un cake de espesor comprendido entre 5 y 8 mm (ver Fig. 2.6).



**Figura 2.6** Ejemplo de la formación del "cake"

## **2.2.5 Ensayos reológicos**

### **2.2.5.1 Objetivos de los ensayos**

- Determinar las distintas viscosidades de las muestras
- Determinar el potencial de Hidrógeno (pH) de cada muestra
- Hallar el espesor de la torta después de la prueba filtro – prensa
- Hallar el punto cedente

### **2.2.5.2 Equipos utilizados**

- Balanza electrónica
- Mezclador
- Balanza de Baroid
- Embudo de Marsh
- Viscosímetro de Fann
- Cronómetro

- Filtro – Prensa
- Peachímetro

### 2.2.5.3 Procedimiento y cálculos

1. En un vaso se coloca 350 cm<sup>3</sup> de agua y 10,5 gramos de muestra, se lleva el vaso al mezclador y se deja batiendo unos 10 minutos.
2. Calibramos la balanza de lodos y medimos la densidad de la mezcla.
3. Vertimos la mezcla en el viscosímetro y determinamos las lecturas a 300 rpm y 600 rpm.
4. Para realizar el ensayo con el embudo Marsh preparamos 1500 cm<sup>3</sup>, de mezcla, que es la capacidad del embudo.
5. Vertimos la mezcla en el embudo Marsh y cronometramos el tiempo que se demora en pasar toda la mezcla por el embudo.
6. Las propiedades de la filtración de un lodo se determina por medio de un filtro prensa. La prueba consiste en determinar la velocidad a la cual pasa el fluido a través de un filtro prensa que contiene la muestra del lodo, bajo condiciones específicas de tiempo y presión, midiendo el espesor de la película de sólidos depositadas sobre el papel filtro por pérdida de fluido.
7. En el líquido extraído del filtro prensa se determina el pH de la mezcla utilizando el peachímetro.

**Tabla 2.1. Tabla de datos para el análisis reológico**

Muestra	Peso [g]	Densidad [lb/gal]	600 [rpm]	300 [rpm]
PROGRESO	10,5	8,3	2,6	1,5
MANTA	10,5	8,4	2,2	1,6
IMPORTADA	10,5	8,61	29,5	23

### CÁLCULOS

Viscosidad Aparente (VA) [cP]

$$VA = \frac{R_{600}}{2} \text{ [cP]}$$

PROGRESO  $VA = \frac{2,6}{2} = 1,3 \text{ [cP]}$

MANTA  $VA = \frac{2,2}{2} = 1,1 \text{ [cP]}$

IMPORTADA  $VA = \frac{29,5}{2} = 14,75 \text{ [cP]}$

Viscosidad Plástica (VP) [cP]

$$VP = F(600\text{rpm}) - F(300\text{rpm}) = \text{[cP]}$$

PROGRESO  $VP = 2,6 - 1,5 = 1,10 \text{ [cP]}$

MANTA  $VP = 2,2 - 1,6 = 0,60 \text{ [cP]}$

$$\text{IMPORTADA} \quad \text{VP} = 29,5 - 23 = 6,50 \text{ [cP]}$$

Punto Cedente (PC) [lb/100pies<sup>2</sup>]

$$\text{PC} = \text{F}(300\text{rpm}) - \text{VP}$$

$$\text{PROGRESO} \quad \text{PC} = 1,5 - 1,1 = 0,4 \text{ [lb/100pies}^2\text{]}$$

$$\text{MANTA} \quad \text{PC} = 1,6 - 0,6 = 1,0 \text{ [lb/100pies}^2\text{]}$$

$$\text{IMPORTADA} \quad \text{PC} = 23 - 6,5 = 16,5 \text{ [lb/100pies}^2\text{]}$$

**Tabla 2.2 Tabla de resultados de pruebas de reología**

Muestra	Viscosidad aparente [cP]	Viscosidad plástica [cP]	Punto cedente [lb/100pies <sup>2</sup> ]	Tiempo de Marsh [s]	pH	h [mm]
PROGRESO	2,6	1,5	0,4	46,29	6	1,5
MANTA	2,2	1,6	1,0	48,45	6	1,4
IMPORTADA	29,5	23	16,5	67,24	8	5,5

## 2.3 Análisis de Suelos

### 2.3.1. Granulometría por sedimentación y Clasificación ASTM

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus

propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

### **2.3.1.1 Análisis granulométrico por sedimentación**

#### **2.3.1.1.1 Objetivos del ensayo**

- Determinar el porcentaje de limos y arcillas de la muestra que pasa por el tamiz 200
- Obtener la curva granulométrica
- Determinar la gravedad específica

#### **2.3.1.1.2 Instrumentos y equipos utilizados**

- Balanza electrónica
- Columna de tamices 1", ½", 3/8", 4, 10, 40, 200
- 2 Probetas de 1 litro
- Vaso de precipitado de 500 mililitros
- Horno
- Recipientes de aluminio y porcelana
- Agua destilada
- Batidora
- Termómetro
- Hidrómetro ASTM 152 H

- Agente químico (Hexametáfosfato sódico)

#### **2.3.1.1.3 Procedimiento**

- 1 Se prepara una solución de hexametáfosfato de sodio al 4% (10 gramos de hexametáfosfato de sodio en 250 mililitros de agua destilada).
- 2 Se pesa 50 gramos de suelo que haya pasado el tamiz 200, previamente secada al horno.
- 3 Se coloca los 50 g de suelo en un recipiente de porcelana y se agrega 125 ml de solución de hexametáfosfato al 4%. Debemos esperar la saturación aproximadamente durante 16 horas.
- 4 Pasadas las 16 horas se llena una probeta con un litro de agua destilada hasta la línea de aforo.
- 5 Se introduce el hidrómetro en la probeta y se toma la lectura tanto en la parte superior como en la parte inferior del menisco. La corrección "por menisco" será la diferencia entre estas dos lecturas, este valor será positivo.
- 6 En otra probeta se vierte los 125 ml de solución de hexametáfosfato al 4% y se la completa con agua destilada hasta el aforo.
- 7 Se introduce el hidrómetro en la solución y se toma la medida de la parte superior del menisco, esa será el factor de corrección "por cero".

- 8 Se vierte el contenido del recipiente de porcelana en un vaso de precipitado de 500 ml.
- 9 Ponemos el contenido del vaso de precipitado en el vaso de la batidora.
- 10 Se mezcla en la batidora por aproximadamente un minuto
- 11 Se vierte el contenido del vaso de la batidora en la probeta asegurando que no quede parte de mezcla (agua – suelo) en el vaso de la batidora utilizando para esto agua destilada.
- 12 Se completa la probeta con agua destilada hasta la señal de aforo
- 13 Se tapa con la mano la probeta y se procede a mezclar durante un minuto.
- 14 Se coloca la probeta en la mesa y se prende el cronómetro.
- 15 Se procede a tomar la medición con el hidrómetro a los 30, 60, 90, 120, 150, 180 y 240 segundos.
- 16 Se saca el hidrómetro para limpiar y encerar
- 17 Se introduce el termómetro en la probeta de la mezcla y se procede a tomar su lectura.
- 18 Se vuelve a tomar la lectura con el hidrómetro a los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 210, 240, 300, 1200, 1260 y 1320 minutos. En cada lectura del hidrómetro también se toma la lectura de la temperatura.
- 19 Se obtiene la curva granulométrica en un gráfico con el eje de las X (diámetro de las partículas) y en el eje de las Y (% de pasante).

Tabla 2.3. Datos para prueba de granulometría muestra "MANTA"

#	Fecha	Tiempo	Temperatura °C	Lectura Hidrómetro	Tamiz	Diámetro (mm)	% de pasante
Hidrómetro 152H ASTM Peso muestra en aire 51,41 g Peso seco 50 g Humedad 2,75% Gravedad específica 2,73					1"	25,4	100
					1/2"	12,7	100
					3/8"	9,525	100
					N° 4	4,76	100
					N° 10	2	100
					N° 40	0,42	98,793151
	4/1/2008				N 200	0,074	48,835251
1	4/1/2008	0:00:30	26	24		0,0627	41,391716
2	4/1/2008	0:01:00	26	21		0,0453	35,555318
3	4/1/2008	0:01:30	26	20		0,0372	33,609852
4	4/1/2008	0:02:00	26	19		0,0325	31,664386
5	4/1/2008	0:02:30	26	19		0,029	31,664386
6	4/1/2008	0:03:00	26	18		0,0267	29,71892
7	4/1/2008	0:04:00	26	17		0,0233	27,773454
8	4/1/2008	0:10:00	26	17		0,0147	27,773454
9	4/1/2008	0:20:00	26	16		0,0105	25,827988
10	4/1/2008	0:30:00	26	15		0,0086	23,882522
11	4/1/2008	0:40:00	26	14		0,0075	21,937056
12	4/1/2008	0:50:00	26	13		0,0068	19,99159
13	4/1/2008	1:00:00	26	13		0,0062	19,99159
14	4/1/2008	1:30:00	26	11		0,0051	16,100658
15	4/1/2008	2:00:00	26	10		0,0044	14,155192
16	4/1/2008	3:00:00	26	9		0,0037	12,209726
17	4/1/2008	3:27:00	26	9		0,0034	12,209726
18	4/1/2008	4:00:00	26	9		0,0032	12,209726
19	4/1/2008	4:49:00	26	9		0,0029	12,209726
20	5/1/2008	20:43:00	26	9		0,0014	12,209726
21	5/1/2008	20:49:00	26	9		0,0014	12,209726
22	5/1/2008	21:49:00	26	9		0,0014	12,209726



Tabla 2.4. Datos para prueba de granulometría muestra "IMPORTADA"

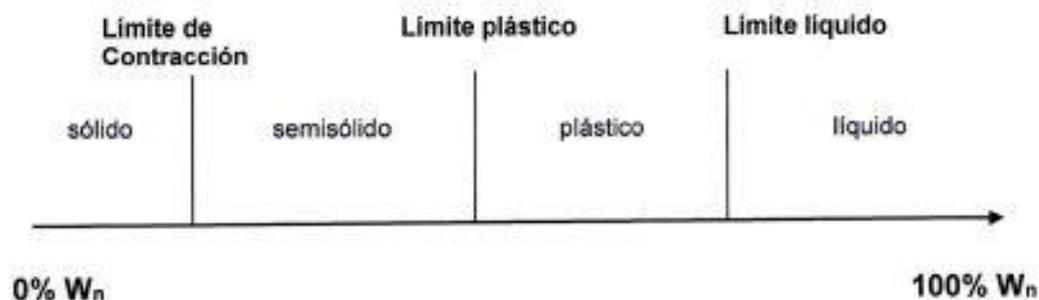
#	Fecha	Tiempo	Temperatura °C	Lectura Hidrómetro	Tamiz	Diámetro (mm)	% de pasante
Hidrómetro 152H ASTM Peso muestra en aire 53,99 g Peso seco 50 g Humedad 7,39% Gravedad específica 2,72					1"	25,4	100
					1/2"	12,7	100
					3/8"	9,525	100
					N° 4	4,76	100
					N° 10	2	100
					N° 40	0,42	99,542468
	4/1/2008				N 200	0,074	97,313467
1	4/1/2008	0:00:30	26	45		0,052	83,025594
2	4/1/2008	0:01:00	26	44		0,037	81,0617
3	4/1/2008	0:01:30	26	44		0,03	81,0617
4	4/1/2008	0:02:00	26	43		0,027	79,097805
5	4/1/2008	0:02:30	26	43		0,024	79,097805
6	4/1/2008	0:03:00	26	43		0,022	79,097805
7	4/1/2008	0:04:00	26	42		0,019	77,13391
8	4/1/2008	0:10:00	26	42		0,012	77,13391
9	4/1/2008	0:20:00	26	42		0,009	77,13391
10	4/1/2008	0:30:00	26	41		0,007	75,170015
11	4/1/2008	0:40:00	26	41		0,006	75,170015
12	4/1/2008	0:50:00	26	41		0,005	75,170015
13	4/1/2008	1:00:00	26	40		0,005	73,206121
14	4/1/2008	1:30:00	26	37		0,004	67,314437
15	4/1/2008	2:00:00	26	37		0,004	67,314437
16	4/1/2008	3:00:00	26	35		0,003	63,386647
17	4/1/2008	3:27:00	26	34,5		0,003	62,4047
18	4/1/2008	4:00:00	26	33		0,002	59,458588
19	4/1/2008	4:49:00	26	32		0,002	57,494963
20	5/1/2008	20:43:00	26	32		0,002	57,494963
21	5/1/2008	20:49:00	26	32		0,001	57,494963
22	5/1/2008	21:49:00	26	32		0,001	57,494963



**Fig. 2.8 Curva granulométrica muestra "IMPORTADA"**

### **2.3.2. Límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg. Ver figura 2.9



**Figura 2.9 Límites de consistencia o de Atterberg**

1. **Límite líquido** ( $W_L$  o  $L_L$ ): Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande.

$$L_L = W_n (N/25)^{0.121}$$

N: número de golpes que causan el cierre de la ranura

2. **Límite plástico** ( $W_P$  o  $L_P$ ): Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.
3. **Límite de retracción o contracción** ( $W_C$  o  $L_C$ ): Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad.

$$W_C = (((V_h - V_s) * \gamma_w) / m_s) * 100$$

Relacionados con estos límites, se define el índice de plasticidad, que es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

**Índice de plasticidad:**  $I_p$  o  $IP = W_L - W_P$

En el apéndice E se encuentra el procedimiento, materiales y equipos utilizados, cálculos y resultados para obtener los límites de Atterberg, mientras que en el apéndice F se presenta las curvas de la prueba de cada muestra.

### **2.3.2.1 Determinación de los límites de Atterberg**

#### **2.3.2.2. Objetivos de la práctica**

- Determinar los límites de Atterberg utilizando el método de la cuchara de Casagrande, norma UNE 103-103-94
- Determinar los límites: líquido, plástico y a la contracción. Además el índice de plasticidad.
- Conocer el manejo del equipo de laboratorio de mecánica de suelos

#### **2.3.2.3 Instrumentos y equipos utilizados**

- Balanza electrónica
- Tamices N°4 y 40
- Masa de goma
- Espátula
- Cuchara de Casagrande
- Ranurador
- Recipientes de aluminio y porcelana

- Agua destilada
- Mercurio
- Placa transparente con 3 dientes de metal

#### 2.3.2.4 Procedimiento

1. Se pasa unos 250 gramos de la muestra por el tamiz N°4
2. En una bandeja de aluminio se seca la muestra en un horno a 60°C
3. Después de sacar la muestra del horno se pulveriza con la ayuda de una masa de goma.
4. El producto pulverizado se pasa por el tamiz N° 40 hasta obtener alrededor de 200 gramos, que es lo que necesitaremos para realizar los ensayos.
5. Se coloca sobre un recipiente de cerámica y se añade agua destilada a la muestra amasándola con la ayuda de una espátula
6. Para conseguir homogeneidad en la muestra se la deja descansar alrededor de 2 horas, pero protegiéndola contra la desecación.
7. Pesamos el recipiente, el recipiente más la muestra seca, el recipiente más la muestra húmeda. Obtenemos el peso del agua, el peso del suelo seco y el porcentaje de humedad. Todos los pesos en gramos.

**Tabla 2.5 Datos para determinar limite líquido, muestra "PROGRESO"**

N° del recipiente	15	115	20	13	134
Peso de recipiente (g)	6,17	6,05	6,07	5,92	6,18
Peso recipiente + suelo húmedo (g)	22,14	22,10	18,93	17,90	16,03
Peso de recipiente + suelo seco (g)	13,26	13,36	12,13	11,71	11,02
Peso del agua (g)	8,88	8,74	6,80	6,19	5,01
Peso del suelo seco (g)	7,09	7,31	6,06	5,79	4,84
Contenido de humedad (%)	125,25	119,56	112,21	106,91	103,51
Número de golpes	14	18	26	32	40

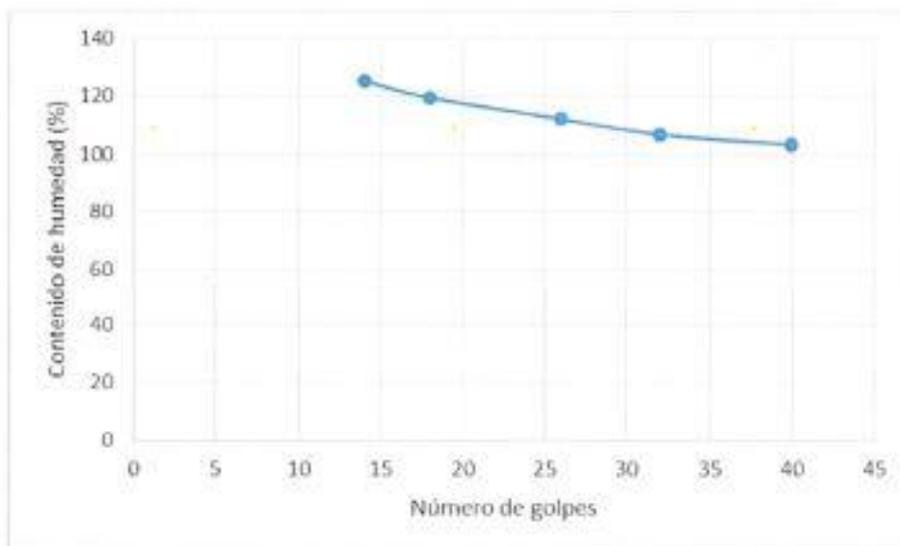
Peso del agua = peso de muestra húmeda – peso de muestra seca

Peso de suelo seco = peso de recipiente más suelo seco – peso recipiente

Contenido de humedad = (peso del agua/peso del suelo seco) \* 100

8. Se procede a colocar la muestra en la cuchara de Casagrande con la ayuda de una espátula, compactándola hasta alcanzar un espesor de unos 10 milímetros.
9. Luego con el ranurador se hace un surco lineal a la muestra.
10. Se coloca la cuchara en su máquina y se empieza a golpear la cuchara dejándola caer desde una altura de 1 centímetro, hasta que los labios de la muestra se toquen en una distancia cercana a 13 mm.
11. Se realiza el mismo procedimiento desde el paso 5 con una muestra un poco más húmeda para obtener otro valor de golpes.

12. Con los datos: número de golpes (abscisas) vs porcentaje de humedad (ordenadas), se realiza un gráfico.
13. El punto de corte correspondiente a 25 golpes con la recta formada por los puntos obtenidos será el **límite líquido buscado**.



**Fig. 2.10 Gráfico Contenido de humedad vs número de golpes muestra "PROGRESO"**

Límite líquido = 114,33 %

14. Para obtener el **límite plástico** pesamos el recipiente, el recipiente más la muestra seca, el recipiente más la muestra húmeda y calculamos el contenido de humedad. Todos los pesos en gramos.

**Tabla 2.6 Datos para calcular el límite plástico, muestra "PROGRESO"**

N° del recipiente	6	11	15
Peso de recipiente (g)	11,60	11,80	11,50
Peso de recipiente + suelo húmedo (g)	22,48	23,76	22,30
Peso de recipiente + suelo seco (g)	21,48	22,51	21,15
Contenido de humedad (%)	10,12	11,67	11,92

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{peso de recipiente más suelo húmedo} - \text{peso de recipiente más suelo seco}}{\text{peso de recipiente más suelo seco} - \text{peso de recipiente}} \times 100$$

$$\text{Límite plástico} = 11,24 \%$$

15. El promedio de los **contenidos de humedad** es el límite plástico de la muestra.

16. El **índice de plasticidad** es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

$$\text{Índice de plasticidad} = \text{Límite líquido} - \text{límite plástico}$$

$$IP = L_L - L_P$$

$$IP = 114,33 - 11,24$$

$$IP = 103,09 \%$$

17. Para determinar el **límite a la contracción**, tenemos que calcular el volumen de mercurio inicial, el contenido de humedad y el volumen del suelo seco. El volumen de suelo seco, será igual al volumen del mercurio desplazado. Todos los pesos en gramos.

**Tabla 2.7 Datos para calcular el límite a la contracción, muestra  
"PROGRESO"**

Peso de recipiente lleno de mercurio (g)	205,76
Peso de recipiente (g)	37,51
Peso de mercurio (g)	168,25
Densidad del mercurio (g/cm <sup>3</sup> )	13,6
Volumen del mercurio V (cm <sup>3</sup> )	12,37

Peso de recipiente más suelo húmedo (g)	54,75
Peso de recipiente más suelo seco (g)	45,95
Peso del recipiente (g)	37,51
Peso del agua W <sub>w</sub> (g)	8,80
Peso suelo seco W <sub>o</sub> (g)	8,44
Contenido de humedad w%	104,27

Peso de mercurio desplazado	67,12
Volumen de mercurio desplazado (cm <sup>3</sup> )	4,94
Volumen de suelo seco V <sub>o</sub> (cm <sup>3</sup> )	4,94

Límite de contracción = Contenido de humedad -  $\frac{\text{Volumen de mercurio} - \text{Volumen de suelo seco}}{\text{Peso de suelo seco}} \times 100$

$$W_c = w\% - \left( \frac{V - V_o}{W_o} \right) \times 100$$

$$W_c = 104,27 - \left( \frac{12,37 - 4,94}{8,44} \right) \times 100$$

$$W_c = 16,16 \%$$

### MUESTRA "MANTA"

Tabla 2.8 Datos para cálculo de limite líquido, muestra MANTA

N° del recipiente	102	35	22	101	133
Peso de recipiente (g)	6,18	6,27	6,43	6,11	6,21
Peso recipiente + suelo húmedo (g)	17,93	15,56	17,2	19,83	19,11
Peso de recipiente + suelo seco (g)	8,23	7,96	8,48	8,78	8,83
Peso del agua (g)	9,7	7,6	8,72	11,05	10,28
Peso del suelo seco (g)	2,05	1,69	2,05	2,67	2,62
Contenido de humedad (%)	473,1	449,7	425,37	413,86	392,37
Número de golpes	15	24	29	35	40

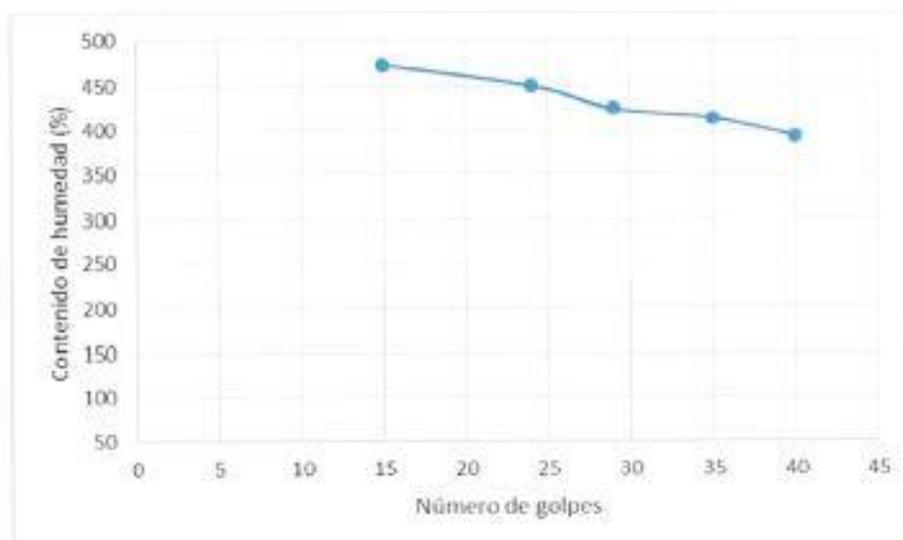


Fig. 2.11 Gráfico contenido de humedad vs número de golpes muestra "MANTA"

Límite líquido = 442,46 %

**Tabla 2.9 Datos para cálculo de límite plástico, muestra MANTA**

N° del recipiente	21	18	12
Peso de recipiente (g)	11,6	11,8	11,5
Peso de recipiente + suelo húmedo (g)	16,1	16,2	16,6
Peso de recipiente + suelo seco (g)	15,65	15,75	16,08
Contenido de humedad (%)	11,11	11,39	11,35

Límite plástico 11,29%

IP = 431,17 %

**Tabla 2.10 Datos cálculo de límite a la contracción, muestra MANTA**

Peso de recipiente lleno de mercurio (g)	200,99
Peso de recipiente (g)	33,06
Peso de mercurio (g)	167,93
Densidad del mercurio (g/cm <sup>3</sup> )	13,6
Volumen del mercurio (V) cm <sup>3</sup>	12,35

Peso de recipiente más suelo húmedo (g)	47,08
Peso de recipiente más suelo seco (g)	35,81

Peso del recipiente (g)	33,06
Peso del agua $W_w$ (g)	11,27
Peso suelo seco $W_o$ (g)	2,75
Contenido de humedad w%	409,82

Peso de mercurio desplazado (g)	28,23
Volumen de mercurio desplazado (cm <sup>3</sup> )	2,08
Volumen de suelo seco $V_o$ (cm <sup>3</sup> )	2,08

$$W_c = 36,29 \%$$

## 2.4 Difractograma de rayos X

La difracción de rayos X es uno de los fenómenos físicos que se produce al interaccionar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina.

El fenómeno de la difracción puede describirse con la Ley de Bragg, que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

n: un número entero

$\lambda$ : la longitud de onda de los rayos X

$d$ : la distancia entre los planos de la red cristalina y,

$\theta$ : ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

#### **2.4.1. Natural, glicolado y calcinado**

Las muestras obtenidas se las analiza con el difractograma de rayos X, en tres preparaciones diferentes: 1) natural, normal o sin tratamiento; 2) glicolada, muestras saturadas con etilenglicol; y, 3) calcinada, muestras que se llevaron a 550°C durante dos horas.

## CAPÍTULO 3

### 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Ensayos reológicos

Los resultados obtenidos de los ensayos reológicos y los límites de Atteberg se presentan en la tabla 3.1

La muestra MANTA tiene 8,4 lb/galón de densidad, un tiempo de 48,45 s en el viscosímetro de Marsh, el pH de 6 y una altura de costra de 1,4 milímetros. La muestra denominada PROGRESO tiene 8,3 de densidad; un tiempo de 46,29 s en el viscosímetro de Marsh, el pH de 6 y una altura de costra de 1,6 mm. La muestra denominada IMPORTADA, que se usa en el campo Sacha para la perforación de pozos petroleros tiene 8,61 lb/galón de densidad, un tiempo de 67,24 s en el viscosímetro de Marsh, el pH de 8 y una altura de costra de 5,5 mm.

Según los valores guía para bentonitas de lodos de perforación que se presenta en el Apéndice A, se reconoce que los valores de concentración iónica de hidrógeno (pH) deben ser entre 7-9 y las muestras de MANTA y PROGRESO tienen un valor de 6, mientras que la muestra importada cumple con el valor de 8, dentro del rango.

**Tabla 3.1 Resultados de los ensayos reológicos (LORENZ W., & GWOSDZ W., 2004)**

Muestra	% en peso de Bentonita	Densidad [lb/gal]	Viscosidad aparente [cP]	Viscosidad plástica [cP]	Viscosidad de Marsh [s]	Punto cedente [lb/100pies <sup>2</sup> ]	Índice plástico [%]	Límite líquido [%]	Límite plástico [%]	Límite de contracción [%]	pH	h [mm]
Progreso	10,5 g en 350 ml	8,3	1,3	1,1	46,29	0,4	103,09	114,33	11,24	16,16	6	1,6
Manta	10,5 g en 350 ml	8,4	1,1	0,6	48,45	1,0	431,17	442,46	11,29	36,29	6	1,4
Importada	10,5 g en 350 ml	8,61	14,75	6,5	67,24	16,5	22	68	46	-	8	5,5

La densidad óptima, según valores guía, debe ser entre 1-2 g/cm<sup>3</sup> y en los ensayos se obtuvo valores entre 8,3 y 8,61 lb/gal, que expresados en g/cm<sup>3</sup> corresponde a 0,99 - 1,03; es decir, los valores de las tres muestras son ligeramente inferiores. El tiempo que tardan en el viscosímetro de Marsh, las muestras de MANTA y PROGRESO, no están muy lejos del mínimo esperado, que es 50 segundos, mientras que la muestra IMPORTADA cumple el valor de manera óptima. En cuanto al espesor de la costra, los valores de las muestras PROGRESO y MANTA son muy bajas, ya que lo recomendado es entre 5 y 8 mm.

De los valores obtenidos del viscosímetro de FANN, se espera valores mayores o iguales a 15 y 8 respectivamente de la tabla guía, solo la IMPORTADA se acerca al valor de viscosidad aparente con 14.75 cP.

La muestra MANTA, objeto de nuestro estudio, tiene valores por debajo de los permisibles para usarse como lodo de perforación: un pH de 6, cuando es necesario entre 7 y 9; altura de costra de 1,6 mm., cuando lo sugerido es entre 5 y 8 mm., el tiempo de Marsh está por debajo de 50 segundos, cuando se recomienda valores comprendidos entre 65 y 75 s.

En lo que se refiere a los límites de Atterberg, el límite líquido óptimo para un lodo bentonítico es alrededor de 65%, la muestra Manta presenta un 442,46% y la muestra Progreso 114,33%. La importada muestra un 68%.

### 3.2 Granulometría

**Tabla 3.2 Resultados de la granulometría**

MUESTRA	DESCRIPCIÓN VISUAL	SUCS	GRANULOMETRÍA	
			N° 4 (%)	N° 200 (%)
IMPORTADA	Limo de alta plasticidad color gris claro	ML	100	51
PROGRESO	Limo de alta plasticidad de color marrón	ML	98	67
MANTA	Limo de alta plasticidad de color marrón claro	ML	100	100

Notamos que todas las muestras son limos de alta plasticidad, de acuerdo a lo que establece el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Ver Tabla 3.2

Siendo la muestra "MANTA" producto de nuestro estudio será comparada con los valores guía de las esmectitas utilizadas como lodos de perforación, bajo este análisis estadístico la hipótesis será aceptar o rechazar cada valor de caracterización de la muestra aplicando la t de student con cuatro grados de

libertad. Realizando las comparaciones correspondientes se rechaza la muestra Manta para la aplicación comparada.

### **3.3 Difracción de rayos X**

#### **3.3.1 Caracterización de minerales en roca total**

Para reconocer los minerales presentes en las muestras examinadas se realiza estudios de DRX en roca total, cuyos difractogramas se muestran en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3; muestras "MANTA", "PROGRESO" e "IMPORTADA" respectivamente. El equipo de difracción de rayos x que se utilizó es del Centro de Investigaciones Geológicas de la Universidad Nacional de La Plata en Argentina.

Se reconoce que en la muestra "MANTA" los minerales principales son cuarzo, illita y esmectita; y, como accesorios el feldespato y la hematita (Figura 3.1). En cuanto al mineral de interés se reconoce que la esmectita no posee un pico definido que indique cristalinidad de este mineral.

La muestra "PROGRESO" contiene cuarzo, illita, esmectita y caolinita, el pico de los 15 Angstroms es ancho y definido; como minerales accesorios están el feldespato y la hematita. (Figura 3.2).

La muestra "IMPORTADA", la cual se usa como patrón de referencia para la aplicación de estos materiales como lodos de perforación presenta a la esmectita y al cuarzo como minerales principales; illita y feldespatos como minerales accesorios (Figura 3.3).

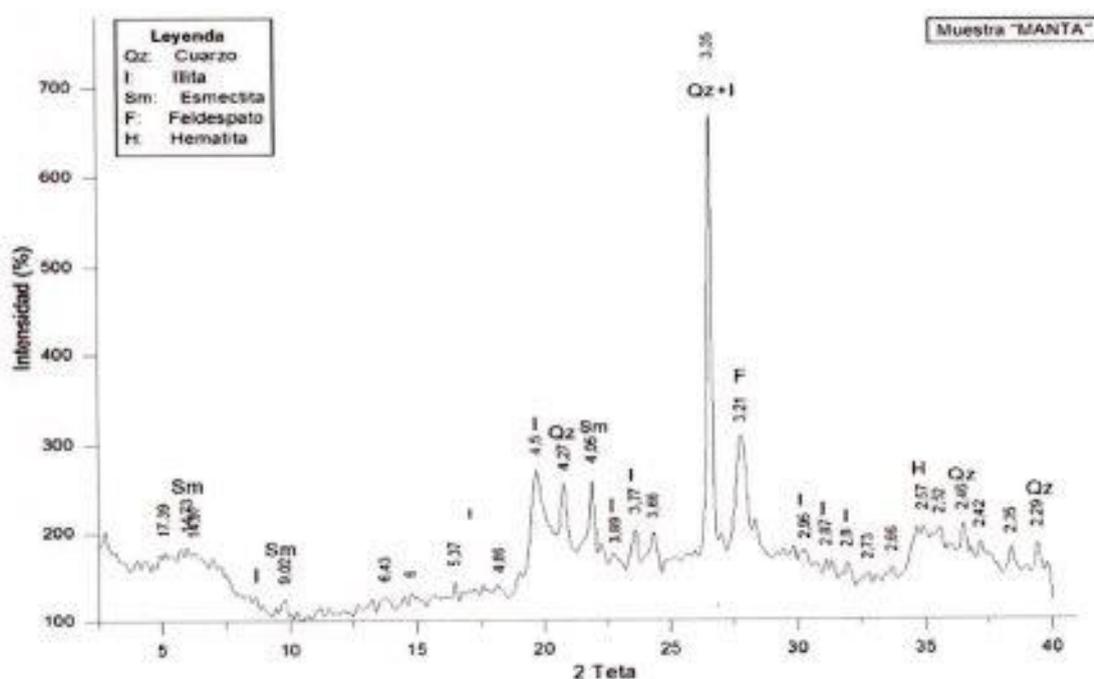


Figura 3.1.-Difracción de rayos X en Roca Total, muestra "MANTA"

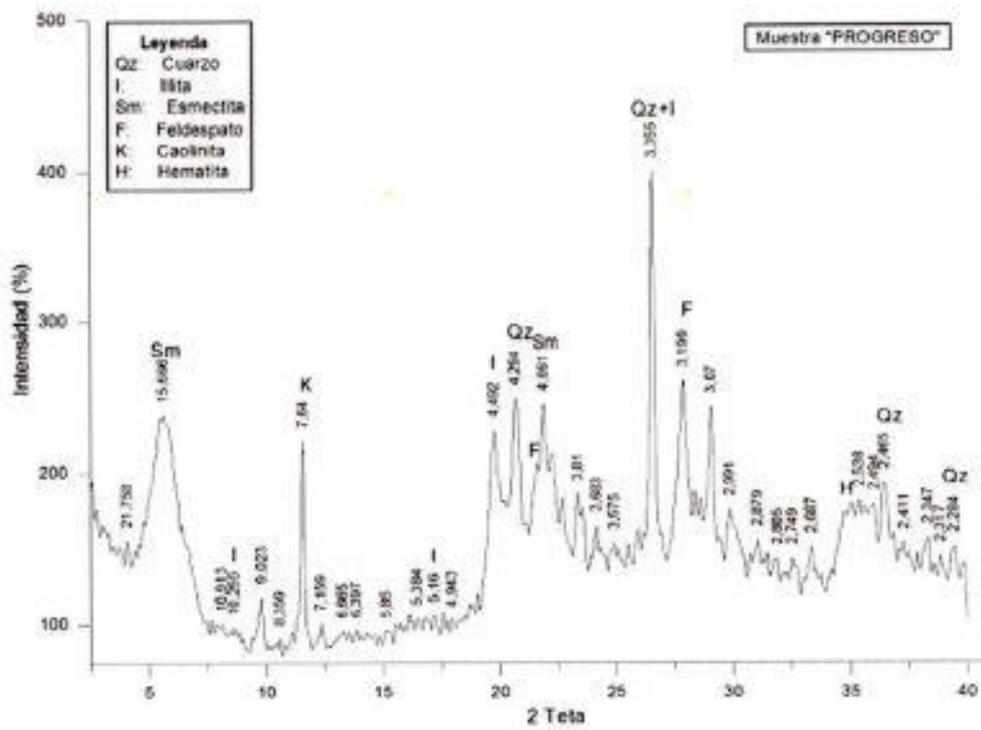


Figura 3.2.-Difracción de rayos X en Roca Total, muestra "PROGRESO"

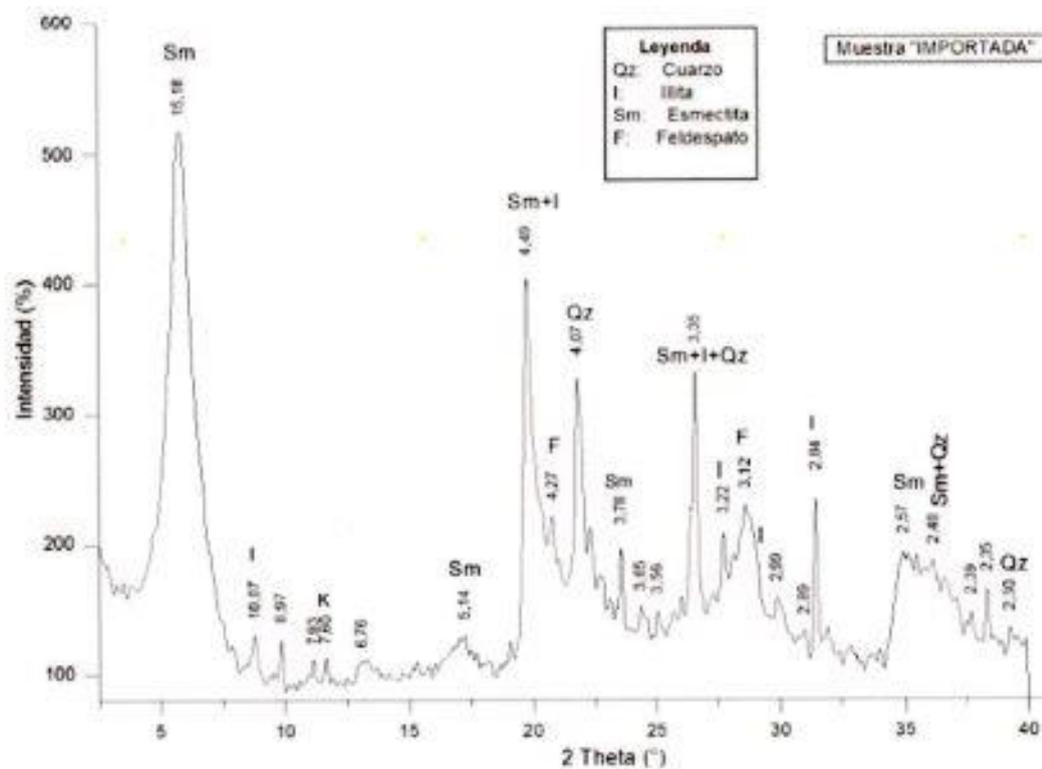


Figura 3.3.-Difracción de rayos X en Roca Total, muestra "IMPORTADA"

### 3.3.2 Caracterización de minerales en fracción arcilla 10 micrones

Para reconocer el tipo de minerales en fracción del tamaño arcilla se realiza los difractogramas en las muestras de estudio, a 10 micrones y el tratamiento fue natural (verde), glicolado (azul) y calcinada (rojo), como se observa en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 de las muestras "MANTA", "PROGRESO" e "IMPORTADA", respectivamente.

La muestra "MANTA" contiene como principal pico en 15.18 Angstroms en muestra natural, correspondiente a esmectita (Sm), y en el tratamiento con etilenglicol se expande a 17.18 Angstroms, estos valores son típicos de una montmorillonita del grupo de esmectitas y subgrupo dioctahedrales. En esta fracción también se reconoce la presencia de feldespatos (F) y la presencia de pocas cantidades de illita (I) y cuarzo (Qz).

La muestra "PROGRESO" tiene el principal pico en 15.01 Angstroms y se expande a 17.25 Angstroms, típico de una montmorillonita del grupo de esmectitas y subgrupo dioctahedrales; seguido se caracteriza la presencia de feldespato (F) y de pequeñas cantidades de illita (I) y cuarzo (Qz). El mineral de caolinita, que se reconoció en roca total, está ausente a los 10 micrones.

La muestra "IMPORTADA" tiene el pico de mineral expandible (Sm) en 15,34 Angstroms para la muestra natural, y después del tratamiento con etilenglicol se expande a 17,34 Angstroms. Este material también contiene baja presencia de feldespatos (F) y muy poca presencia de illita (I) y cuarzo (Qz).

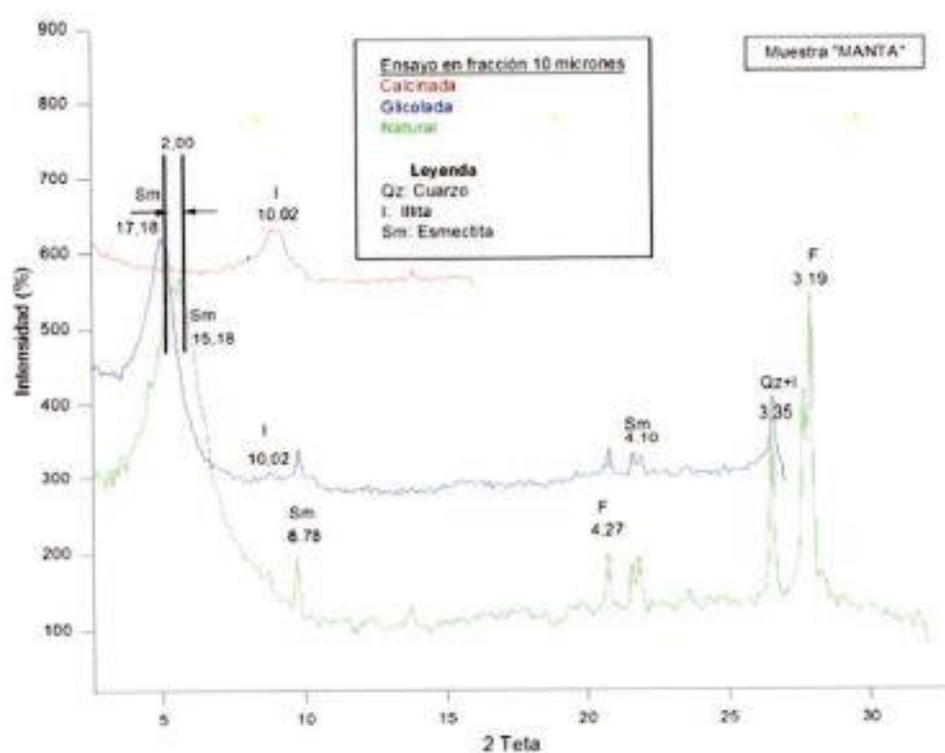


Figura 3.4.-Difracción de rayos X fracción arcilla 10 micrones, muestra "MANTA"

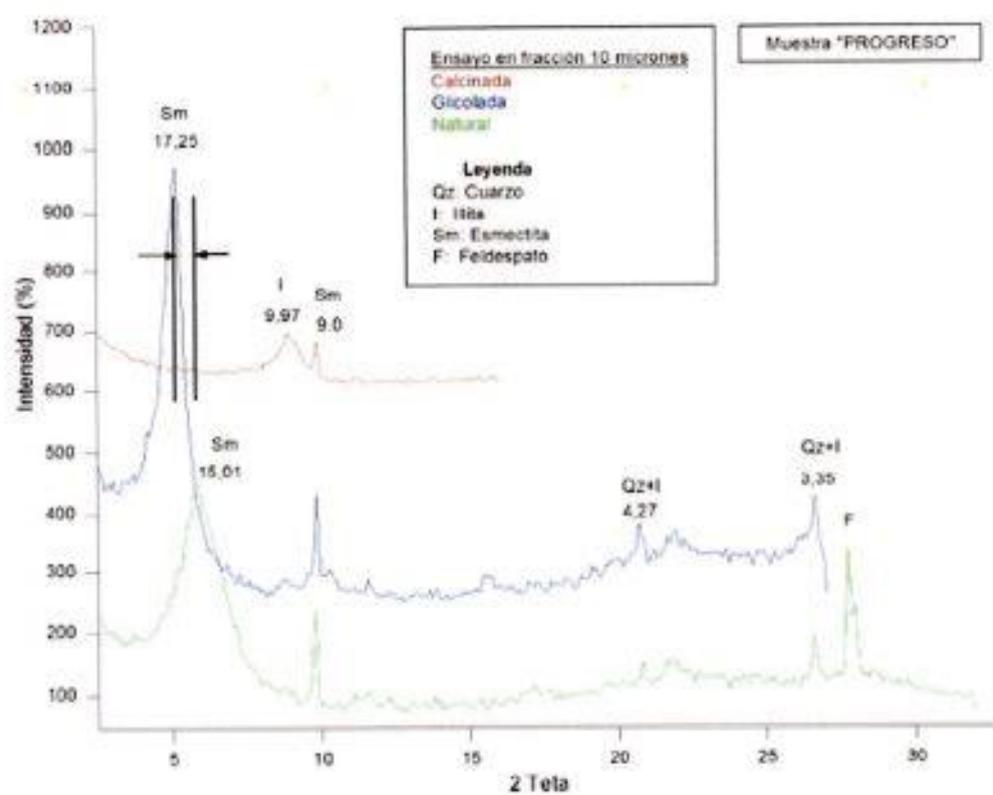


Figura 3.5.-Difracción de rayos X fracción arcilla 10 micrones, muestra "PROGRESO"

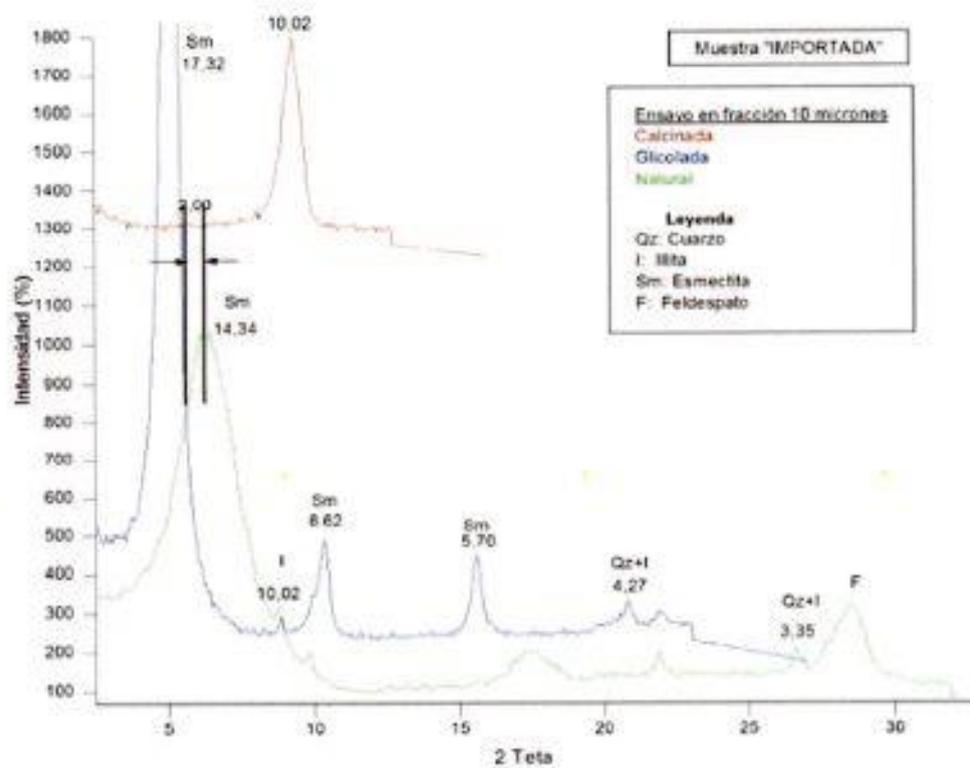


Figura 3.6.-Difracción de rayos X fracción arcilla 10 micrones, muestra "IMPORTADA"

## CAPÍTULO 4

### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo de graduación se desarrolló a finales del año 2007 y las referencias bibliográficas que se utilizaron, son las destacadas hasta ese año.

Los ensayos se realizaron en los laboratorios de suelos y de petróleos de la FICT, y los estudios de difracción de rayos X en Argentina.

La hipótesis planteada es caracterizar la muestra "MANTA" y comparar los resultados con normas internacionales para decidir si el material puede ser utilizado como lodo de perforación.

Los resultados fueron esperados con expectativas por parte de los especialistas en diseños de obras en la ciudad de Manta, generando un aporte a este sector.

A continuación se presentan las conclusiones que se obtienen después de analizar los resultados de los ensayos a las tres muestras utilizadas en este estudio, y de especial interés la muestra seleccionada en la ciudad de Manta. Así también se llegan a obtener recomendaciones a partir de este trabajo.

#### 4.1 Conclusiones

- La muestra de este estudio es de color marrón claro, al combinar con agua este material es moldeable, característica que llamo la atención para la aplicación como lodo bentonítico. Sus componentes son finos y los tamaños se determinaron mediante el Sistema Unificado de Suelos (SUCS) como limo de alta plasticidad (MH), confirmando mediante hidrometría, que los tamaños de la mayoría de sus componentes están entre 1/16 y 1/256, correspondientes a tamaños del limo. Las muestras "PROGRESO" e "IMPORTADA" son de color marrón y gris claro, respectivamente, también son de tamaño limo.
- Los ensayos de DRX en roca total permiten reconocer que las muestras estudiadas están constituidas de minerales como el cuarzo y feldespatos como mayoritarios con presencia de arcillas expandibles, como es la esmectita, también contienen otras arcillas no expandibles que son illita y caolinita, también en pequeñas proporciones, el color marrón de las muestras MANTA y PROGRESO puede ser asignado a la presencia del óxido férrico hematita.
- Para determinar la presencia de tipos de minerales presentes en tamaño de fracción arcillas se seleccionaron, mediante ley de Stock, los tamaños de 10 micrones. Se ensayaron para material natural, otro que fue afectado con etileglicol y otro que se calcinó, todo esto para determinar que las

esmectitas se expanden hasta 2 Angstroms, que los picos que se definieron para caolinita, son para ese mineral, si como para illita. . Por el tamaño de expansión se puede definir que el grupo de la montmorillonita es del subgrupo de las arcillas dioctahedrales denominadas esmectitas.

#### **4.2 Recomendaciones**

Luego de haber hallado los resultados para las muestras expandibles de la ciudad de Manta, se pueden redefinir las exploraciones en este sector, así como en Progreso y Cañar, por tal razón se indican las siguientes recomendaciones o sugerencias.

- Seguir realizando exploraciones, en Manta, con la intención de encontrar material expandible de alta pureza, tomando mayor cantidad de muestras para abarcar el cuerpo del afloramiento.
- Realizar una recolección integral de muestras del yacimiento para el análisis.
- Determinar yacimientos en el sector con mayor porcentaje de material arcilloso para realizar las mismas pruebas.

- Se debe realizar otros tipos de pruebas, como técnicas de análisis térmico para analizar purezas, cambios de masa, degradación, variación de viscosidad, etc.

## APENDICES

### APÉNDICE A

Especificaciones (valores guía) de la aplicación de esmectitas como aditivo de lodos de perforación y en la construcción subterránea.

	Casi exclusivamente para la industria de perforación				SAMIP <sup>11)</sup> (ITALIA)  Supergel	En su mayoría para construcción subterránea SAMIP <sup>11)</sup> ALEMANIA E-MACK (ITALIA) "AKSV" (1977)	
	API (USA) RP 29 RP 13B	OCMA (UK) 13 A DFCP-4	PETROBRAS (BRASILIA) Tipob Tipoc			"Standard- gel"	"bentonite
Tamaño de grano - Cribado húmedo: >75 µm (%) - Cribado húmedo: >20 µm (%)	≤2.5	≤4.0	≤2.5		<1	87% <2µm 5	
- Cribado en seco : >150 µm (%) - Cribado en seco : <63 µm (%)			≥0.86		>99	≈1.5	0
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )				1-2 <sup>8)</sup> 1-2 <sup>8)</sup>		2,3 <sup>7)</sup>	
pH	8-9			7-9	8-9	9.5-10.5	8-12
Humedad (%)	≤12	≤10	≤15		650	10±1	>450
Límite líquido ATTERBERG (%)							
Límite líquido BINGHAM (dyn/cm <sup>2</sup> ) <sup>2)</sup>						70-269 <sup>6)</sup>	



## BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, E., & RIGAÍL, A. (2006). Propiedades Anticorrosivas de un recubrimiento nanocompuesto de epóxica/amina/nanoarcillas. Revista Tecnológica ESPOL. 125 – 132

BANCO CENTRAL DEL ECUADOR. (s.f.) [www.bce.fin.ec](http://www.bce.fin.ec). Obtenido de <http://www.bce.fin.ec>

CÁRDENAS, J., & PACHECO, M. (2002). Industria cerámica en el Ecuador: evaluación de las materias primas no-metálicas. Tesis de grado ESPOL.

INEMIN - TECHNOSTONE S.P.A. (1998). Estudio de los yacimientos minerales no metálicos y rocas ornamentales. Proyecto para el desarrollo de los recursos minerales no metálicos en Ecuador.

LORENZ, W., GWOSDZ, W., (2004) Manual for geological and technical evaluation of mineral resources construction.

MORALES, A. (2003). Caracterización Mineralógica y Tecnológica de la arcilla de Guayaquil. Tesis de Magister. Oro preto brazil Inédito.

MORALES, A. VARAJAO, A., MENDES, J. CARRIÓN, P. (2006). Estado del arte de la arcilla de la provincia del Guayas y su proyección a la península de Santa Elena, Ecuador. Boletín Geológico y Minero. 723 – 736.

PERUGACHI, R. (2006). Modificación a nivel nanomolecular de las Propiedades de las Arcillas pertenecientes al grupo Ancón de la Península de Santa Elena. Tesis de grado ESPOL.

PERUGACHI, R., PAREDES, C., & CORNEJO, M. (2006). Las Nanoarcillas y sus potenciales aplicaciones en el Ecuador. Revista Tecnológica ESPOL. 121 – 124.

QUIMINET. (s.f.). [www.quiminet.com](http://www.quiminet.com). Obtenido de <http://www.quiminet.com>

SIMBALA V., (1981). Estudio de las arcillas de la zona de Charasol (Cañar) para la utilización en fluidos de perforación. Tesis de grado. ESPOL.

VEGA, J., VERDEJA, L., SANCHO, J., GARCIA, J. (1993). Caracterización y propiedades de las bentonitas de Amotape (Región Grau-Perú). Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 377 – 383