

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE CORRELACION ENTRE  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL UCS, POROSIDAD, DENSIDAD  
Y SATURACIÓN.**

**OSCAR FERNANDO JEREZ JEREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA 2012**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE CORRELACION ENTRE  
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL UCS, POROSIDAD, DENSIDAD  
Y SATURACIÓN.**

**OSCAR FERNANDO JEREZ JEREZ**

**Trabajo de investigación, presentado como requisito de grado para optar al  
título de Ingeniero Civil**

**Directores:**

**M.Sc. WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ  
Docente Escuela de Ingeniería Civil**

**Co-Directores:**

**Ing. JENNY MABEL CARVAJAL  
Ingeniera de petróleos ICP**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA 2012**

## **DEDICATORIA**

A Dios por acompañarme siempre y darme obstáculos que solucionar y soluciones para crecer.

A mis padres Norberto Jerez y Myriam Jerez que han sido un ejemplo de amor, responsabilidad, dedicación y trabajo. Gracias por apoyarme y estar presentes en todos mis proyectos, errores y logros.

A mis hermanos que siempre están para colaborarme, Lenny Lizeth Jerez, Yesid Norberto Jerez y Adriana Paola Jerez.

A mi hijo Ángel Esteban Jerez a quien debo ejemplo como padre y profesional, amor y comprensión.

Y a todos aquellos que siempre estuvieron esperando el comienzo de mi vida como profesional.

**Oscar Fernando Jerez Jerez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

La Escuela de Ingeniería Civil y sus docentes por ser la fuente de los conocimientos adquiridos, especialmente a mi director de proyecto el Ing. Wilfredo de Toro.

A la Ing. Jenny Mabel Carvajal por los conocimientos relacionados a mecánica de rocas, y enseñarme como debe ser un excelente profesional.

Al Grupo de Investigaciones de Estabilidad De Pozo (GIEP) y al Instituto Colombiano De Petróleos (ICP), por ser el paso siguiente después de la academia, y expandir mis conocimientos a una nueva ciencia aplicada.

A Erick Ildige por sus excelentes concejos y su ayuda en registros de pozo, a Hernán Mantilla quien fue la primera persona que se intereso en ayudarme a iniciar este proyecto; a Javier por su interés, a Luis F. Ramírez por su colaboración en programación, y en general al todo los miembros del laboratorio de Mecánica de Rocas con los cuales siempre pude contar y aprender.

## TABLA DE CONTENIDO

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.1.1 Objetivos Generales	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
2. ESTADO DEL ARTE	21
2.1 GENERALIDADES	21
2.2 PARÁMETROS ELÁSTICOS	21
2.3 RESISTENCIA MECÁNICA DE LA ROCA	22
2.3.1 Prueba de Falla Triaxial	23
2.3.2 Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS)	24
2.4 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	25
2.5 CORRELACIONES CON LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL.	27
2.5.1 Porosidad en rocas de origen clástico.	27
2.5.2 Determinación de la Porosidad Efectiva.	28
2.5.3 Método Para Hallar La Porosidad Absoluta.	29
2.5.4 Estimación De La Porosidad Absoluta Con Registros	33

2.5.5 Comportamiento Mecánico ante la Variación de la Porosidad _____	35
2.5.6 Mecanismos de correlaciones entre la saturación y las Propiedades Mecánicas. _____	36
2.5.7 Densidad como una variable de correlación de las Propiedades Mecánicas. _____	37
2.6 EFECTOS DE LA MINERALOGÍA EN LA RESISTENCIA DE LA ROCA. _	39
2.6.1 Areniscas _____	41
2.6.2 Lutitas _____	46
2.6.3 Evaluación Mineralógica de la Arcillas por Medio de Registros. _____	52
3. MUESTREO REALIZADO _____	54
3.1 GENERALIDADES DE LA FORMACIÓN LITOLÓGICA DE VALIDACIÓN	54
3.2 SITIO DE MUESTREO _____	55
4. TRABAJO DE LA LABORATORIO _____	59
4.1 EXTRACCIÓN DE LOS PLUG _____	59
4.2 CELDA DE COMPACTACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE PLUGS SINTÉTICOS. _____	63
4.2.1 Procesos de Preparado de la Celda De Carga. _____	65
4.2.2 Limitantes en el Proceso de Compactación. _____	66
4.2.3 Carga De Consolidación Y Control De Propiedades Petrofísicas _____	67
4.2.4 Identificación de los Especímenes (PLUG) _____	70

4.3 PULIDO DE LAS MUESTRAS _____	71
4.4. MONTAJE DE LAS PRUEBAS _____	75
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS _____	77
5.1 METODOLOGÍA _____	77
5.2 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA POR MEDIO DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) _____	78
5.2.1 Calculo de la densidad a partir de las pruebas (DRX) _____	80
5.3 INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL _____	81
5.3.1 Muestras de afloramiento _____	81
5.3.2 Muestras consolidadas con la celda de carga. _____	87
5.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE CORRELACIONES EXISTENTES. _____	94
5.4.1 Uso del modelo propuesto por Crauford B.R para comparación. _____	97
6. REGISTRO DE POZO _____	101
6.1 CROSSPLOT _____	102
6.3 APLICACIÓN DE LA CORRELACIONES PROPUESTA _____	105
CONCLUSIONES _____	108
RECOMENDACIONES _____	109
BIBLIOGRAFÍA _____	110

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relaciones entre UCS y el tiempo de transito Dt. Para areniscas. _____	42
Tabla 2. Correlaciones entre UCS, Vp, y $\rho$ . Para areniscas. _____	43
Tabla 3. Correlaciones entre UCS y porosidad $\phi$ . Para areniscas. _____	44
Tabla 4. Correlaciones entre UCS, contenido de arcilla y porosidad $\phi$ . Para areniscas. _____	45
Tabla 5. Correlaciones entre UCS y porosidad $\phi$ . Para Carbonatos. _____	45
Tabla 6. Correlaciones entre UCS y tiempo de transito (DT). Para Carbonatos. _	46
Tabla 7. Correlaciones entre UCS y velocidad de onda P (Vp). Para limolitas. __	50
Tabla 8. Correlaciones entre UCS y porosidad $\phi$ . Para limolitas. _____	51
Tabla 9. Correlaciones entre UCS y densidad pb. Para limolitas. _____	51
Tabla 10. Identificación. Muestras de Afloramiento. _____	70
Tabla 11. Identificación. Muestras de Sintéticas. _____	71
Tabla 12. Relación longitud/diámetro, densidad, peso y volumen. Para muestras Sintéticas. _____	73
Tabla 13. Relación longitud/diámetro, densidad, peso y volumen. Para muestras de afloramiento. _____	74
Tabla 14. Concentración Relativa Roca total (DRX) _____	80

Tabla 15. Concentración Relativa fracción menor de 2 micras. (DRX) _____	80
Tabla 16. Valores obtenidos de la Resistencia a la Compresión Uniaxial y Modulo de Young para las muestras de afloramiento. _____	85
Tabla 17. Parámetros usados para la consolidación de la roca sintética; contenido de agua y porosidad. _____	88
Tabla 18. Valores obtenidos de la Resistencia a la Compresión Uniaxial y Modulo de Young para las muestras Sintéticas. _____	90

## LISTA DE FIGURAS.

Figura 1 Linealización de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb _____	23
Figura 2 Representación grafica del Esfuerzo vs Deformación. _____	24
Figura 3 Factores más relevantes en la determinación y correlación de la Resistencia Mecánica de la Roca. _____	26
Figura 4. Consideraciones para el cálculo de la porosidad. _____	30
Figura 5. Cálculo de la Porosidad Total para la Roca seca. _____	30
Figura 6. Consideraciones para el cálculo de la Porosidad Total con la roca Saturación. _____	31
Figura 7. Cálculo de la Porosidad Total para roca Saturada. _____	32
Figura 8. Registro Caliper, Gamma Ray y Porosidad. _____	33
Figura 9. Comportamiento de la de Densidad ante el cambi3n de la Porosidad	38
Figura 10. Composición De La Roca. _____	40
Figura 11. Compactación de los granos de arena y arcillas. _____	47
Figura 12. Columna Estratigráfica de la formación Los Cuervos _____	54
Figura 13. Sección Quebrada la Piñalerita _____	56
Figura 14. Representa un Esquema de la celda de Compactación. _____	64
Figura 15. Procesos de Consolidaciones de la Celda de Carga controlada por Fuerza. _____	67

Figura 16. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777756. _____	81
Figura 17. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777757 _____	82
Figura 18. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777758 _____	82
Figura 19. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777759 _____	83
Figura 20. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777760. _____	83
Figura 21. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777761 _____	84
Figura 22. Variación de la resistencia inconfiada ante la variación de contenido de arcilla. _____	86
Figura 23. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200802546. _____	89
Figura 24. Respuesta de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la saturación. _____	91
Figura 25. Respuesta de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la porosidad. _____	92
Figura 26. Relación entre la porosidad y la densidad para las muestras consolidadas en la Celda De Carga. _____	93
Figura 27. Cambio de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la porosidad a partir de la literatura. _____	96
Figura 28. Esquema de embalaje geométrico para la mezcla bimodal de partículas gruesas y de grano fino. _____	98
Figura 29. Porosidad en función de la fracción de peso total de arcilla. _____	99

Figura 30. Cambio de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la porosidad para las muestras de la formación Los Cuervos y la tendencia propuesta por Crawford, B.R	100
Figura 31. Densidad (RHOB) contra contenido de arcilla (Gamma Ray) para la formación Los Cuervos, Pozo UIS1	102
Figura 32. Densidad corregida (RHOB) contra contenido de arcilla (Gamma Ray) para la formación Los Cuervos, Pozo UIS1.	103
Figura 33. Densidad corregida (RHOB) contra porosidad Nuetron (NPSS) para la formación Los Cuervos, Pozo UIS1.	104
Figura 34. Registros de Pozo para UIS1.	105
Figura 35. Predicción en Registros de Pozo de UCS para UIS1.	107

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE CORRELACION ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL UCS, POROSIDAD, DENSIDAD Y SATURACIÓN\*.

**AUTOR:** JEREZ JEREZ, Oscar Fernando\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS), porosidad, densidad, saturaciones, correlaciones.

## RESUMEN

Inicialmente se realizó una búsqueda bibliográfica de aquellas características que de alguna forma generan reducción o modificación de las propiedades mecánicas, teniendo en cuenta el grado de significancia de los resultados que expone la literatura; se encuentra que las propiedades que más influyen en las características de la resistencia de las rocas son: Mineralogía, porosidad, densidad, compactación (arreglo de granos) y saturación, este último como influyente externo que puede llegar a afectar las propiedades mecánicas y depende indirectamente del mineral existente. Posteriormente se selecciona la formación Los Cuervos del cual se extrajeron muestras de lutitas para ser ensayadas, junto con los valores obtenidos a partir de muestras sintéticas consolidadas a partir de la celda de carga, con los resultados obtenidos se caracteriza la variación de la resistencia mecánica antes el cambio de las propiedades petrofísicas y se desarrolló una correlación para las lutitas de la formación Los Cuervos, entre UCS Resistencia a la Compresión Uniaxial, porosidad, densidad y saturación. Finalmente se escoge la relación del estado del arte que mejor se ajusta a los resultados obtenidos en las pruebas, y se genera un registro de resistencia mecánica inconfiada para ser corrido en pozo, validado mediante los valores leídos del registro Caliper que permite observar el comportamiento de estabilidad del agujero.

---

\* Trabajo de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil,  
Director: M.Sc. Wilfredo del Toro. Co directora: Ing. Jenny Mabel Carvajal.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY OF CORRELATION BETWEEN RESISTANCE UNIAXIAL COMPRESSION, POROSITY, DENSITY AND SATURATION\*.

**AUTHOR:** JEREZ JEREZ, Oscar Fernando\*\*

**KEY WORDS:** Uniaxial Compressive Strength (UCS), Porosity, Density, Saturation, Correlations.

## **DESCRIPTION**

Initially a literature search was conducted of those characteristics that generate some form of reduction or modification of the mechanical properties, taking into account the degree of significance of the results that exposes the literature is that the properties that influence the characteristics of the rock strength are: mineralogy, porosity, density, compaction (grain basis) and saturation, the latter as influential external can affect the mechanical properties and existing mineral indirectly depends. Subsequently the formation is selected which Los Cuervos shale samples were extracted to be tested, together with values obtained from samples from you consolidate synthetic load cell, with the results obtained characterize the variation in mechanical strength before change of petrophysical properties and developing a correlation for shales of Los Cuervos, between UCS uniaxial Compressive Strength, porosity, density and saturation. Finally, choose the relationship of the state of the art that best fits the results of the tests, and generates a log inconfined strength to be run on well validated by the registry values read Caliper allowing observation of the behavior of hole stability.

---

\*Faculty of Physical Engineering

\*\*Mechanics, School of Civil Engineering, Director: M.Sc. Wilfredo del Toro.  
CoDirector Eng: Jenny Mabel Carvajal.

## INTRODUCCIÓN

La resistencia mecánica de la roca es un dato de entrada esencial en los modelos geomecánicos dentro de la industria de petróleo, fundamental para la determinación de la ventana de lodo de perforación el cual es indispensable para el sostenimiento de las paredes del agujero del pozo. Sin embargo si los datos de entrada para el cálculo de la ventana de lodo son incorrectos puede suceder que a mayor peso de lodo ocurre una reducción notable en la tasa de penetración y fracturamiento hidráulico e incremento en los costos de perforación en el transcurso de los procesos operacionales, caso contrario, al reducir el peso de lodo puede dar lugar al colapso del agujero debido a la estrechez y desprendimiento de las paredes del pozo, aumentando de la misma forma costos de operación relacionados con problemas de tubería [13] por mencionar solo uno. Por esta razón la importancia de los datos de entrada en el modelo geomecánicos; esto implica conocer algunos parámetros mecánicos de la roca como los son: UCS, AFI, cohesión y módulos elásticos. El parámetro a analizar en esta investigación es la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS) y los factores que modifican y alteran su comportamiento.

Se sabe que la mejor forma de hacer frente a la determinación de este parámetro es por medio de pruebas destructivas en laboratorio lo cual, brinda información precisa de la roca [4] [6], pero en general, no puede ofrecer un perfil de UCS continuo, sumado a esto el costo que implicaría realizar los ensayos requeridos para establecer el comportamiento generalizado de la propiedad en una formación o en un pozo. Por otro lado, los métodos no destructivos pueden entregar registros continuos de la resistencia de la roca, pero son aproximaciones que pueden desviarse de la realidad al no considerar todos los parámetros que alteran el comportamiento de las propiedades en sí mismo; para que las predicciones sean apropiadas es esencial entender como la roca se comporta ante la variación de sus propiedades intrínsecas y no caer en el error de investigar solo una de las propiedades sin tener en cuenta las demás; dentro de los métodos no destructivos

se encuentran los registros petrofísicos, que son una gran fuente de información de la cual pueden ser extraídas propiedades importantes que pueden ser correlacionadas con el UCS [4].

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A la hora de determinar las propiedades mecánicas de la roca la manera más confiable es por medio de pruebas destructivas en laboratorio, sin embargo esto genera valores discretos en relación con la profundidad donde fue tomada la muestra y no puede ser entendida como un valor constante para la formación además la disponibilidad limitada de corazones de la roca puede provocar una gran incertidumbre en los resultados, de esta forma nace la necesidad de desarrollar una metodología que permita inferir las propiedades mecánicas, especialmente la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS) a través de establecer relaciones entre esta y las propiedades petrofísicas.

#### **1.1.1 Objetivos Generales**

Desarrollar una metodología de correlación entre la Resistencia A La Compresión Uniaxial (UCS), la porosidad y la saturación para aumentar el grado de certidumbre en la determinación de las propiedades mecánicas mediante registros de pozo y pruebas destructivas de muestras tomadas in situ.

#### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Seleccionar las correlaciones que se encuentran en el estado del arte como parámetro de comparación.

Caracterizar el comportamiento del UCS con respecto a la variación de la densidad, la porosidad y la saturación mediante muestras tomadas de la Formación Cuervos.

Desarrollo de una correlación que permita obtener el UCS a partir de la porosidad, la densidad, la saturación y la variación de porcentaje de arcillas existentes en las muestras.

Validar el modelo desarrollado a partir de información existente en pozos y de las correlaciones existentes.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 GENERALIDADES

La mecánica es la rama de la ingeniería que trata la mecánica de los materiales, el cual estudia los esfuerzos y las propiedades de los materiales. En el caso de los modelos geomecánicos ésta involucra un conocimiento detallado de algunas propiedades mecánicas de las rocas para tener un control del comportamiento de ella frente a la acción de control y manipulación externa.

### 2.2 PARÁMETROS ELÁSTICOS

- ✓ **Propiedades Elásticas:** Son aquellos límites de deformación donde la roca tiene el potencial de volver a su estado original sin perder propiedades.

**Teoría elástica:** Esta teoría propone una relación lineal entre las deformaciones de un material y los esfuerzos aplicados, siendo esto válido sólo para deformaciones reversibles.

**Modulo de Young ( E ):** Es una medida que relaciona en forma lineal las tensiones con las deformaciones producidas a un material. Podría decirse que es la tangente de la curva esfuerzo deformación sin exceder el límite elástica donde la relación deja de ser lineal.

$$\sigma = E * \epsilon \quad (1)$$

**Relación de Poisson ( v ):** Es una contante elástica que relaciona el estrechamiento y alargamiento en sentido contrario, de un materia. Matemática mente es la relación entre deformación transversal y la axial.

$$\nu = \epsilon_{Tr} / \epsilon_{Ax} \quad (2)$$

**Modulo de Rigidez ( G ):** Es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material al ser aplicado un esfuerzo cortante. En otras palabras puede ser la relación ente el esfuerzo y la deformación angular o entre esfuerzo de corte y la resistencia a este mismo.

$$G = \tau / \gamma \quad (3)$$

**Modulo de Bulk ( K ):** Es una relación que caracteriza el cambio de presiones hidrostáticas y la deformación volumétrica del estrato.

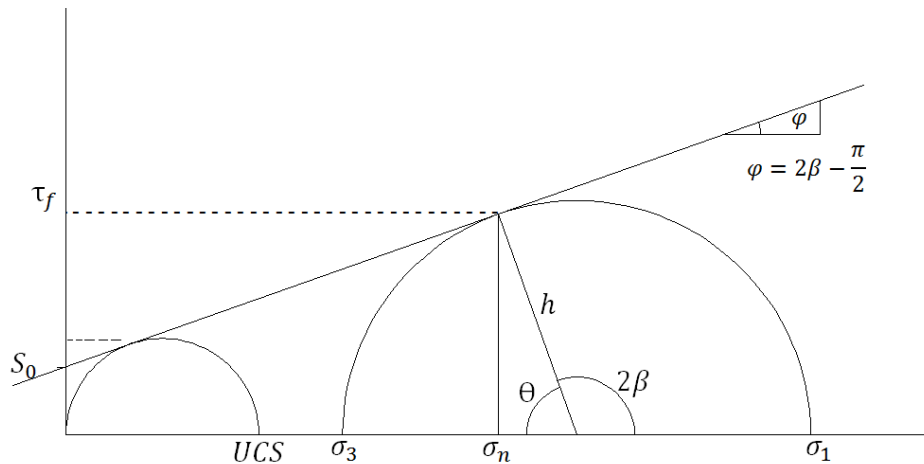
$$K = \Delta P / (\Delta V / V_0) \quad (4)$$

### 2.3 RESISTENCIA MECÁNICA DE LA ROCA

**Resistencia:** La capacidad de los sólidos deformables para soportar esfuerzos sin alterar su estado interno. Es una propiedad que depende esencialmente del mineral del que está conformada la roca y de su historia geológica o tiempo de compactación.

### 2.3.1 Prueba de Falla Triaxial

**Figura 1** Linealización de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb



Fuente: Tomado y adaptado del curso de Geomecánica. ICP. 2010

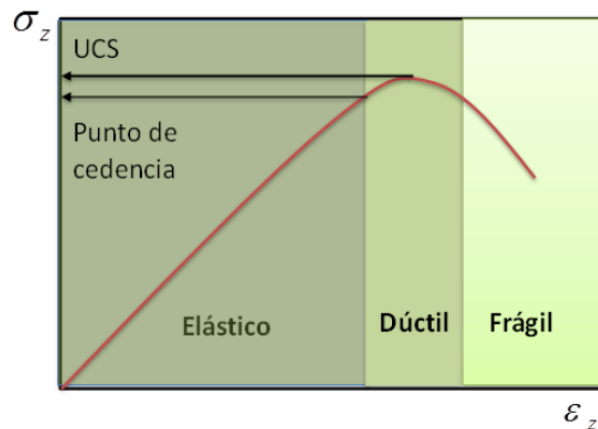
Para el análisis de estabilidad, un parámetro de entrada importante y necesario es la resistencia de la roca, que es generalmente caracterizado por la fuerza de cohesión  $S_o$  y el ángulo de fricción  $\varphi$ ; la determinación de estos parámetros se realizan por medio de pruebas de laboratorio como la prueba de Resistencia Triaxial, en el que una muestras cilíndrica es sometida a diferentes presiones de confinamiento hidrostático y una carga axial es aplicada hasta que la roca falle, y los resultados se presentan como una serie de círculos semejante los mostrados en la Figura 1 el cual obedece a la linealización de la envolvente de Mohr-Coulomb. Cabe añadir que es posible representar la envolvente de falla en forma curvilínea utilizando el criterio de falla de Hoek-Brown, pero este se presenta especialmente en areniscas.

La línea que envuelve la familia de los círculos tiene una pendiente igual a  $\tan \varphi$  o AFI y es considerada como ángulo de fricción interna y una intercepción igual a  $S_o$ .

### 2.3.2 Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS)

A su vez existe otra prueba bajo condiciones de Compresión Uniaxial (UCS), se define como el máximo esfuerzo que puede soportar la roca sometida sin presión de confinamiento, que también es usada en muchas fórmulas de diseño y como propiedad índice para la selección de una técnica apropiada de excavación o en el diseño de la ventana de lodo de perforaciones para mantener estable el agujero y evitar derrumbes.

**Figura 2** Representación grafica del Esfuerzo vs Deformación.



Fuente: FJAER, ET AL. Petroleum Related Rock Mechanics.2 ed. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 2008 P.323.

En esta prueba se extrae una muestra de roca cilíndrica que mantenga unas condiciones geométricas longitud/diámetro = 2/1, a su vez la planitud de esta debe ser mínimo de 0,02mm de diferencia entre cualquier punto medido para asegurar el buen calculo de presión  $\sigma = Fuerza/Area$ . Posteriormente la roca es introduce en una maquina de carga con presión de confinamiento igual a cero y mediante el monitoreo constante del esfuerzo axial y las deformaciones axiales y diametrales es posible obtener la Resistencia Máxima que puede soportar la roca (UCS), el modulo de Young y relacion de Poisson ( $\nu$ ).

La fuerza de corte se debe a una combinación de la cohesión y la fricción entre los granos de la roca, de esta manera la Resistencia a la Compresión Uniaxial “UCS” puede ser inferido también a partir de la envolvente de falla usando el criterio de Mohr Coulomb (Ecuación 5 y 6), o puede ser calculado directamente.

$$UCS = 2 * S_o * \tan \beta \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\varphi}{2} + 45^\circ \quad (6)$$

Instintivamente se puede notar que la resistencia de la roca puede estar vinculada a su compactación y nace la necesidad de encontrar estos valores de otras maneras que no incluyan la obtención de corazones (núcleos de roca) metro a metro (pía a pie) en el pozo. Para dar solución a este inconveniente diferentes autores proponen establecer relaciones entre el ángulo de fricción ( $\varphi$ ), la cohesión ( $S_o$ ), Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS) y los Modulos Elásticos, a partir de los valores de los registros de pozo, tales como los registros de porosidad, densidad, velocidad del sonido y GR (Gamma Ray).

## 2.4 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Manohar Lal [21] realizó un trabajo donde considera el efecto de tres factores que son considerados los mayores contribuyentes al cambio de la resistencia mecánica de las rocas, estos son, la mineralogía de las arcillas, contenido de arcilla y la compactación (Figura 3). Encontró que el principal factor que afecta la resistencia mecánica es el grado de compactación, el cual se caracteriza en términos de porosidad, densidad aparente y la velocidad de onda. Sin embargo, es importante indicar que para cada litología se requiere una calibración de los modelos de correlación [9], ya que la naturaleza heterogénea de la roca revela una afectación importante que puede ser significativa, es cierto entonces que pueden

existir dos rocas con la misma porosidad pero diferente arreglo de grano, tamaño de poros y algunos otros porcentajes de mineral, que las hacen diferentes y finalmente, dichas rocas presentan propiedades mecánicas diferentes.

**Figura 3** Factores más relevantes en la determinación y correlación de la Resistencia Mecánica de la Roca.



Fuente: Tomado y adaptado de MANOHAR LAL. Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength.

En un trabajo realizado por Woehrl y otros [4] se presenta el desarrollo de una herramienta llamada FORMEL (Mecánica de Formación de Registros) para estimar las propiedades mecánicas a partir de los registros. Se basa en un modelo que describe los procesos que ocurren en la roca durante la carga mecánica, entre los datos de entrada para la simulación del comportamiento mecánicos de la roca se encuentran los registros de porosidad, densidad aparente y registros sísmicos. Dentro de lo que Woehrl concluye en su trabajo es que se necesario tener en cuenta datos experimentales para la calibración de cualquier corrección encontrada ya que prescindir de ello constituye un alto margen de error en los datos de cualquier simulación; otra característica importante es que la porosidad constituye el mayor contribuyente de confiabilidad de los resultados, análisis que también Horsrud [23] observo en su trabajo, mencionando que la porosidad es

identificada como el mejor parámetro que predice la variable aleatoria de la resistencia de las rocas sedimentarias.

## **2.5 CORRELACIONES CON LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL.**

### **2.5.1 Porosidad en rocas de origen clástico.**

Se define la porosidad como el porcentaje o fracción de los espacios vacíos o poros entre granos en relación al volumen total de la roca y representa la capacidad que tiene una roca de almacenar un fluido; entre los tipos de porosidades se encuentran las porosidades primarias en donde la matriz de la roca se compone de granos individuales y los poros se hallan entre los granos (porosidad intergranular) y la porosidad secundaria que se debe a la acción de agua de formación y fuerzas tectónicas en la matriz, los cuales originan fracturas y “huecos” debido a la abrasión.

Entre los diferentes minerales que conforman las rocas encontramos los carbonatos densos (calizas y dolomitas) y las evaporitas (sal, anhidrita, yeso, silvita etc) que pueden tener porosidades cercanas a cero que por motivos prácticos es considerada como cero; las areniscas bien consolidadas pueden tener de 10% a 15% mientras que las no consolidadas pueden tener una porosidad de 30% o más, las lutitas o arcillas pueden llegar a tener una porosidad mayor de 40% llenas de agua, pero estos poros son tan pequeños que originan una permeabilidad que por motivos prácticos es tomada como cero. Dentro de esta investigación es esencial señalar que está dirigida en su mayoría a rocas de composición mineralógica especialmente areniscas, limolitas y arcillolitas.

Entre los tipos de porosidad se encuentran la porosidad efectiva la cual es la porosidad útil o fracción de volumen total correspondiente al volumen de poros

conectados entre sí que permiten la circulación de fluido y, la porosidad absoluta la cual es la fracción de volumen total correspondiente al volumen de poros conectados o no conectados entres sí.

Es importante a su vez tener presente que a mayor contenido de arcilla se evidencia una mayor concentración de poros, esto debido a que la arcilla mantiene micro-porosidades en sus laminaciones. La porosidad depende principalmente de:

- El empaque geométrico: El empaque de granos esféricos de diferentes tamaños (mal escogidos) reduce la porosidad.
- La cementación: La acción de cementación por cristalización de cualquier mineral (cuarzo, calcita, dolomita etc.) reduce la porosidad.
- La angularidad y grado de redondeo tienen influencia en la porosidad, los granos con mayor grado de redondeo permiten una mayor porosidad.
- La granulación (el proceso por el cual los granos de los minerales se rompen por presión de sobrecarga) por lo general aumentan la porosidad. Sin embargo, la superficie específica también se incrementa, por lo tanto, se reduce la permeabilidad.

### **2.5.2 Determinación de la Porosidad Efectiva ( $\phi_{ef}$ )**

Todos los métodos utilizados para determinar el volumen poroso miden el volumen poroso efectivo, y se basan en la extracción o introducción de fluidos en el espacio poroso.

#### **Método del Porosímetro de Helio**

Su funcionamiento está basado en la Ley de Boyle, donde un volumen conocido de helio (contenido en una celda de referencia) es lentamente presurizado y luego

expandido isotérmicamente en un volumen vacío desconocido. Después de la expansión, la presión de equilibrio resultante estará dada por la magnitud del volumen desconocido; esta presión es medida. Usando dicho valor y la Ley de Boyle, se calcula el volumen desconocido, el cual representa el volumen poroso de la muestra.

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 \quad (7)$$

Donde  $P_1$  y  $P_2$  son la presión inicial y final respectivamente y  $V_1$  y  $V_2$  los volúmenes iniciales y finales respectivamente.

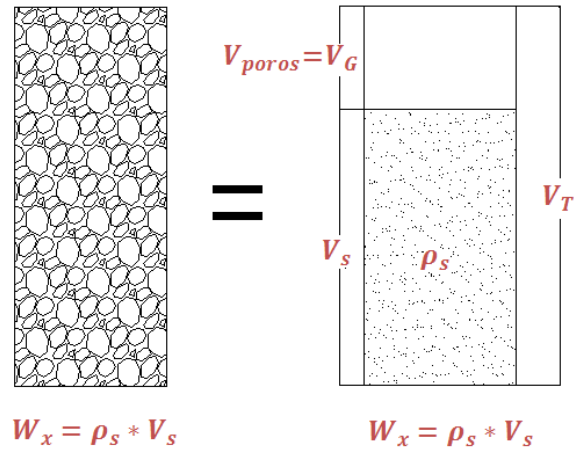
### **Método de Saturación de Barnes**

Este método consiste en saturar una muestra limpia y seca con un fluido de densidad conocida y determinar el volumen poroso por ganancia en peso de la muestra. Para medir la porosidad efectiva, se seca una muestra de núcleo de campo que tiene una forme regular. De la muestra es extraído su contenido con tolueno o algún otro solvente y se deja secar. Se obtiene luego el volumen total midiendo directamente sus dimensiones, o bien, mediante el volumen de desplazamiento de fluido no penetrante como el mercurio. El espacio vacío puede determinarse evaluando la muestra y luego saturándola con un líquido mojado. El aumento en el peso, dividido por la densidad del liquido es igual al volumen poroso.

### **2.5.3 Método Para Hallar La Porosidad Absoluta ( $\phi_{ab}$ ).**

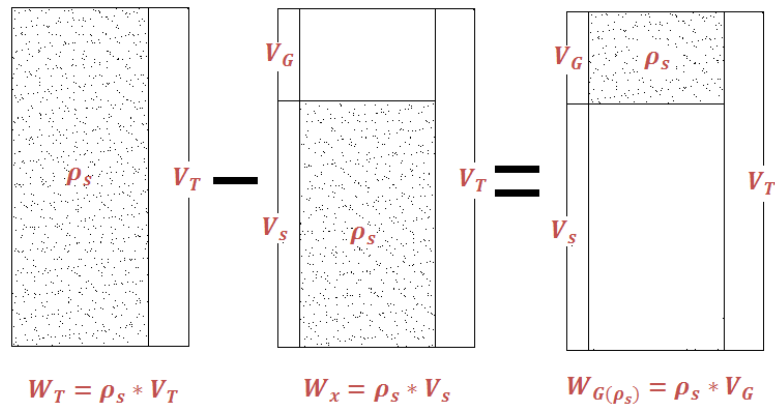
La mejor manera para determinar la porosidad total de la roca es mediante la relaciones entre el peso de una muestra de geometría conocida y el peso que esta tendría si la roca no mantuviera poros.

**Figura 4.** Consideraciones para el cálculo de la porosidad.



Fuente: Autor.

**Figura 5.** Cálculo de la Porosidad Total para la Roca seca.



Fuente: Autor.

$$\phi_{ab} = 1 - \frac{W_x}{W_T} \quad (8)$$

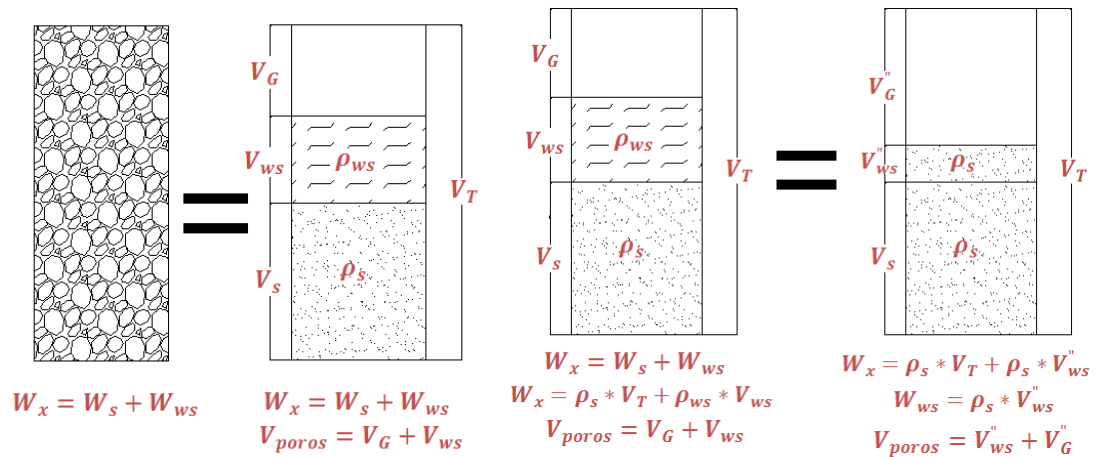
$W_x$  = Peso de una muestra de roca o Plug.

$W_T$  = Peso teórico calculado con la densidad de la matriz de la roca, que supone una roca teórica sin porosidad.

La Ecuaciones 8 es válida para el caso en que la saturación  $S_w$  sea igual a cero.

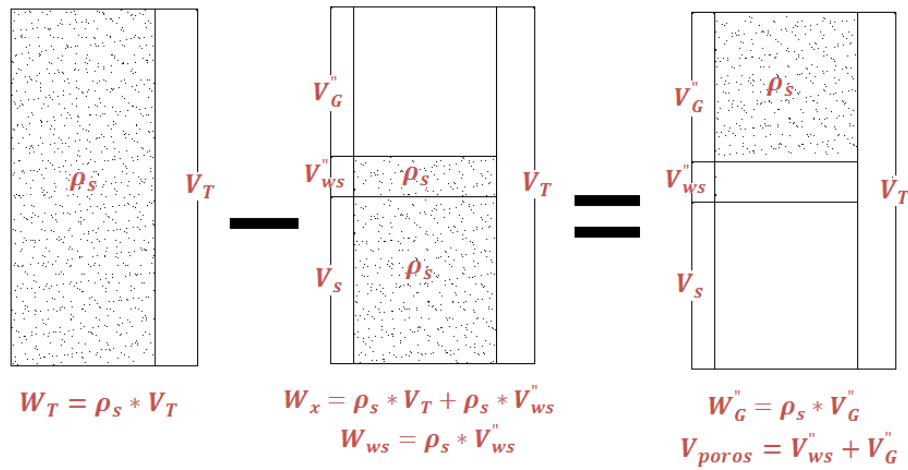
Para el caso en que la roca está saturada total o parcialmente se debe restar el peso de agua a la expresión  $W_x$ , o se puede encontrar otra expresión en función de la saturación de la siguiente manera:

**Figura 6.** Consideraciones para el cálculo de la Porosidad Total con la roca Saturación.



Fuente: Autor.

**Figura 7.** Cálculo de la Porosidad Total para roca Saturada.



Fuente: Autor.

En donde:

$$\phi_{ab} = \left(1 - \frac{W_x}{W_T}\right) * \left(1 - S_w * \frac{\rho_{ws}}{\rho_s}\right)^{-1} \quad (9)$$

$S_w$  = Saturación de la roca.

$\rho_s$  = Densidad de la matriz y los granos

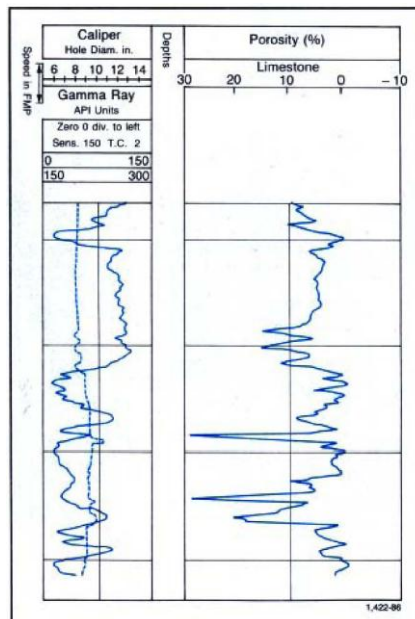
$\rho_{ws}$  = Densidad del liquido Saturante.

El proceso requiere la trituración de la muestra para encontrar la densidad del mineral, densidad que es igual a la densidad de una muestra teórica con porosidad igual a cero. A sí mismo el secado de la muestras al horno proporciona mediante pérdida de peso, el contenido de agua que esta mantenía.

#### 2.5.4 Estimación de la porosidad absoluta con registros.

Los registros de pozo son la representación grafica de las reacciones de los diferentes instrumentos de registros a medida que descienden dentro del pozo, el cual en su eje vertical se encuentra la profundidad medida desde superficie y en el eje horizontal se encuentra la escala que depende del tipo de registros utilizado, entre los diferentes registros se encuentran el registros Sónico, el registro Density, el registro Neutrón y el registro Gamma Ray.

**Figura 8.** Registro Caliper, Gamma Ray y Porosidad.



Fuente: Schlumberger, Principios/Aplicaciones de la interpretación de registros

#### **Registro Sónico:**

Mide el tiempo de tránsito por intervalo de tiempo ( $D_t$ ) o el tiempo de tránsito en microsegundos que requiere una onda acústica para recorrer una unidad (pies o metros) de formación en un camino paralelo al pozo. Por medio de una relación

empírica promedio ponderada por tiempo como se muestran en la Ecuación (10) es posible obtener la porosidad.

$$\phi = \frac{D_t - D_{ma}}{D_f - D_{ma}} \quad (10)$$

Donde:

$D_t$  = Tiempo de transito leído en el registro.

$D_f$  = Tiempo de transito del liquido contenido en los poros.

$D_{ma}$  = Tiempo de transito en la matriz de la roca.

#### **Registro de densidad:**

El registro de densidad responde a la densidad de electrones del material de la formación, que es proporcional a la densidad total, que a su vez es función de la densidad de la matriz y a la densidad de los fluidos en los poros. La Ecuación (11) expresa como la densidad puede ayudar a determinar la porosidad.

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (11)$$

Donde:

$\rho_b$  = Densidad leída en el registro.

$\rho_f$  = Densidad del líquido contenido en los poros.

$\rho_{ma}$  = Densidad en la matriz de la roca.

### **Registro Neutrónico:**

Responde principalmente a la presencia de átomos de hidrogeno, a si que si el espacio poroso de la formación se encuentra saturado de agua la respuesta del registro es una medición de la porosidad aparente. Sin embargo el registro responde a todo lo que contenga hidrogeno como el agua, la arcilla, el gas y el aceite. La concentración de hidrogeno en el gas es baja comparado con la del aceite o el agua; en las zonas arcillosas se presentan porosidades muy alta.

### **2.5.5 Comportamiento Mecánico ante la Variación de la Porosidad**

Las pruebas realizadas para evaluar el comportamiento mecánico de las rocas clásticas han demostrado que los parámetros de elasticidad y resistencia dependen principalmente de la porosidad y el contenido de cemento, aunque los detalles de estas dependencias son también en parte controlados por la composición mineral. El módulo de Young, la cohesión [21] y la resistencia confinada (UCS) disminuyen con el aumento de la porosidad, mientras que el coeficiente de Poisson es casi independiente [1], a su vez el ángulo de rozamiento disminuye con el aumento de volumen de vacíos.

Para diferentes autores [4] [6] [7] [9] [13] es claro que en rocas sedimentarias la porosidad y el UCS no poseen un comportamiento lineal sino que presenta una naturaleza hiperbólica (como el mostrado en la Ecuación 12), comportamiento que es similar para areniscas y rocas con contenido bajo o alto de arcilla de manera independiente, así que a mayor contenido de vacío en la rocas se presenta una disminución de la resistencia mecánica, la explicación física de esto es que la porosidad asiste a la creación y propagación de redes de estrés inducida por micro-fracturas, además el tamaño de poro es un factor importante que puede afectar la elasticidad y la resistencia de la roca con una porosidad constante [12], de hecho, a mayor tamaño de poro menor resistencia [14], este parámetro de

tamaño de poro está estrechamente relacionado con el tamaño de grano y la cementación, ya que de cierta forma los espacios entre contactos dependen del empaquetamiento del grano, angularidad y redondeo, pero también del proceso de diagénesis de la roca, el cual controla las características del cemento entre granos.

$$UCS = A_1 * \phi^{-B_1} \quad (12)$$

Donde  $\phi$  es la porosidad,  $B_1$  es una constante adimensional que define la tasa de pérdida de la resistencia con el aumento de la porosidad,  $A_1$  es el valor de la resistencia de la roca con una porosidad  $\phi$  igual a 1. Las constantes  $B_1$  y  $A_1$  son constantes que cambian con las propiedades físicas.

### **2.5.6 Mecanismos de correlaciones entre la saturación y las Propiedades Mecánicas.**

La interacción más crítica de la roca se presenta con los fluidos que contiene agua, y los problemas generados con otros fluidos base aceite son causa de la alteración entre este y el fluido preexistente en la roca. Hawkins y McConnell (1992) demostraron que el comportamiento mecánico de una roca saturada rica en arcilla es del 78% menor que si esta estuviera seca, también demostró que la reducción de la roca arenisca silícea disminuye solo en un 8% de su valor al estar seca. Por otra parte Vasarhelyi (2005) analizó estadísticamente los datos de la resistencia a la compresión no confinada y el módulo de elasticidad de 35 areniscas británicas en los estados seco y saturado, e indica que la pérdida de esas dos variables es cerca al 66% de su resistencia. Más tarde Is-ik Yilmaz (2009) demostró que el contenido de agua puede reducir drásticamente la resistencia hasta un 90% (esta disminución está estrechamente relacionada con la cantidad de arcilla y el tipo de arcilla presente en la formación).

De acuerdo con Engin y colaboradores [3] el agua puede suavizar e interactuar con las superficies minerales y alterar sus propiedades, también con la ayuda de la presión de agua intersticial causa inestabilidad a lo largo de planos de debilidad, a su vez puede disminuir la resistencia al corte por fricción o cambiar los componentes minerales de la arcilla de la roca, según lo publicado por Yilmaz [2]. A razón de estos inconvenientes diferentes autores como lo muestra Erguler y Ulusay [8] han medido la influencia del agua y proponen que la mejor relación entre UCS y módulo de Young con el contenido de agua es de disminución exponencial como lo mostrado en la Ecuación 13, nuevamente para cada roca el modelo debe ser calibrado con pruebas de laboratorio con el fin de simular un comportamiento representativo que se acople a las diferentes características de la roca.

$$UCS = A_2 * e^{-B_2 * S_w} \quad (13)$$

Donde  $S_w$  es la saturación de agua,  $B_2$  es una constante adimensional que define la tasa de pérdida de la resistencia con el aumento del contenido de agua,  $A_2$  es el valor de la resistencia de la roca cuando la saturación de agua  $S_w$  es cero. Las constantes  $B_2$  y  $A_2$  son constantes que cambian con las propiedades físicas, algunos autores como Erguler y Ulusay [8] trabajaron en determinar el comportamiento de las constantes en función de propiedades como la densidad seca, la porosidad y la absorción de agua de la roca, encontró que  $A_2$  y  $B_2$  aumenta exponencialmente con la densidad y disminuye exponencialmente con el aumento de la porosidad y de la absorción de agua.

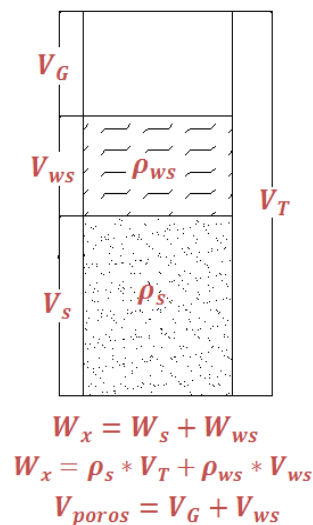
### **2.5.7 Densidad como una variable de correlación de las Propiedades Mecánicas.**

La densidad está estrechamente relacionada con el peso específico de los minerales contenidos en la roca y la cantidad de espacios vacíos ocupados. La

presencia de arcillas puede afectar en algunos casos los registros de densidad, aunque las propiedades de las arcillas varían con la formación y la ubicación de estas, las densidad típicas para capas y laminaciones arcillosas son de orden de 2.2 a 2.65 g/cc aunque tienden a ser menores a pocas profundidades donde las fuerzas de compactación no son tan grandes; para las arcillas diseminadas en los espacios porosos pueden tener una densidad algo menor que las capas de lutitas.

La porosidad efectiva aumenta a medida que disminuye la densidad seca y la relación entre estas dos propiedades es significativa, a sí mismo para una baja porosidad constante la variación de la densidad causa una desviación significativa en el UCS según Woehrl, B. y otros [4].

**Figura 9.** Comportamiento de la de Densidad ante el cambiión de la Porosidad



Fuente: Autor..

$$\rho_T = \rho_s - \phi * (\rho_s - \rho_{sw} * S_w) \quad (14)$$

$\rho_T$  = Densidad total de la roca.

$\rho_{sw}$  = Densidad del líquido contenido en los poros.

$\rho_s$  = Densidad en la matriz de la roca.

En la literatura se encuentran algunos trabajos realizados [4] para la predicción de UCS a través de la densidad, encontrando una relación exponencial creciente como la expresada en la Ecuación 15, pero existe una alta dispersión de los resultados obtenidos con estas expresiones y por tanto la densidad no es un parámetro muy usado en el modelamiento de la resistencia, sin embargo puede explicar algunos efectos de dispersión que se encuentran en diferentes correlaciones. A su vez los modelos de correlación exigen una calibración a los registros de densidad ya que al ser un registro de contacto puede tener errores en su lectura cuando se presenta derrumbes del “hueco”, para ellos es importante tener en cuenta el registro Caliper.

$$UCS = A_3 * e^{B_3 * \rho} \quad (15)$$

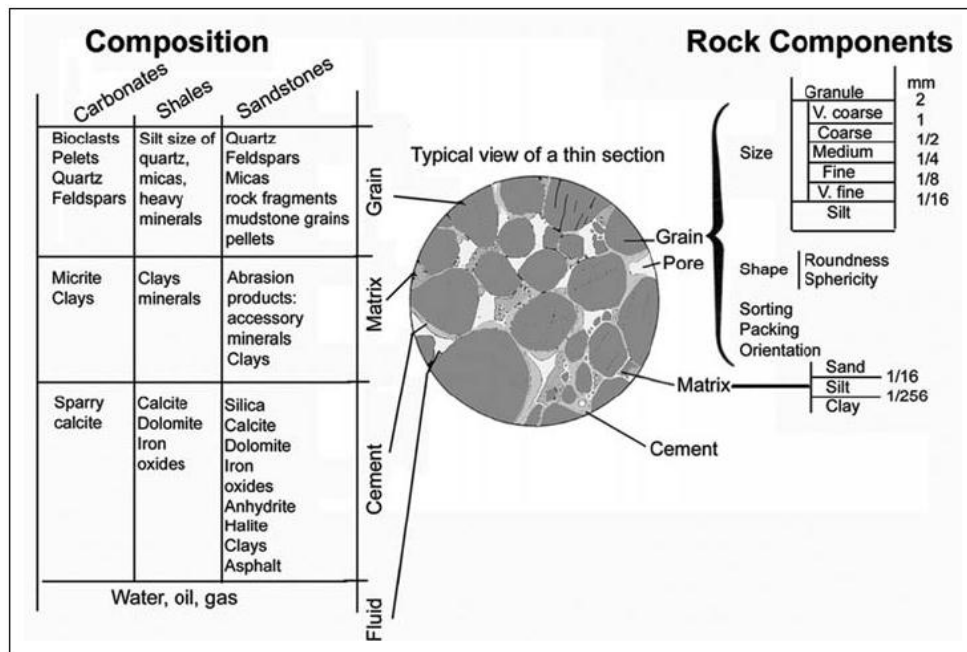
Donde  $\rho$  es la densidad,  $A_3$  y  $B_3$  son constantes,  $B_3$  es una constante adimensional que define la tasa de aumento de la resistencia con el aumento de la densidad.

## **2.6 EFECTOS DE LA MINERALOGÍA EN LA RESISTENCIA DE LA ROCA.**

Como se ha venido considerando en la literatura se plantea [1] [2] que la resistencia de la roca depende de su composición mineral, el tipo de consolidación, tamaño de grano, porosidad y grado de saturación teniendo este último un efecto importante en el UCS, ya que varios minerales responden en presencia del agua, en función de su estructura cristalina y composición química, es entonces importante conocer el mineral que conforma la roca y su respuesta a estímulos externos.

En la Figura 10 se presenta un esquema de la composición de la roca:

**Figura 10.** Composición De La Roca.



Fuente: Well Logging Handbook.

Dentro de las rocas sedimentarias las más abundantes son las areniscas constituidas esencialmente de cuarzo y feldespato, la dolomita compuesta de carbonato de calcio de magnesio  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  y, la caliza constituida por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), y aragonito. Las lutitas por su parte están constituidas de materiales arcillosos entre los que se encuentran los grupos de caolinita, illita, clorita y esméctica, también encontramos las evaporitas como la sal y sulfatos de calcio como la anhidrita y el yeso. Cada uno de estos minerales por sí mismos y por la abundancia y heterogeneidad encontrada en la roca proporcionan una resistencia de soporte que junto con la organización de sus granos proporciona características específicas a la roca.

El mineral de la cementación es una propiedad importante en la resistencia de la roca, minerales como el cuarzo proporcionan la unión más fuerte, seguidos de la calcita y materiales ferrosos, mientras que las arcillas son las uniones más débiles

de acuerdo con Engin y colaboradores [3]. El tipo de cementación y el grado de vinculación de los granos son los que determinan la resistencia mecánica de la roca, pero aun no se tiene una relación cuantitativa entre la cementación y el contenido de matriz con las propiedades mecánicas. Trabajos realizados por F.G. Bell y P. Lindsay [19] señalan que no existe una correlación estadísticamente aceptable entre el contenido de cuarzo y la resistencia a la Compresión Uniaxial, por el contrario como ya se menciono anteriormente las rocas que contienen arcilla tienen una mayor reducción de su resistencia, y se han podido establecer correlación para predecir su variabilidad de forma aceptable.

### **2.6.1 Areniscas**

La arenisca está conformada por tamaño de grano entre 0.01-1 mm, y el tamaño de los poros oscila en el mismo rango pero más pequeños. El cuarzo es el material predominante en la matriz mineral, el cemento puede ser de cuarzo, carbonato o minerales de arcilla, la anisotropía puede presentarse por variaciones estacionarias durante la deposición, alternando capas de granos gruesos y finos, también se puede presentar deposito de granos planos con su eje longitudinal paralelo a la otra, lo cual también contribuye a la anisotropía de la roca.

Según Dewhurst y sus colaboradores [20] la resistencia de la roca arenisca puede estar vinculada directamente a la compactación, es decir, las rocas se hacen más fuertes cuanto más profundo se encuentre, ya sea por mecanismos mecánicos o químicos. Por lo tanto, muchas de las técnicas que se utilizan para la estimación de la resistencia están relacionadas con la compactación y como los parámetros que caracterizan la compactación normalmente pueden ser leídos en registros, entonces es válido pensar que la resistencia se puede estimar apartar de registros, por lo que la estimación de resistencia de la roca depende de las mediciones de registros tales como la porosidad, densidad aparente, y la velocidad de la onda de compresión y cizallamiento.

La arenisca es débil cuando tiene una alta porosidad generada por que muchos de los contactos de los granos no se consolidaron, generando un comportamiento no lineal entre el esfuerzo aplicado y la deformación. Cabe mencionar que no es posible indicar un número que caracterice la fuerza o la rigidez de una arenisca típica, no existe arenisca típica.

Las pruebas de confinamiento generalmente muestran el comportamiento tensión deformación de forma no lineal durante la carga inicial, esta no linealidad es atribuida a micro-fisuras pre-existente en el núcleo. Para areniscas con alta porosidad se presenta un reordenamiento del grano y colapso de la estructura de poros por la reorganización de los mismos. Cuando una arenisca empieza a ceder a la presión de confinamiento se dilata existiendo una transición frágil-dúctil. También se muestran una fuerte correlación lineal entre el modulo de Young y la resistencia de la roca, aunque se encuentran dispersiones significativas.

El módulo de Young proporciona la mejor estimación para la resistencia de la roca cuando se trata de rocas elásticas con grandes diferencias en el contenido de arcilla y la porosidad. Esto se debe al hecho de que el módulo de Young es una medida de la matriz de la roca que realmente soporta la carga y se correlaciona con la geometría y el número medio de granos y de contactos entre ellos, esto de acuerdo con el trabajo publicado por Odunlami y otros [24].

A continuación se presenta algunas expresiones en las que se muestran algunas relaciones empíricas que se han desarrollado para areniscas:

**Tabla 1.** Relaciones entre UCS y el tiempo de transito Dt. Para areniscas.

Referencia	Ecuación Dt [ $\mu$ s/ft] , UCS [psi]	Comentario
Dt-McNally (McNally, 1987)	$UCS = 185213e^{-0.037Dt}$	Areniscas de baja o media porosidad. $65 < Dt < 100$ , $UCS > 3000$ permo-Triassic age SE Australia.

Referencia	Ecuación Dt [ $\mu\text{s}/\text{ft}$ ], UCS [psi]	Comentario
Dt-McNally (Modificado McNally) 1987	$\text{UCS} = 838825e^{-0.057D_t}$	Ecuación modificada McNally de areniscas no consolidadas y de alta porosidad con UCS menos que 3000 psi.
Dt-Rahma et al (2008)	$\text{UCS} = 40847e^{-0.0268D_t}$	Areniscas terciarias, en el campo de gas costa afuera, el sur de Asia.
Dt-FORMEL (Raaen et al 1996)	$\text{UCS} = 145(140 - 2,1D_t + 0.0083D_t^2)$	$90 < D_t < 140 \mu\text{s}/\text{ft}$
Dt Cubed-Sand (Chang et al 2006)	$\text{UCS} = 2.05 \times 10^9 D_t^{-3}$	Golfo de México, rocas débiles y no consolidadas
Dt-Freyburg (Freyburg, 1972)	$\text{UCS} = \frac{1.55 \times 10^6}{D_t} - 4567.5$	Consolidado Turingia arenisca, Alemania.
Dt-Rahman et al. 2010	$\text{UCS} = 40847e^{-0.0268D_t}$	Arenisca terciaria, el campo de gas costa afuera. Asia del Sur

Fuente. [6] [9] [11] [24].

También se encuentran correlaciones entre UCS y densidad, pero no es una correlación que se use demasiado y se encuentre con frecuencia en la bibliografía.

**Tabla 2.** Correlaciones entre UCS,  $V_p$ , y  $\rho$ . Para areniscas.

Referencia	Ecuación $V_p$ [Km/seg], UCS[psi], $\rho$ [g/cc]	Comentario
$\rho - V_p$ Moos et al. (1999)	$\text{UCS} = 254.3943\rho V_p^2 - 3045.769$	Arenisca gruesa y conglomerada. Cook Inlet. Alaska.
$\rho - V_p$ [9]	$\text{UCS} = 6106.087e^{0.019\rho V_p^2}$	Arena consolidada con $0.05 < \phi < 0.12$ y UCS > 11603 Psi

Referencia	Ecuación $V_p$ [Km/seg], UCS[psi], $\rho$ [g/cc]	Comentario
$\rho - V_p$ Chang et al. (2006)	$UCS = 561.3e^{0.114\rho V_p^2}$	Golfo de México.

Fuente. [6] [9] [11] [24].

Se debe tener en cuenta que:

$$v_p [Km/seg] = \frac{304.8}{D_t [\mu s/ft]} \quad (16)$$

**Tabla 3.** Correlaciones entre UCS y porosidad  $\phi$ . Para areniscas.

Referencia	Ecuación $\phi$ [%], UCS [psi]	Comentario
$\phi$ -Vernik et al (1993)	$UCS = 36830(1 - 2.3\phi)^2$	Areniscas consolidadas con $\phi < 0.3$
$\phi$ - Sarda et al (1993)	$UCS = 16172e^{-11.6\phi}$	Reservorio Germigny sous Coulombs con $\phi > 0.35$
$\phi$ - Sarda (Sarda et al 1993)	$UCS = 37410e^{-9.0\phi}$	Reservorio Germigny sous Coulombs con $\phi < 0.35$
$\phi$ - Sarda (Sarda et al 1993)	$UCS = 51765e^{-10.8\phi}$	Reservorio Germigny sous Coulombs con $0 < \phi < 0.07$
$\phi$ -FORMEL (Raaen et al 1996)	$UCS = 145(43 - 140\phi + 63\phi^2)$	$0.2 < \phi < 0.35$
$\phi$ (Chang et al 2006)	$UCS = 40165e^{-10\phi}$	$300 < UCS < 52000$ psi y $\phi < 0.33$

Referencia	Ecuación $\phi$ [%] , UCS [psi]	Comentario
$\phi$ Travis Peak [24]	$UCS = 4697\phi^{-0.466}$	$0.01 < \phi < 0.18$
$\phi$ ( Edlmann. 1998 )	$UCS = 145(129.54 - 3.225\phi)$	Arenisca, Mar Del Norte
$\phi$ ( Farquhar 1994 )	$UCS = 30171.6e^{-0.074\phi}$	Arenisca, Mar Del Norte

Fuente. [6] [9] [11] [24].

Otra correlación que debe tenerse en cuenta es la variación de la roca al contenido de arcilla  $V_{clay}$  y porosidad  $\phi$ :

**Tabla 4.** Correlaciones entre UCS, contenido de arcilla y porosidad  $\phi$ . Para areniscas.

Referencia	Ecuación $\phi$ [%] , UCS [psi], $V_{clay}$	Comentario
$\phi - V_{clay}$ Vernik (1993)	$UCS = 145(254 - 204V_{clay}) * (1 - 2.7\phi)^2$	Modificación de la ecuación de Vernik para areniscas arcillosas con $\phi < 0.3$

Fuente. [6] [9] [11] [24].

A continuación también se plantean algunas tablas en la que se muestran relaciones empíricas que se han desarrollado para Carbonatos, relaciones con la porosidad  $\phi$  y el UCS.

**Tabla 5.** Correlaciones entre UCS y porosidad  $\phi$ . Para Carbonatos.

Referencia	Ecuación $\phi$ [%] , UCS [psi]	Comentario
$\phi$ - Farquhar et al 1994)	$UCS = 25346e^{-0.093\phi}$	Carbonato, Mar Del Norte
$\phi$ Rzhovsky y Novick 1971	$UCS = 40020(1 - 3\phi)^2$	Deposito Korobcheyev, Rusia

Referencia	Ecuación $\phi$ [%], UCS [psi]	Comentario
$\phi$ (Chang et al 2006)	$UCS = 19705.5e^{-4.8\phi}$	$1450 < UCS < 43500$ psi y $0.05 < \phi < 0.2$
$\phi$ (Chang et al 2006)	$UCS = 20851e^{-6.95\phi}$	$4350 < UCS < 21750$ psi y $0.05 < \phi < 0.2$ , Medio Oriente

Fuente. [6] [9] [11] [24].

También se encuentran correlaciones entre UCS y  $D_t$ .

**Tabla 6.** Correlaciones entre UCS y tiempo de transito (DT). Para Carbonatos.

Referencia	Ecuación $D_t$ [ $\mu$ s/ft], UCS [psi]	Comentario
$\phi$ Golubev y Rabinovic (1976)	$UCS = 10^{-2.44 + \frac{109.14}{D_t}}$	Dolomitas
$\phi$ Militzer y Stoll (1973)	$UCS = \left(\frac{7682}{D_t}\right)^{1.82}$	Dolomitas

Estas correlaciones fueron extraídas de [6] [9] [11] [24].

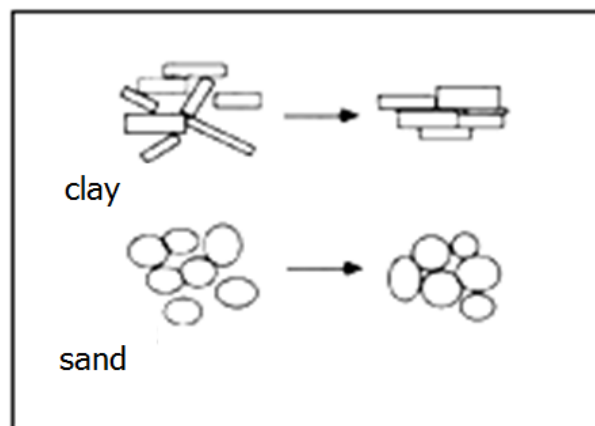
Fuente. [6] [9] [11] [24].

### 2.6.2 Lutitas

Se define lutita a una roca con contenido de arcilla por encima de 40%. Desde el punto de vista mecánico el contenido de arcilla constituye un marco de soporte. Es una roca anisotrópica ya que debido a los planos de debilidad presentes en las lutitas se puede decir que el mismo se divide fácilmente. Debido al alto contenido de arcilla el tamaño de los poros es muy pequeño entre 5 y 25  $\mu$ m, aunque presenten alta porosidad, además los minerales arcillosos contienen estructuralmente agua vinculada, esto implica una dificultad mayor en el momento de medir sus propiedades.

Las dos características más importantes de las lutitas según Horsud y otros [23] son la baja permeabilidad y la sensibilidad al ponerse en contacto con fluidos. Son materiales que tienen un alto contenido inicial de agua asociados a ellos, debido en gran parte a su tamaño de grano pequeño y de forma asimétrica (estructuras laminares) que aumentan su superficie relativa, y como consecuencia una gran cantidad de agua absorbida por su gran superficie. La pérdida de esta agua es importante para los mecanismos de compresión y compactación, tal como lo describe Alm [17]. La comparación de los granos de arena (esencialmente esférica) y la compactación de arcilla se visualiza en la Figura 11.

**Figura 11.** Compactación de los granos de arena y arcillas.



Fuente: B. Velde. Compaction Trends Of Clay-Rich Deep Sea Sediments. 1996. Pág.7

Las lutitas pueden contener diversas cantidades de arcilla, minerales no arcillosos, materia orgánica y algunas sales. Los minerales que conforman las arcillas constituyen el factor principal que controla las propiedades físicas y químicas de la roca. Algunos minerales arcillosos como talco, mica, clorita o esmectita se presentan en tamaños particularmente pequeños y sus cristales normalmente tienen carga residual negativa que se compensa con la adsorción de los cationes de la solución de acuerdo con Engin y sus colaboradores [3]. El tipo de minerales

de la arcilla y la disponibilidad de cationes afectan profundamente a las propiedades de las rocas arcillosas como el Hinchamiento según Velde [18].

### **Hinchamiento**

La capacidad de expansión de la arcilla se expresa mejor como presión de hinchamiento y depende de los diferentes minerales de la arcilla presentes en la roca, la esmectita (o mormorillonita) tiene la mayor capacidad de hinchamientos seguida de la illita luego la halloysita y por último la caolinita pero a su vez pueden existir alguna otros minerales en la arcilla que modifiquen el grado de hinchamiento. La presión de hinchamiento es también fuertemente dependiente del grado de saturación y la salinidad del agua, tal como lo mostro Velde [18].

Según Manohar Lal [21] se pueden presentar dos tipos de hinchamiento, el intercrystalizado el cual es causado por la hidratación de los cationes intercambiables de la arcilla seca, y le hinchamiento osmótica causada por la gran diferencia en las concentraciones iónicas cerca de la superficie de la arcilla y el agua de los poros.

### **Anisotropía de la arcilla**

En cuanto más profundas se encuentren las lutitas los planos de arcilla se comprimen y se alinean a medida que aumenta la sobrecarga, a su vez la porosidad disminuye y cuanto mayor es el contenido de arcilla mayor será el grado de anisotropía de la roca, dicho de otra forma, la anisotropía aumenta con la profundidad y la disminución de la porosidad. Otro parámetro que puede incrementa la anisotropía es el contenido, distribución y tipo de mineral; cabe añadir que la arcillas transversalmente puede considerarse isotrópico.

## **Influencia mineralógica de las Arcillas.**

El impacto de la mineralogía de las arcillas en la resistencia que éstas puedan llegar a ofrecer, es de gran importancia durante la perforación ya que cuando las lutitas están en contacto con algún fluido extranjero puede sufrir alteraciones. Entre algunos de los minerales encontramos la caolinita, la illita, la clorita y la esmectita (o montmorillonita). La caolinita es principalmente responsable de la migración de finos asociados con algunos reservorios, la illita aumenta la tortuosidad de los poros (obturamiento de gargantas de poro), normalmente se desarrolla en las areniscas creando granos volumétricos de microporosidad, la clorita puede causar la precipitación de compuestos secundarios de hierro cuando son expuestos a tratamientos ácidos, y la esmectita (o montmorillonita) tiene la mejor afinidad y absorción con el agua seguido de la illita y la caolinita, a su vez la capacidad de hinchamiento está relacionada con la misma afinidad de absorción, de esta forma la esmectita es altamente susceptible a los efectos de interacción con los fluidos, a si que la invasión de los fluidos no solo reduce la fricción y bloqueo de los granos si no que también puede reducir la resistencia de los granos que conforman la roca.

Otro parámetro importante a revisar es la permeabilidad de la arcillas, ésta es tan baja que se considera cero para propósitos prácticos, sin embargo no es cierto, por ejemplo, para Horsrud [22] la baja permeabilidad de la arcilla puede ser una característica contributiva importante para explicar el proceso demorado de fracaso de la roca, de hecho Horsrud en su estudio menciona que debido a que las pruebas a las lutitas requieren una presión de poro, las pruebas de compresión uniaxial para la determinación del UCS no pueden ser utilizadas, así que utiliza varias pruebas a diferentes presiones de confinamiento para interpretar los parámetros de falla.

La velocidad de onda P parece ser un parámetro importante en las correlaciones encontradas [21] [22], UCS aumenta de forma exponencial con el aumento de  $V_p$ ,

sin embargo se menciona que la  $V_p$  en lutitas de alta porosidad no varía significativamente con el nivel de estrés, pero si se presenta variaciones significativas en lutitas de porosidad baja. Nuevamente Horsrud [22] menciona que la porosidad puede ser utilizada como una buena estimativa para predecir el UCS ya que a su vez se encuentran buenos ajustes entre la porosidad y  $V_p$  hallados en laboratorio.

En la siguiente tabla se muestran algunas correlaciones encontradas en la literatura:

**Tabla 7.** Correlaciones entre UCS y velocidad de onda P ( $V_p$ ) para limolitas.

Referencia	Ecuación $V_p$ [Km/seg] , UCS [psi]	Comentario
$V_p$ -Horsrud (Horsrud, 2001)	$UCS = 111.65V_p^{2.93}$	Alta porosidad, arcillas del mar del Norte
$V_p$ -GOM (Chang et al 2006)	$UCS = 62.35V_p^{3.2}$	Plioceno y arcillas jóvenes
$V_p$ -Global (Chang et al 2006)	$UCS = 195.75V_p^{2.6}$	Es aplicable a escala mundial.
$V_p$ -Cubed-Shale (Chang et al 2006)	$UCS = 72.5V_p^3$	Golfo de México
$V_p$ Lal (Lal 1999)	$UCS = 1450(V_p - 1)$	Alta porosidad, arcilla terciaria

Fuente. [6] [9] [24].

Relación entre porosidad  $\phi$  y UCS:

**Tabla 8.** Correlaciones entre UCS y porosidad  $\phi$ . Para limolitas.

Referencia	Ecuación $\phi$ [%] , UCS [psi]	Comentario
$\phi$ - L&D (Lashkaripour and Dusseault, 1993)	$UCS = 21044.97\phi^{-1.143}$	Arcillas compacta $\phi < 0.1$
$\phi$ -Horsrud (Horsrud, 2001)	$UCS = 61597.51\phi^{-0.96}$	Alta porosidad del mar del Norte Arcilla Terciaria
$\phi$ -Literature1 (Chang et al 2006)	$UCS = 6014.71342\phi^{-1.762}$	Arcilla con porosidad $\phi > 0.27$

Fuente. [6] [9] [24].

También se ha encontrado relación entra la densidad  $\rho_b$  y el UCS:

**Tabla 9.** Correlaciones entre UCS y densidad  $\rho_b$ . Para limolitas.

Referencia	Ecuación $\rho_b$ [Kg/m <sup>3</sup> ] , UCS [psi]	Comentario
$\rho_b$ -Rhub-Shales 2009	$UCS = 0.0123e^{4.89\rho_b}$	Densidad $\rho_b < 2.4$ Kg/m <sup>3</sup>

Fuente. [6] [9] [11].

Algunas otras tendencias encontradas como las presentadas por Dewhurst y otros [20] relacionan el módulo de Young y UCS de forma lineales, la resistencia a la compresión es de 10 a 15 veces mayor que la resistencia a la tracción. Ahora de acuerdo con Manohar [21] el contenido de arcilla afecta a su vez la cohesión de la roca, este autor muestra en su trabajo que el valor de la cohesión disminuye con el aumento de arcilla de forma exponencial, esta tendencia también puede observarse en el trabajo de Horsrud [22].

### 2.6.3 Evaluación mineralógica de la arcillas por medio de registros.

Los registros de rayos gama GR miden la radiación natural de la formación y sobre todo funcionan como un registro de litología que ayuda a diferenciar de alta a baja radiactividad, de este modo se puede distinguir junto con otros registros las areniscas, carbonatos y anhidritas entre otras; arenisca y carbonatados tiene concentración bajas de material radiactivo mientras que la presencia de arcillas aumenta el valor de los registros GR; en una escala descendiente entre la respuesta más alta de los registros de rayos gama y la más baja se encuentran las lutitas, arenas lutítica, dolomitas, calizas, anhidrita, sal, yeso, carbón y granito; Cabe añadir que se debe tener cuidado con las areniscas que contiene feldespato potásico ya que presentan niveles de radioactividad natural en muchos casos similar y aun mayor que las arcillas.

Los registros de rayos gama GR pueden ser utilizados para el cálculo del volumen de arcilla expresada como fracción decimal denominado  $V_{sh}$ , el primer paso para su determinación es hallando el índice de rayos gama  $I_{GR}$  que se muestra en la Ecuación 17.

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (17)$$

Donde  $GR_{min}$  es el valor de rayos gama obtenido de una arena limpia o carbonato, el  $GR_{max}$  es el valor máximo de rayos gamas perteneciente a una arcilla y,  $GR_{log}$  es el valor leído del registro. Para una relación lineal el  $V_{sh}$  puede resultar siendo igual a  $I_{GR}$ , pero se tiene algunas otras relaciones no lineales como las mostradas en las Ecuaciones 18, 19 y 20:

#### Larionov (1969)

$$V_{sh} = 0,083 * (2^{3*I_{GR}} - 1) \quad (18)$$

**Steiber(1970)**

$$V_{sh} = \frac{I_{GR}}{3 - 2 * I_{GR}} \quad (19)$$

**Clavier (1971)**

$$V_{sh} = 1.7 - (3.38 - (I_{GR} - 0.7)^2)^{0,5} \quad (20)$$

Cada uno de los elementos radioactivos presentes en la arcilla emiten rayos gama con niveles energía característica del elemento. Las herramientas espectrometrías de registros clasifica los rayos natural en ventanas de energía, de ese modo se puede identificar y cuantificar los tres elementos radioactivos principales presentes en la formación como el torio TH, el uranio U y le potasio K. Los diferentes minerales de arcilla se caracterizan por un valor determinado de relación Th/K a traves de estas relaciones se pueden estimar y clasificar porcentajes de abundancia de cada uno de los minerales de la arcilla.

### 3. MUESTREO REALIZADO

#### 3.1 GENERALIDADES DE LA FORMACIÓN LITOLÓGICA DE VALIDACIÓN

La formación Los Cuervo se encuentra entre las formaciones Mirador y Barcos como se observa en la Figura 12, corresponde al periodo paleógeno y época paleocena, dentro de la revisión previa que se realizó se pudo observar que la formación Los Cuervos cuenta con una descripción litológica de: arcillolitas negras, grises, verdosas y amarillas con delgadas intercalaciones de arenisca gris verdosa o amarillenta, de granos medios, micáceas, con matriz arcillosa.

Figura 12. Columna Estratigráfica de la formación Los Cuervos



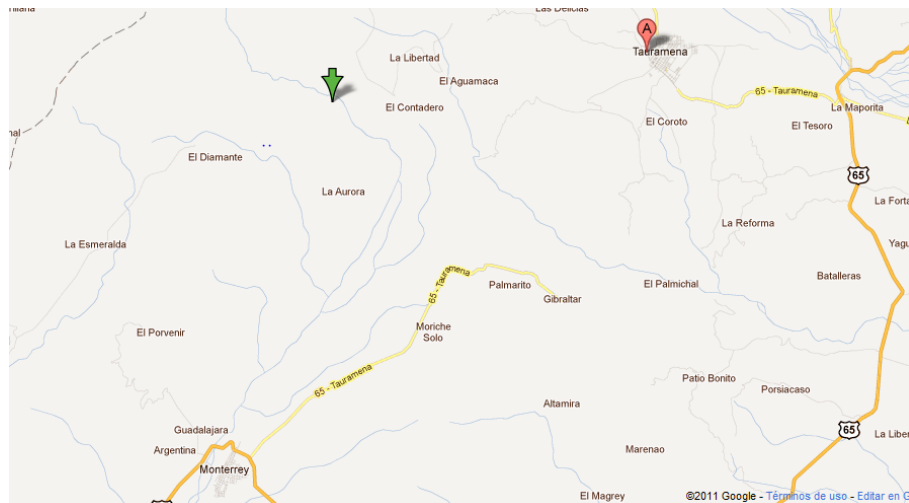
Fuente: LT. Geoperforaciones y Minerías Ltda.

El sitio de muestreo donde aflora la formación Los Cuervos se escoge bajo la información de la Litoteca Nacional Ingeomebientes Ltda. El área de trabajo se encuentra localizada al suroriente del Departamento de Boyacá y al occidente del Departamento de Casanare, entre los municipios de San Luis de Gaceno, Sabanalarga, Monterrey y Yopal, sobre las estribaciones de la cordillera oriental.

Dentro el punto de vista geológico está ubicado en la cuenca del Piedemonte Llanero limitada al oriente por la cuenca de los llanos y al occidente por la cuenca oriental

### 3.2 SITIO DE MUESTREO

**Imagen 1.** Localización en mapa del sitio de muestro donde aflora la formaciones Los Cuervos.



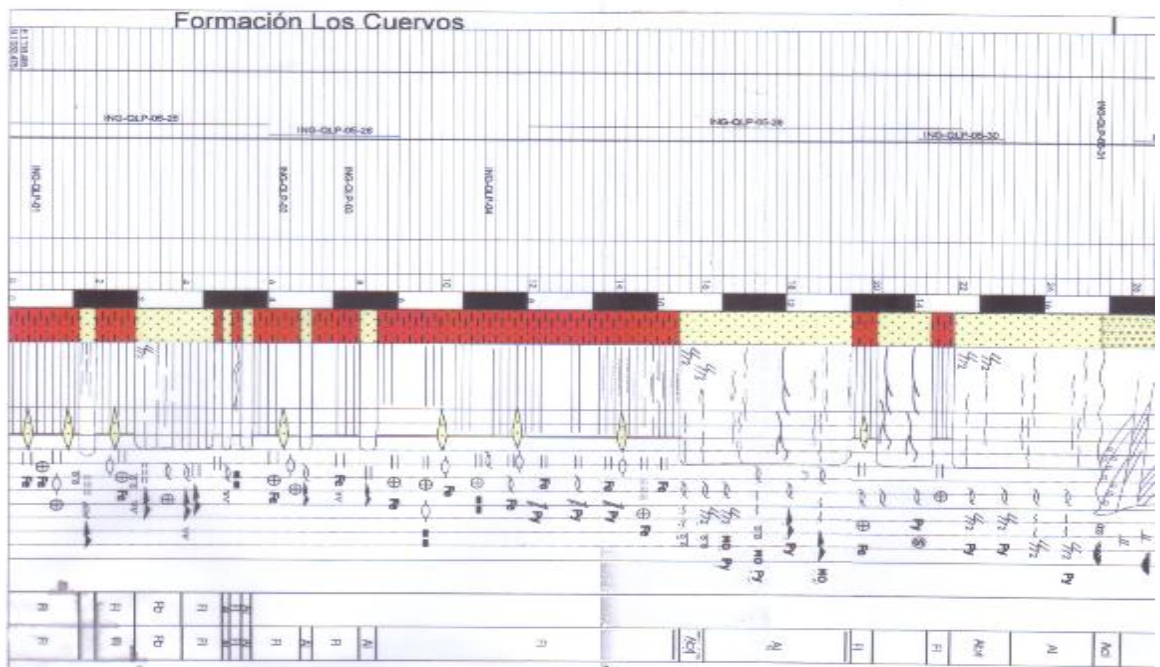
Fuente: <http://maps.google.com/maps>

El sitio de muestro es llamado sección “Quebrada La Piñalerita” se localiza al norte de municipio de Sabanalarga y se llega por la vía que va hacia la verdes Planadas; a dos kilómetros doscientos metros (2.2Km) sobre este trayecto se desvía hacia el noroccidente un kilómetro doscientos metros (1,2Km) hasta buscar

un puente peatonal sobre la quebrada La Piñalerita, desde donde se continua caminado dos kilómetros (2 km) hasta el primer punto de muestreo.

La parte inferior de Cuervos son limolitas arcillosas silíceas color gris medio a gris verdoso en capas muy gruesas con laminaciones plana paralela continua, lenticular y ocasionalmente convolada, con intraclastos arenosos, clastos de carga, nódulos calcareos, trazas de material orgánico y ocasionalmente oxido de hierro. La parte superior son capas tubulares gruesas a gruesas de cuarzo-areniscas de grano fino, color gris claro, granos redondeados, buena selección, con laminación irregular y flasser. En la Figura 13 se presenta la Sección Quebrada La Piñalerita.

**Figura 13.** Sección Quebrada la Piñalerita



Fuente: Ingeoambiente Ltda. Caracterización De Fracturas De Las Formaciones, Guadalupe, Barcos Y Mirador En Cercanías Al Campo Cupiaga.

Dentro de la obtención de las muestras solo fue posible extraer dos litologías, las limolitas y la arcillitas, la arenisca de Cuervos no se extrajo, esto debido a las condiciones topográficas y climáticas de la zona.

**Imagen 2.** Sitio de muestreo lutita (Lutita 1)



Fuente: Autor.

**Imagen 3.** Muestra de lutita (Lutita 1)



Fuente: Autor

**Imagen 4.** Sitio de muestreo lutita (Lutita 2)



Fuente: Autor.

**Imagen 5.** Muestra de lutita (Lutita 2)



Fuente: Autor

## **4. TRABAJO DE LA LABORATORIO**

Según los antecedentes la anisotropía de las lutitas está estrechamente relacionada con los espacios estrechos de poros y áreas específicas de superficie muy grandes cargadas negativamente, debido a esto y a los ambientes y procesos de depositación los buenos resultados de pruebas de laboratorio son escasos y tienen que ser analizados según los procedimientos tomados en la extracción de la muestra y procedimientos de laboratorio. De esta forma Horsrud y sus colaboradores [23] mencionan en su trabajo que algunas muestras de lutitas recuperadas de profundidades para su análisis mecánico añaden complejidad a su análisis debido al proceso de extracción ya que se encuentran sometidas a descargas de presiones y temperaturas alterando así sus propiedades, y generando hinchamiento, creando micro-fisuras y disminución de la saturación. Horsrud también menciona que otro parámetro importante a tener en cuenta es la interacción con el fluido de perforación que está en contacto con las lutitas y pueden genera una interacción a través de un gradiente hidráulico, un gradiente potencial químico y un gradiente de temperatura. Cabe añadir que otros trabajos de investigadores han utilizado muestras de afloramiento para poder caracterizar las lutitas.

### **4.1 EXTRACCIÓN DE LOS PLUG**

Se entiende como PLUG o tapón a las secciones de roca de geometría convencional cilíndricas que se extrae de la roca de afloramiento o del corazón de pozo para pruebas destructivas en laboratorio, y de esta manera obtener el comportamiento mecánico representativo de la formación.

Para la realización de las correlaciones es necesaria la extracción de tapones o PLUG de cada litología, los cuales deben cumplir unas condiciones de geometría, se debe obtener un cilindro regular el cual el diámetro corresponda a la mitad de la

longitud. Para este proceso se usa un taladro árbol como el mostrado en la Imagen 6.

El taladro consta de un conducto para el suministro de un fluido que pueda enfriar la broca evitando sobrecalentamiento y daños en el contacto broca roca; a su vez un regulador de rata de penetración desde automática hasta modo manual y, el control de las revoluciones de la broca para manejo de las diferentes litológicas.

**Imagen 6.** Taladro de tipo árbol usado en la extracción de los PLUG.



Fuente: Autor.

De las dos Lutitas extraídas se observó que el material mineral de las muestras era sensible al contacto con aceite y de mayor afectación al contacto con el agua, eso ocasionaba un problema ya que era necesario evitar el calentamiento de la broca, de esta manera se sugiere enfriar la broca con aire a presión con el riesgo de daños tanto para la muestra como a la broca.

**Imagen 7.** Montaje de la lutita en la mesa del taladro para la extracción de los PLUG.  
(Lutita 1)



Fuente: Autor.

**Imagen 8.** Montaje de la lutita en la mesa del taladro para la extracción de los PLUG.  
(Lutita 2)



Fuente: Autor.

Pruebas siguientes mostraron que la roca poseía múltiples planos de debilidad y laminaciones que dificultaban la extracción, además una evidente heterogeneidad, de esta forma la obtención de los PLUG dependía mucho de la repetitividad del montaje broca/roca y poder encontrar las zonas por donde no pasaran fallas. Imagen 7 y 9.

El proceso sugerido por la *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) es que el diámetro de una muestra preparada para el ensayo de compresión debe ser por lo menos 50 veces el diámetro del grano más grande de la roca; se toma la opción de extraer PLUG de una pulgada de diámetro, esto es válido ya que el material granular que conforma la roca es arcilla y sus granos obedecen al tamaño de la partícula de arcilla cerca 2 micras.

**Imagen 9.** Detalle de los planos de debilidad y laminaciones que presentaron las muestras en el proceso de extracción con el taladro.



Fuente: Autor.

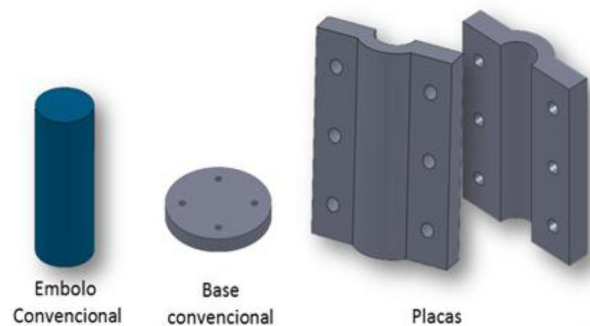
La extracción se realizó con una tasa de penetración lenta, manejo manual, con una rotación de la broca entre 460 a 900 Rev/seg para poder realizar un limado perimetral sin que la roca sufriera ruptura por vibración o sobre esfuerzo. De los intentos obtenidos fue posible extraer 8 muestras candidatas de la Lutita 2 y tan solo 5 muestras de Lutita 1 esta última fue la roca que más problemas presentó, gran parte de ellos debido a los planos de debilidad que se observa en la Imagen 9. En el proceso de corte y pulido se pierden algunas especímenes.

El número reducido de especímenes candidatos implica una alta probabilidad de error en los resultados, ya que dentro del diseño experimental inicialmente propuesto era necesario al menos 60 especímenes o PLUG candidatos para cada litología. Como solución a este inconveniente fue necesario buscar una alternativa que permitiera generar la roca y controlar de cierta manera propiedades petrofísicas.

#### **4.2 CELDA DE COMPACTACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE PLUGS SINTÉTICOS.**

Debido a que no fue posible la extracción de suficientes muestras se ve la necesidad de utilizar la celda de compresión diseñada y generada en un proyecto anterior en el Laboratorio de Mecánica de Rocas; este consta de seis piezas elaboradas en acero inoxidable 304 como se observa en la Figura 14; consiste en dos placas ensambladas y ajustadas a través de tornillos que unidas permiten obtener un cilindro regular de 38,1mm de diámetros, y un embolo encargado mediante el desplazamiento de compactar el materia que se encuentra confinado entre las dos placa.

**Figura 14.** Representa un Esquema de la celda de Compactación.



Fuente: ESPINOSA. JUNA PABLO. Desarrollo de un método de análisis para evaluación de lodos de perforación en formaciones arcillosas a través de la prueba de cilindro de pared gruesa. 2011. Pág 86.

Para el proceso de compactación de los PLUG sintéticos fue necesario el triturado del mineral restantes del procesos de extracción, posteriormente se paso por un tamiz pasa 25 para obtener así una homogeneidad para todas las consolidaciones. En la Imagen 10 se puede observar la Celda de Carga armada y lista para consolidar.

**Imagen 10.** Celda de Carga de consolidación armada.



Fuente: Autor.

#### **4.2.1 Procesos de preparado de la celda de carga.**

- ✓ El proceso inicial de consolidación consta del armado de la celda, esta debe ser ensamblada siempre de la misma manera para evitar desajustes en las placas que puedan dañar la cilíndricidad del espécimen a compactar o inclusive deformar las placas cuando el embolo comience a desplazarse.
- ✓ Se adiciona de 20 gramos de material triturado compactado manualmente con un elemento cilíndrico y de menor diámetro a una duración de 2 minutos, repitiendo este proceso hasta suministrar el contenido en gramos deseado que para este evento fueron entre 260 a 230 gramos según las propiedades que se deseaban contralar; se decida también añadir un porcentaje de salmuera o agua al material antes de consolidar.
- ✓ Posteriormente se medía la longitud restante saliente del embolo el cual daba aproximaciones de la longitud inicial de la muestras antes de compactarse.
- ✓ Por último se ingresaba la celda a la máquina de compresión MÁQUINA DE ROCAS MTS 815, se añadía al software las condiciones de consolidaciones deseada, si era por fuerza la máquina se desplazaba hasta que pudiera encontrar la resistencia equivalente al dato ingreso sin importar el desplazamiento, caso contrario si se condicionaba para que esta fuera por desplazamiento, la maquina desplazaba sin importar la fuerza que tuviera que alcanzar.

El proceso de consolidación es diferente para cada mineral en particular, en el caso de la muestra de la “Lutita 1” escogida para compactar, se relazaron ensayos iniciales para caracterizar el comportamiento de ésta, y las condiciones mínimas de carga, este procesos lleva semanas mientras se encuentran las condiciones adecuadas.

Para evitar alteraciones del mineral arcilloso debido a que este es sensible a los fluidos se decide agregar salmuera (30000ppm salinidad promedio de mar) al material antes de consolidar, de esta forma se evitaba el hinchamiento por efecto de la interacción agua-arcillas.

#### **4.2.2 limitantes en el proceso de compactación.**

En el transcurso de proceso de estudio fue necesario modificar el diseño experimental a medida que se encontraban las limitantes en el proceso de compactación con la celda, de esta manera se realizaron pruebas pilotos inicialmente para conocer de que manera y a qué condiciones era posible variar la propiedades petrofísicas y mecánicas de la roca.

Dentro de las limitantes se encontraron:

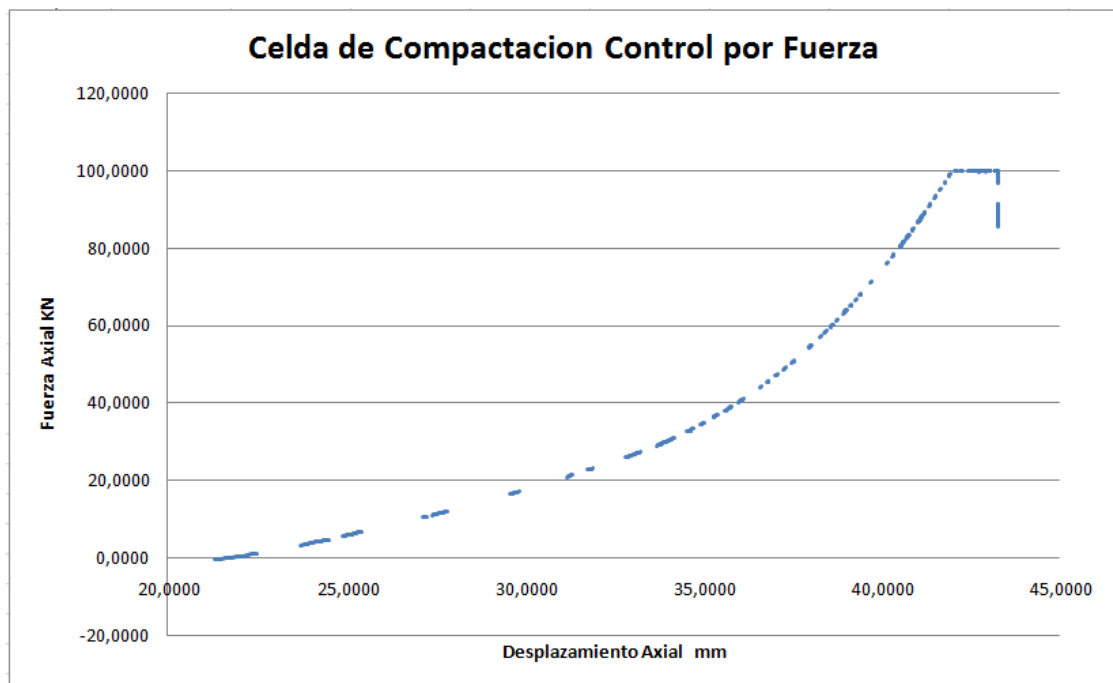
- ✓ La carga máxima de consolidación que debe ser aplicada para que sea posible obtener una roca, se encuentra por encima de 100kN, a esta carga es posible consolidar una roca seca con algunas dificultades en el procesos de pulido, sin embargo a medida que es añadida agua o salmuera a la muestras, el proceso de compactación mejora y la porosidad decrece, esto debido a la afinidad de la arcilla con la roca.
- ✓ Por encima de 100kN la celda de carga empezaba a presentar leves deformaciones que podría en el mejor de los casos tan solo dañar la cilindridad de la celda dificultando la extracción y compactación de los especímenes. Se debía tener cuidado con no incrementar la carga, solo en los casos en que fue necesario porosidades mínimas se aplican cargas más altas, hasta 120kN.
- ✓ La roca compactada presentaba un problema en el grado de consolidaciones, eso puede entenderse en proporción con el

desplazamiento del “embolo”; el material que se encontraba en contacto con el embolo presentaba mayor consolidaciones ya este se desplazaba con la maquina, mientras que la parte opuesta queda menos compacta por encontrarse estática, de esta manera no era posible señalar que la roca era totalmente homogeniza. Este problema pudo solucionarse consolidando las muestras por ambos lados.

#### 4.2.3 Carga De Consolidación Y Control De Propiedades Petrofísicas

En la Figura 15 se muestra uno de los procesos de carga por fuerza con una duración de 8 horas.

**Figura 15.** Procesos de Consolidaciones de la Celda de Carga controlada por Fuerza.



Fuente: Autor.

Es posible controlar la compactaciones por desplazamiento y por fuerza, inicialmente se compacto por un periodo de 2 horas, tiempo en el cual se sabia

que la roca se mantenía estable, luego se realizaron otros ensayos con un periodo de 8 horas con la misma tasa de ascenso por fuerza para conocer si era posible disminuir la porosidad, sin embargo no se obtuvieron resultados satisfactorios, la roca no presentaba cambios significativos. Caso contrario cuando el control era por desplazamiento el cuidado a tener en el momento que la máquina necesitara aumentar por encima de 100kN la fuerza para poder desplazarse, y eso ocasionaría un riesgo de daño en la celda.

**Imagen 11.** Extracción de la muestra saturada, consolidada con la Celda de Carga.

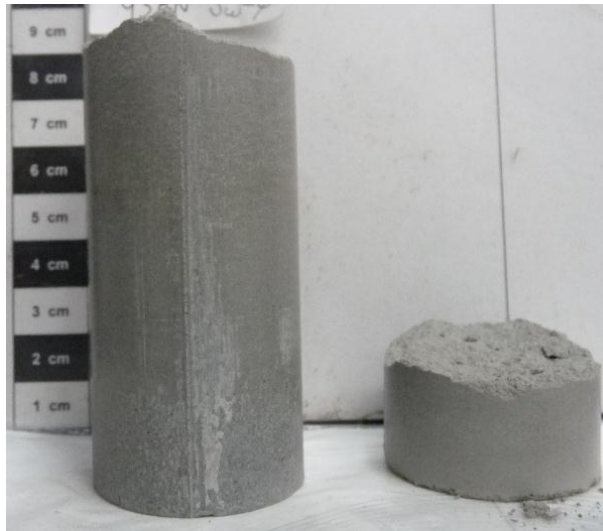


Fuente: Autor.

Para conocer la porosidad con la que sale el espécimen luego de su compactación, era esencial conocer el desplazamiento de consolidaciones que tiene lugar la muestra luego de pasar por la máquina (MÁQUINA DE ROCAS MTS 815). En la Imagen 11 se puede observar el momento en que se extrae el espécimen de la celda luego de haberse compactado. En esta imagen se puede detallar que cuando la roca está saturada parte del material se pierde en las fisuras que dejan las dos placas, en este caso cuando el embolo se desplaza no está reduciendo el volumen de poros sino desplaza el material fuera del área cilíndrica.

La forma más eficaz que se obtiene para controlar las propiedades petrofísicas es por medio del saturado de la roca, entre más contenido de agua presenta, su compactaciones mejora a una misma fuerza de compresión; un contenido de agua por encima de 14 gramos para 260 gramos de material generaban los mismos resultados, y una saturaciones igual a cero generaba alta porosidad pero dificultaba el proceso de pulido y manipulación.

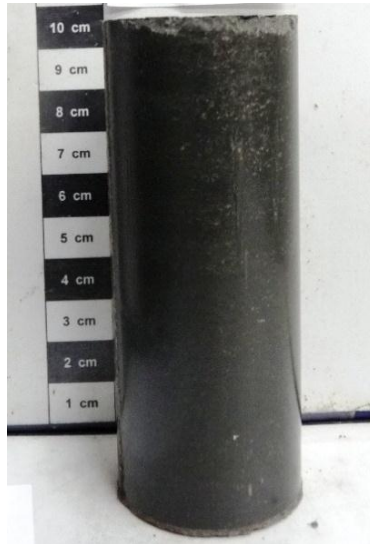
**Imagen 12.** PLUG seco consolidadas con la Celda de Carga.



Fuente: Autor.

En la Imagen 12 se presenta una muestra que fue consolidada en la celda de carga a condiciones secas, tiempo después el PLUG se fractura sin ningún esfuerzo aplicable. Caso contrario se puede observar en la Imagen 13 un PLUG saturada que se mantiene estable al momento de ser manipularlo.

**Imagen 13.** PLUG Saturado consolidadas con la Celda de Carga.



Fuente: Autor.

#### **4.2.4 Identificación de los especímenes (PLUG)**

Para cada muestra ya sea extraída de afloramiento o sintética se le asigna un número para su identificación igual a los mostrados en las siguientes tablas:

**Tabla 10.** Identificación. Muestras de Afloramiento.

	<b><i>Sample ID</i></b>	<b>Lutita</b>
1	200777756	Lutita 1
2	200777757	Lutita 1
3	200777758	Lutita 1
1	200777759	Lutita 2
2	200777760	Lutita 2
3	200777761	Lutita 2
4	200797427	Lutita 2

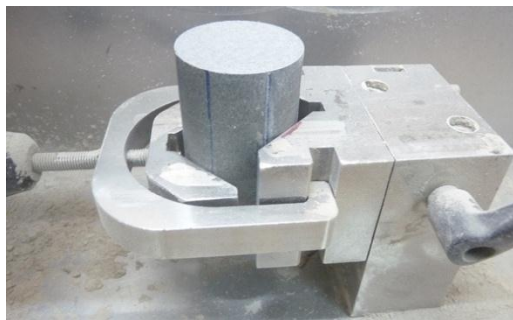
**Tabla 11.** Identificación. Muestras de Sintéticas.

	<b>Sample ID</b>	<b>Lutita</b>
1	200777762	Lutita 1
2	200777763	Lutita 1
3	200777764	Lutita 1
4	200747930	Lutita 1
5	200797431	Lutita 1
6	200797432	Lutita 1
7	200797433	Lutita 1
8	200797434	Lutita 1
9	200797435	Lutita 1
10	200797436	Lutita 1
11	200802546	Lutita 1

### **4.3 PULIDO DE LAS MUESTRAS**

Se realiza con una pulidora de superficie CORETERS EFG-450 la cual proporciona una planitud perfecta de las caras de los PLUG. En la imagen 14 se observa el montaje de la muestras en la pulidora.

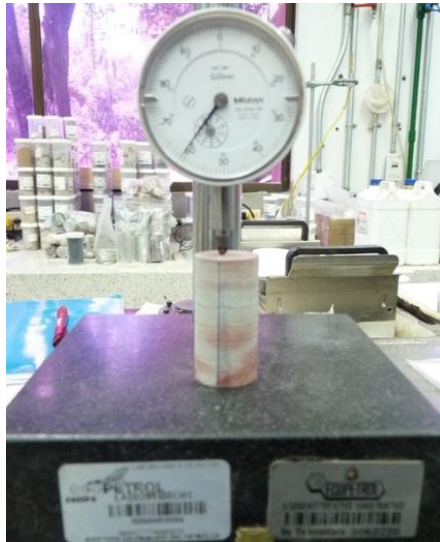
**Imagen 14.** Montaje de la muestra en la pulidora CORETERS EFG-450.



Fuente. Autor.

La planitud perfecta de las caras se puede ver afectada por diferentes variables como los son las manos del operador, pequeños desplazamiento de la “agarradera” la cilindridad relativa de la roca, entre otras; debido a esto las caras de la roca pueden quedar planas pero no paralelas, a si que se usa como ultima herramienta un proceso manual de ajuste con lija para que la planitud de la roca no exceda una diferencia de 0.02mm, medida que se realiza con el comparador de caras mostrado en la Imagen 15.

**Imagen 15.** Comparador de Caras.



Fuente: Autor.

Luego de que la roca tenga una planitud sugerida se realiza la medida longitudinal en ocho posiciones equivalentes a través de toda su circunferencia, a si mismo se mide el diámetro de la muestra en ocho posiciones equidistantes a través de toda su longitud. Posteriormente se realizan medidas de cilindridad igualmente con el comparador de caras. Estos valores son registrados para el cálculo de la densidad toda y volumen. En la Tabla 12 se presenta la relación diámetro longitud para las muestras consolidadas por la máquina:

**Tabla 12.** Relación longitud/diámetro, densidad, peso y volumen. Para muestras Sintéticas.

Sample ID	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Wx (gr)	L/D	V (cm3)	$\rho$ (apar) g/cc
200777762	38,3	78,8	212,0	2,1	90,947	2,331
200777763	38,4	76,8	208,3	2,0	89,036	2,340
200777764	38,6	76,3	211,5	2,0	89,151	2,373
200747930	38,1	76,9	204,4	2,0	87,578	2,334
200797431	38,5	76,6	213,3	2,0	89,061	2,395
200797432	38,3	76,9	199,9	2,0	88,418	2,261
200797433	38,2	76,3	199,0	2,0	87,372	2,278
200797434	38,2	77,3	211,9	2,0	88,373	2,398
200797435	38,2	76,7	210,3	2,0	88,099	2,387
200797436	38,3	79,0	207,1	2,1	90,905	2,279
200802546	38,4	76,9	216,48	2,0	89,302	2,424

### Condiciones de las Muestras de Afloramiento.

Para la “Lutita 1” se logró dar las condiciones geométricas adecuadas a 3 muestras extraídas de la roca de afloramiento, las demás sufrieron daños en el proceso de extracción, por otras parte de la “Lutita 2” fue posible darle planitud a 4 muestras, de igual forma las demás sufrieron daños en el procesos de pulido debido a las condiciones friables que presentan.

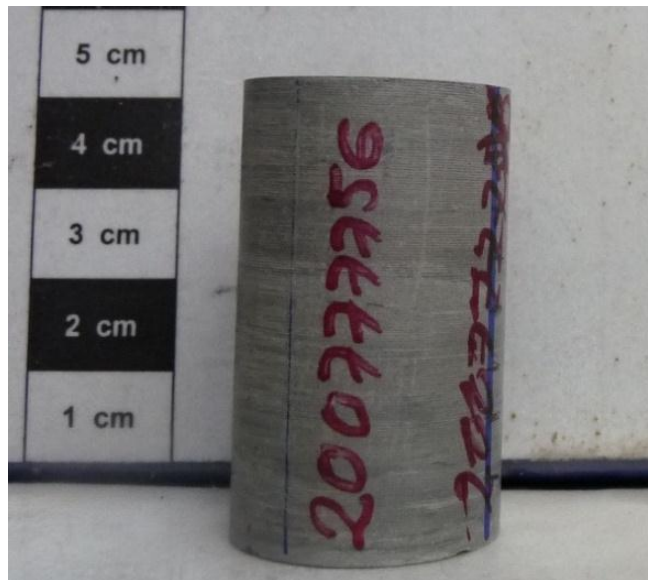
En la tabla 4 se presentan las relaciones Longitud/Diámetro para las muestras de afloramiento, las tres primeras pertenecen a las “Lutita 1” y las 4 últimas a la “Lutita 2”.

**Tabla 13.** Relación longitud/diámetro, densidad, peso y volumen. Para muestras de afloramiento.

<i>Sample ID</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Longitud (mm)</i>	<i>L/D</i>	<i>Wx (gr)</i>	<i>V (cm3)</i>	<i>ρ(apar) g/cc</i>
<b>200777756</b>	25,91	41,86	1,615	52,03	20,59	2,528
<b>200777757</b>	26,03	37,70	1,448	48,22	18,77	2,569
<b>200777758</b>	25,15	52,30	2,079	65,41	25,99	2,517
<b>200777759</b>	25,05	50,63	2,021	63,15	24,95	2,531
<b>200777760</b>	25,11	49,21	1,960	61,23	24,38	2,512
<b>200777761</b>	25,04	49,66	1,983	61,15	24,47	2,499
<b>200797427</b>	24,73	48,79	1,973	58,24	23,43	2,486

En la Imagen 16 y 17 se presentan las PLUG de una pulgada extraída de la roca de afloramiento, con las condiciones ideales para ser ensayadas.

**Imagen 16.** PLUG con las geometría ideal para ensayar (Lutita 1).



Fuente: Autor.

**Imagen 17.** PLUG con las geometrías ideal para ensayar (Lutita 2).



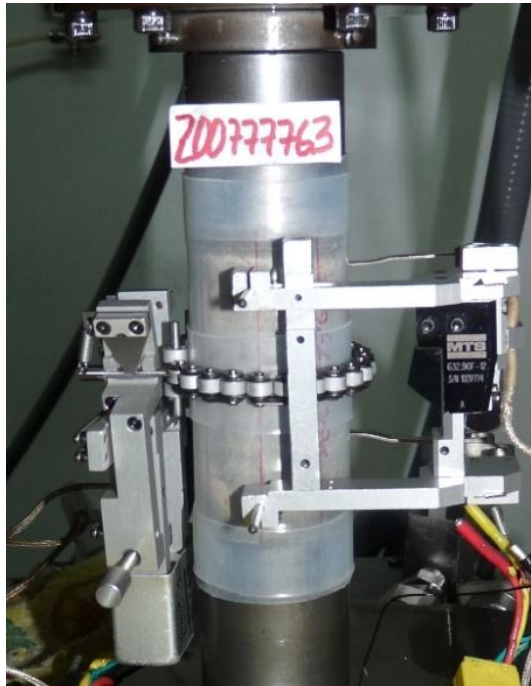
Fuente: Autor.

#### **4.4. MONTAJE DE LAS PRUEBAS**

Luego de que la roca de afloramiento y las rocas consolidadas en la celda tenga las condiciones geométricas requeridas son llevadas a la MÁQUINA DE ROCAS MTS 815 de compresión para ser montadas y ensayadas. El ensayo de las muestras (PLUG) se realizó a una tasa de desplazamiento de 0.00017mm/seg hasta su fracturamiento.

En la Imagen 18 se presenta las muestras con Sample 200777763 a punto de ser ensayada, en la parte izquierda de la muestra (PLUG) se puede observar el extensómetro conformado por una cadena que permite tomar las deformaciones transversal o cilíndrica; al lado derecho de la imagen se presenta el extensómetro que permite medir las deformaciones longitudinales.

**Imagen 18.** Muestras con extensómetros preparada para ensayar.



Fuente: Autor.

El uso de los extensómetros para la lectura de las deformaciones fue utilizado en las tres primeras pruebas, debido a que los resultados presentaban valores anómalos, y se decide el uso del desplazamiento de la mesa como valor de la deformación axial.

**Nota:**

También se probó realizar lecturas de ondas acústicas  $V_p$  y  $V_s$  a diferentes cartas de compresión para poder generar módulos dinámicos, y sacar relaciones con la resistencia de las muestras, pero el mineral de la roca no permite buenos resultados a diferencia de otros minerales ya probados en laboratorio, de esta forma se prescinden de estos valores.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La máquina de rocas al momento de finalizar las pruebas almacena los resultados de los diferentes eventos en un ordenador, estos se extraer para ser interpretados con la ayuda de un software según el tipo de ensayo.

### 5.1 METODOLOGÍA

- ✓ Interpretaciones de la formación de interés por medio de los registros de pozo para la clasificación litológica y petrofísica.
- ✓ Correlacionar la formación de interés con el sitio de afloramiento en caso que no se cuente con informaciones suficiente de corazones dados a profundidad.
- ✓ Es importante un buen trabajo de campo en el caso de que se requiera informaciones del afloramiento, en el que se incluya registros fotográficos y anotaciones precisas del estado de la roca.
- ✓ Extracción de PLUG o tapones, corte y pulido de superficie según las diferentes litologías de la formación para los ensayos de Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS).
- ✓ Es necesario obtener pruebas de Difracción de Rayos X (DRX) para conocer el mineral perteneciente en las muestras, especialmente el porcentaje y tipo de arcilla de la formación de interés. En el caso que sea posible obtener corazones (muestras extraídas del pozo) se puede lograr un mejor empalme entre los volumen de arcilla obtenido con el Vsh y el porcentaje en peso obtenido por las prueba de difracción de rayos X (DRX).

- ✓ Realizar pruebas mecánicas para cada litología de la formación de interés, en la que se incluyen: Pruebas de Compresión Uniaxial (UCS), Módulos elásticos y Módulos Dinámicos. y propiedades petrofísicas como la porosidad, la densidad y el contenido de la saturación.
- ✓ En el caso de litologías sensibles con difícil manejabilidad, (en el cual normalmente se agrupan las lutitas y areniscas no consolidadas) se puede incrementar el número de muestras o especímenes para caracterizar usando muestras sintéticas consolidadas con la celda de carga de compactaciones.
- ✓ Con la información obtenida se clasifica la roca en función del contenido de arcilla mediante la Prueba De Difracción De Rayos X (DRX).
- ✓ Cuando se cuente con información suficiente se realiza un análisis entre las propiedades petrofísicas y las propiedades mecánicas en función de la porosidad y el contenido de arcilla.

Siempre será importante conocer acerca de las correlaciones extraídas del estado de arte, ya que estas pueden alimentar la información y evitar cometer errores.

## **5.2 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA POR MEDIO DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)**

La difracción de rayos X es la técnica más precisa para identificar la mineralogía y la composición cristalina pues se basa en la dispersión de rayos X generada por la red cristalina en direcciones y ángulos específicos para cada sistema cristalino. Esta técnica permite conocer la composición en términos de fases cristalinas sin incluir materiales amorfos, tomada como 100% el total de las fases detectadas.

Entre las dos modalidades encontradas, roca total y fragmento de arcilla, el primero describe de una manera global la mineralogía de la roca total, mientras

que la segunda realiza el análisis de la fracción menor de 2 micras caracterizado principalmente por los filosilicatos.

## **Resultados**

Las muestras analizadas se encuentran básicamente constituidas por minerales arcillosos y Cuarzo. Los minerales arcillosos representan los componentes mayoritarios, sus contenidos se encuentran entre el 62% (Lutita 1) y 83% (Lutita 2) en peso; mientras el Cuarzo representa el mineral secundario, el cual representa entre el 12% (Lutita 1) y 33% (Lutita 2) en peso. Adicionalmente presenta minerales accesorios a nivel de trazas, entre ellos tenemos principalmente Feldespatos potásicos y Feldespatos sódicos o Plagioclasas.

En “Otros” se agrupa otras fases cristalinas presentes en menor proporción o de baja cristalinidad que se encuentran enmascarados por los minerales mayoritarios, en este caso solo se reveló la posible presencia de Sulfuro de Hierro tipo Pirita,  $\text{FeS}_2$ .

A nivel de la fracción menor de 2 micras, se caracterizaron los Minerales arcillosos, los cuales representan contenidos alrededor del 95% en peso de esta fracción. La Caolinita representa el mineral arcilloso mayoritario, en la Lutita 1, con contenidos del 85% en peso. Sin embargo en la Lutita 2, la Illita representa el mineral arcilloso mayoritario, con contenidos del 40% en peso. La Clorita solo se revela en la Lutita 1; este mineral no supera el 25% en peso. (Ver Tabla 15). Adicionalmente se reveló la presencia de Cuarzo microcristalino, que representan contenidos que no exceden el 8% en peso.

**Tabla 14.** Concentración Relativa Roca total (DRX)

	Arcillas	Cuarzo	Feldespatos K	Feldespatos Na	Otros
	% peso	% peso	% peso	% peso	% peso
Lutita 1	62	33	Tr	Tr	5
Lutita 2	83	12	Tr	Tr	5

Fuente: Autor

**Tabla 15.** Concentración Relativa fracción menor de 2 micras. (DRX)

	Arcillas			Cuarzo
	Cloritas	Ilitas	Caolinita	
	% peso	% peso	% peso	% peso
Lutita 1	25	40	27	8
Lutita 2	ND	10	85	5

Fuente: Autor

### 5.2.1 Cálculo de la densidad a partir de las pruebas (DRX)

Los valores obtenidos con DRX están dados en porcentaje en peso de los diferentes minerales que conforman la roca, o densidad de una roca con porosidad igual a cero; si teóricamente se cuenta con las densidades de estos minerales es posible estimar la densidad de todo el material en el caso de que la muestra se encuentre totalmente uniforme.

$$\rho_s = \left( \frac{\%_{\text{peso1}}}{\rho_{s1}} + \frac{\%_{\text{peso2}}}{\rho_{s2}} + \dots + \frac{\%_{\text{peso}(n)}}{\rho_{sn}} \right) \quad (21)$$

La densidad obtenida por las pruebas de DRX son corroborada con la densidad máxima que pueden tener los shales (arcillas) y sand and shales (arenas arcillosas) encontrado en los Croosplot de DENSITYvsGR generados con los registros de pozo.

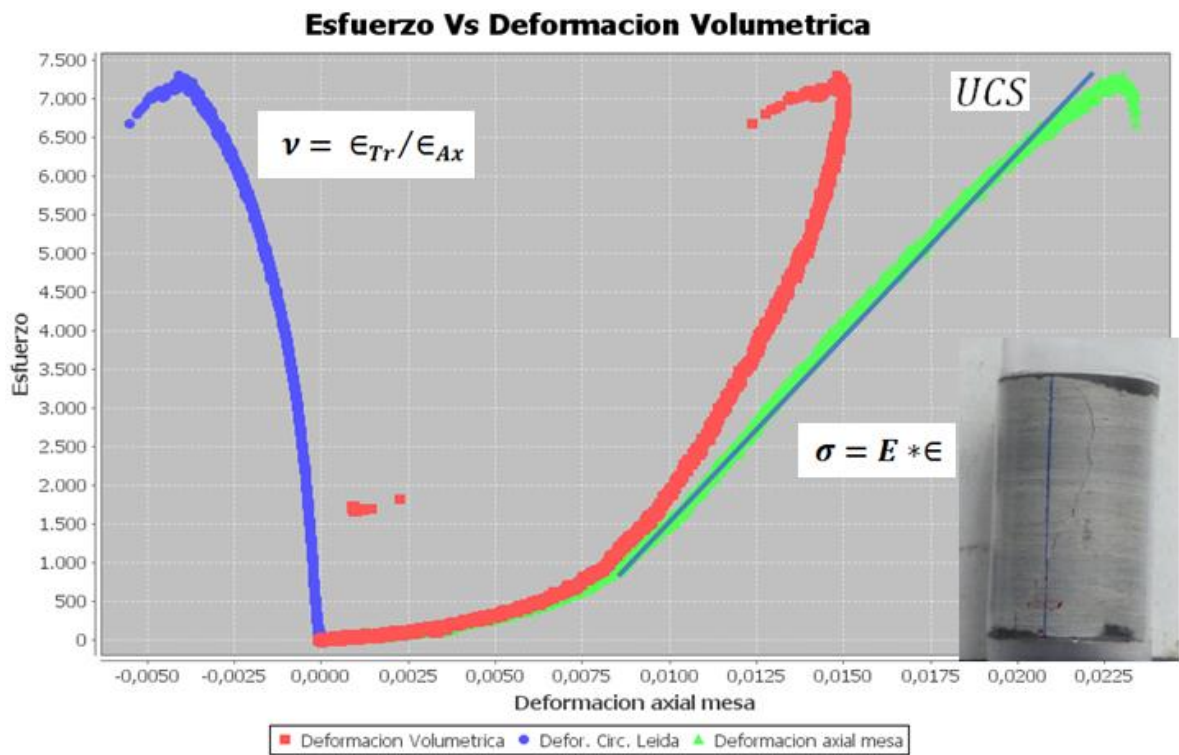
Para la Lutita1 se obtiene 2,71 g/cc y para la Lutita2 se tiene 2,7g/cc:

### 5.3 INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL

#### 5.3.1 Muestras de afloramiento

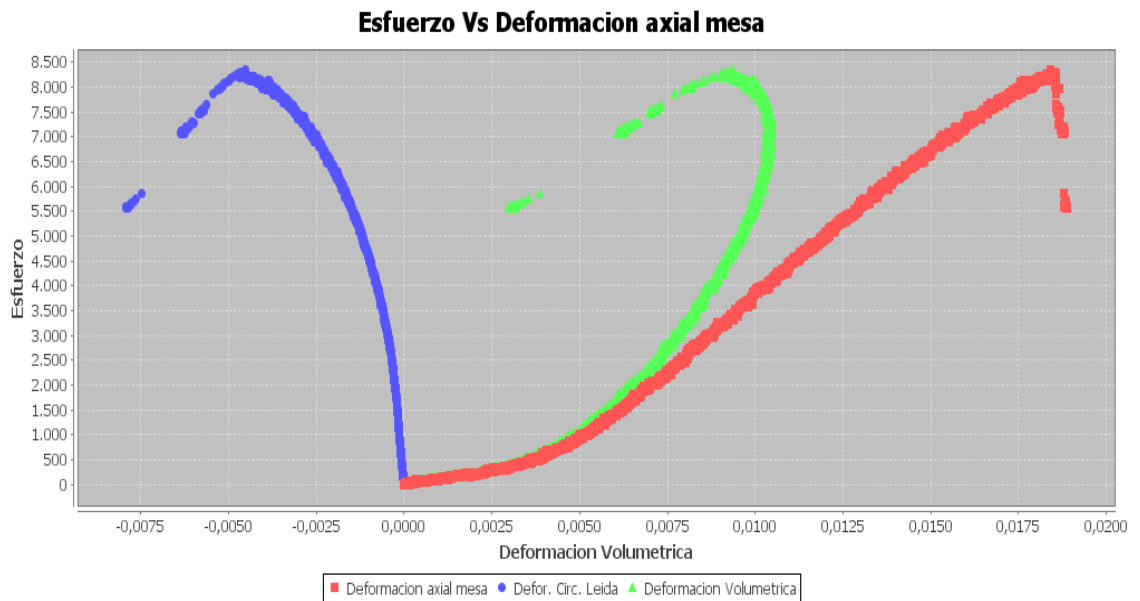
Para las tres muestras clasificada como “Lutita 1” de afloramiento se grafican los resultados extraídos de la maquina, en donde se aprecia la deformación axial, deformación circunferencial y volumétrica:

Figura 16. Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777756.



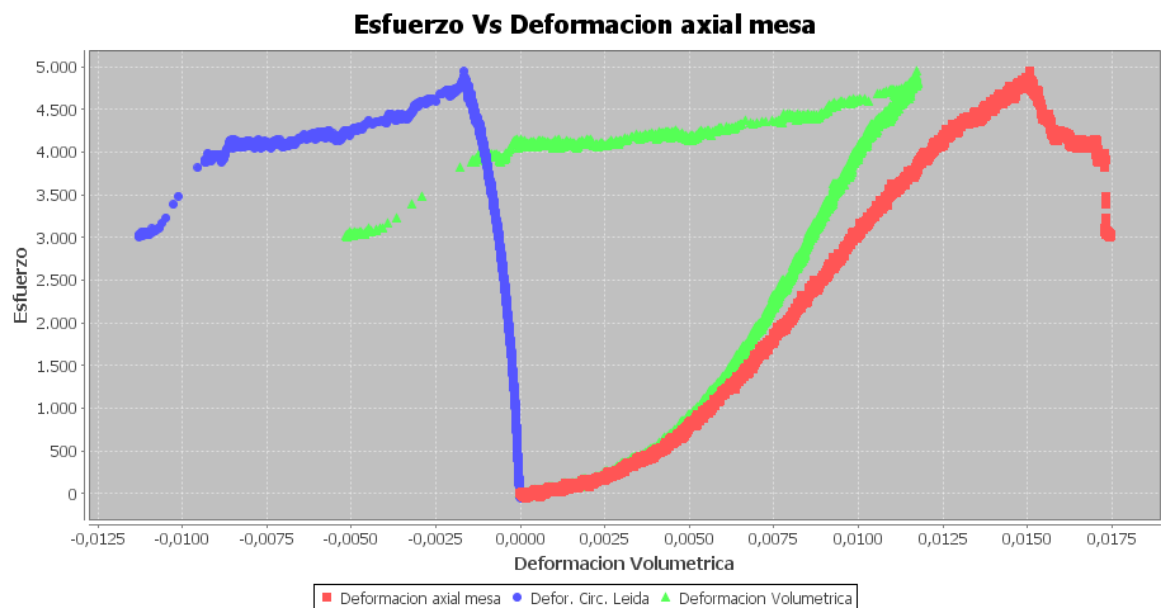
Fuente: Autor.

**Figura 17.** Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777757



Fuente: Autor.

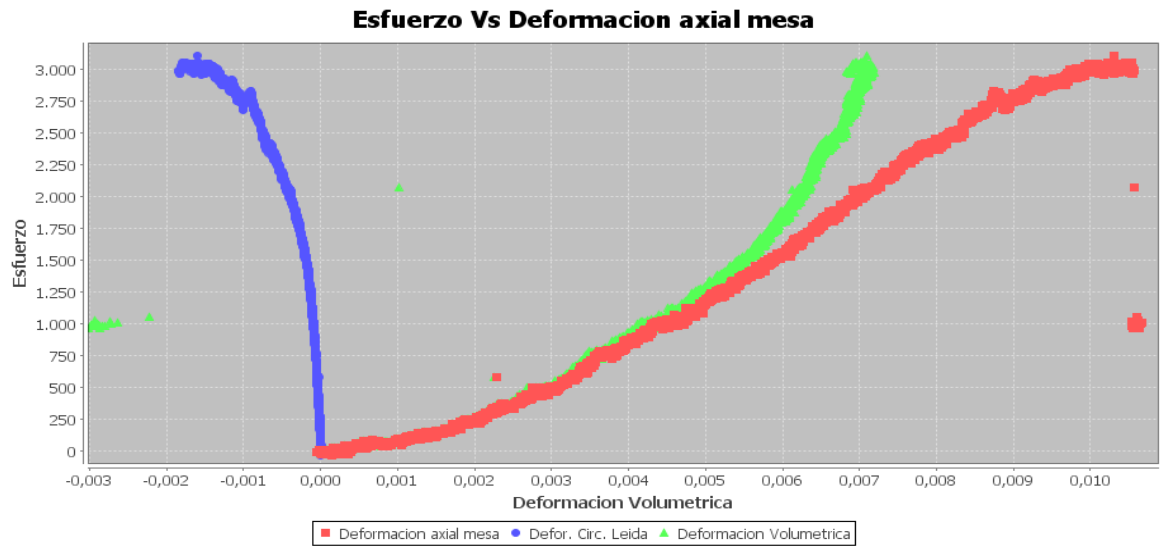
**Figura 18.** Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777758



Fuente: Autor.

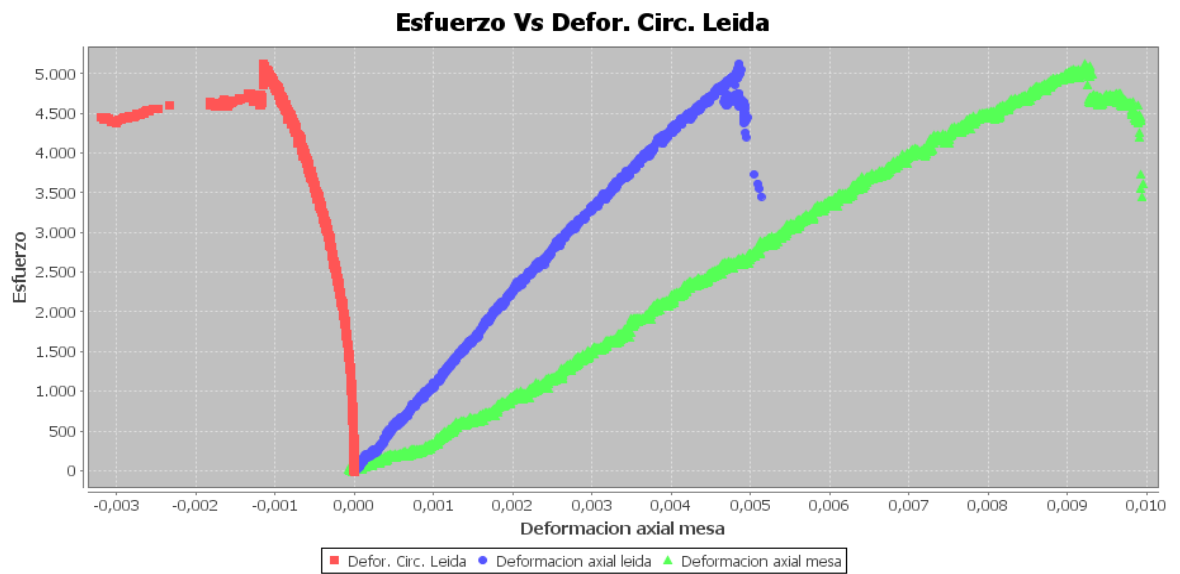
Para las cuatro muestras clasificada como “Lutita 2” de afloramiento se grafican los resultados extraídos de la maquina:

**Figura 19.** Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777759



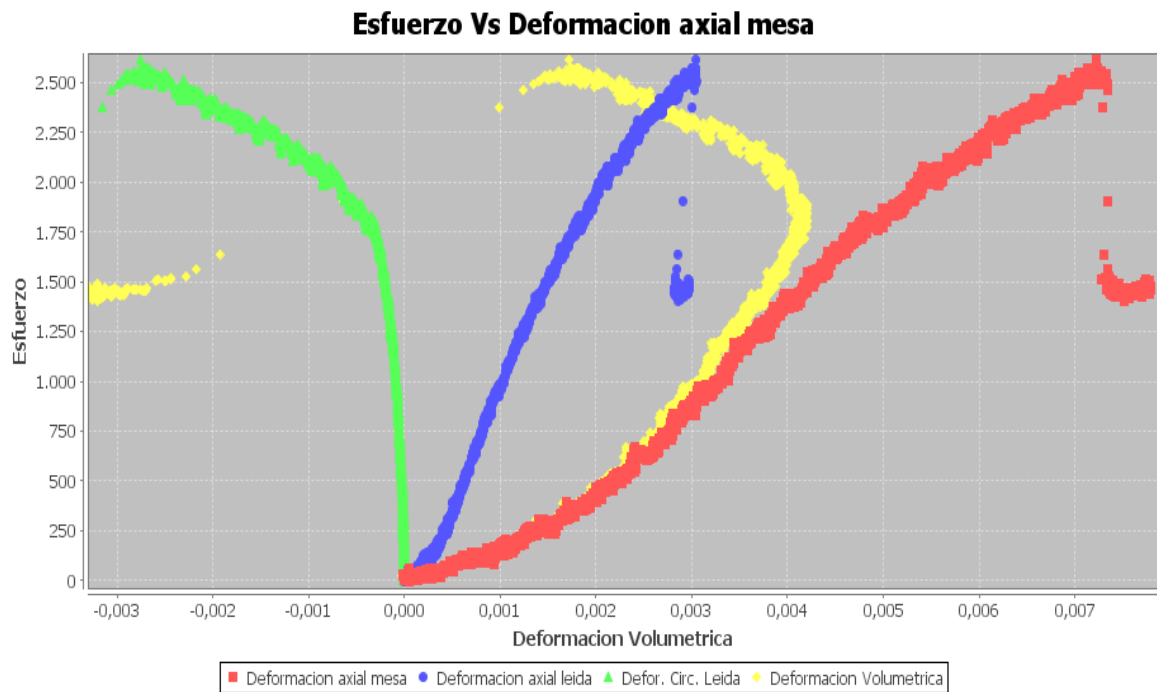
Fuente: Autor.

**Figura 20.** Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777760.



Fuente: Autor.

**Figura 21.** Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200777761



Fuente: Autor.

En algunas muestras se rechazaron los valores medidos de las deformaciones a partir de los extensómetros ya que estos presentaban valores anómalos debido a problemas de calibraciones. Para las deformaciones longitudinales fue teniendo en cuenta que la roca se deforma a la misma medida que se desplaza la mesa de la máquina, de esta forma se puede obtener el modulo de Young.

En la **Tabla 16** se presenta un resumen de los valores obtenidos para las muestras de afloramiento.

**Tabla 16.** Valores obtenidos de la Resistencia a la Compresión Uniaxial y Modulo de Young para las muestras de afloramiento.

<b>Sample ID</b>	<b>UCS (Psi)</b>	<b>E (Psi)</b>	<b>Poisson</b>	<b>Porosidad %</b>	<b>Litología</b>
<b>200777756</b>	7301,38	492264,0	0,22	6,89	Lutita 1
<b>200777757</b>	8338,00	596674,0	0,28	5,38	Lutita 1
<b>200777758</b>	4942,88	483513,0	0,14	7,29	Lutita 1
<b>200777759</b>	3109,25	391658,0	0,15	6,20	Lutita 2
<b>200777760</b>	5126,20	620809,0	0,13	6,92	Lutita 2
<b>200777761</b>	2613,00	452448,0	0,28	7,40	Lutita 2
<b>200797427</b>	3454,43	402391,6	N/A	7,87	Lutita 2

Fuente: Autor.

El espécimen con Sample 200777758 no es considerado confiable debido a que presentaba mayor número de laminaciones observadas en el momento del montaje, a comparaciones de los dos especímenes con Sample 200777757 y 200777756 este presenta una resistencia menor.

Teniendo en cuenta los valores de contenido de arcilla mostrados en la prueba DRX tabla 14 y 15, se observa que la “lutita 2” cuenta con mayor contenido de arcilla (83%) su resistencia mecánica se encuentra en un rango entre 2000 Psi a 5000Psi mientras que la “lutita 1” con un contenido del 63% de arcilla, menor que la “lutita 2”, cuenta con una resistencia mecánica inconfiada de 4000 a 8000Psi.

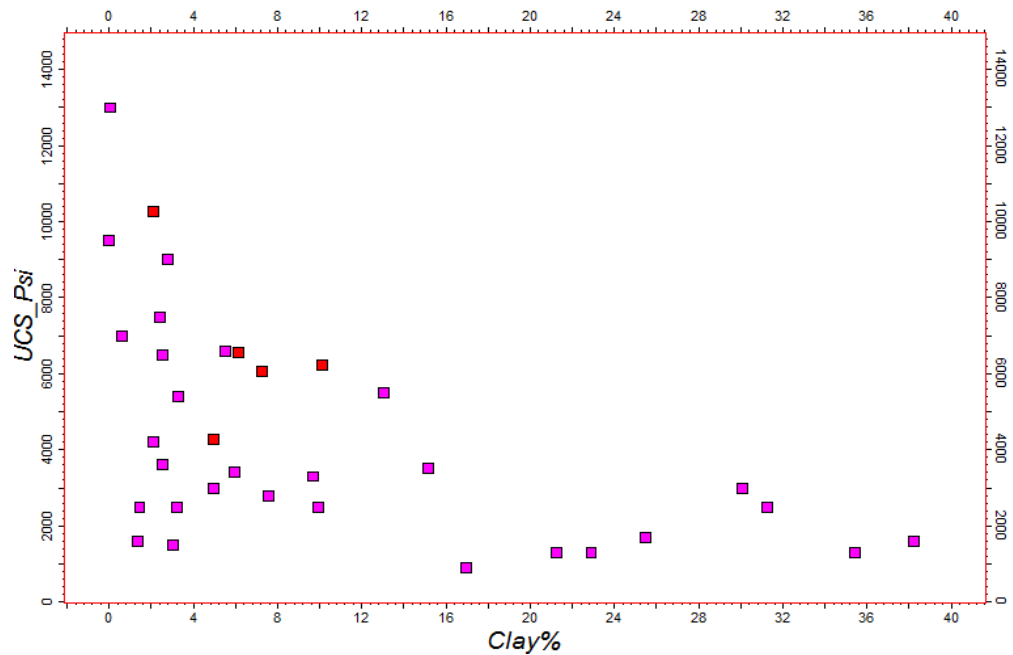
En los resultados es notable la reducción de la resistencia de la roca en presencia del aumento del contenido de arcilla, aunque la “lutita 1” presentaba más

sensibilidad al cote y pulido. Para una observación mas general de este comportamiento se sugiere estudiar una formación arcillosa de la cual se cuenta con mayor información.

### Tendencia observada para otra formación arcillosa.

Debido a la poca información que fue posible extraer de la roca de afloramiento, inherente a la dificultad para adquirir y manipular los PLUG, se corrobora la tendencia expuesta anteriormente con otra formación litológica del cual se tiene mayor información. Para ellos se grafica la Resistencia a la Compresión Uniaxial con el contenido de arcilla, cabe añadir que estos resultados fueron extrapolados a partir de la Pruebas de Compresión Triaxial mediante el criterio de Mohr-Coulomb de información ya existente.

**Figura 22.** Variación de la resistencia confinada ante la variación de contenido de arcilla.



Fuente: Autor.

En la Figura 22 se evidencia una envolvente de los valores de la resistencia UCS al aumento en el contenido de arcilla, entre más contenido de arcilla presenta la muestras la resistencia disminuye.

Los valores en color Rojo son datos extraídos a partir de Pruebas De Compresión Uniaxial directas, los valores en Rosado son valores extrapolados a partir de pruebas Triaxiales.

Sin embargo no es posible realizar una correlación que me represente la variación entre el contenido de arcilla y la resistencia de la roca. Para ellos según la literatura [23] la resistencia se encuentra además en función de otra variable de sostenimiento de carga.

### **5.3.2 Muestras consolidadas con la celda de carga.**

Para las 11 muestras consolidadas en la celda de carga se obtiene valores bajos de resistencia, eso debido a que no es posible generar los mismos resultados de una roca de afloramiento que tiene un tiempo geológico de compactaciones a una roca de entre 2 a 8 horas de compactación, pero gracias a la consolidación sintética se pueden obtener datos de rocas poco consolidadas y porosidades altas que son difíciles de extraer en profundidad de pozo o en afloramiento, de la misma forma alimenta el rango de informaciones para una vista más general de la variación de la resistencia con el aumento de la porosidad para una densidad de mineral constante.

El rango de datos obtenidos de porosidad no logra ser los suficientemente amplios debido a las limitaciones expuestas anteriormente. En la Tabla 17 se expone el modo de consolidación para los especímenes (PLUG) el tiempo de consolidación en la celda, el contenido de agua de la roca en gramos luego de un secado al horno por 24 horas a 100 grados centígrados y por último la porosidad de cada muestra.

**Tabla 17.** Parámetros usados para la consolidación de la roca sintética; contenido de agua y porosidad.

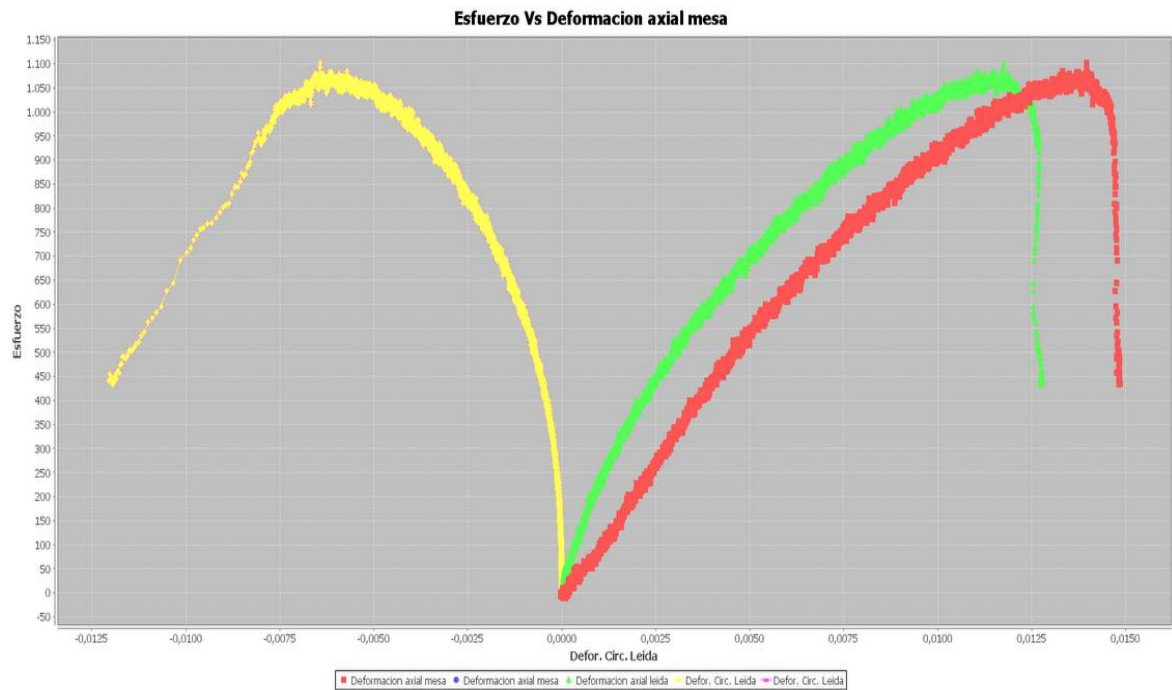
<b>Sample ID</b>	<b>Modo de Consolidación</b>	<b>Tiempo de consolidación (horas)</b>	<b>Contenido de agua de la roca (gr)</b>	<b>Porosidad <math>\phi</math> %</b>
200777762	Fuerza	2	6,74	16,88
200777763	Fuerza	2	9,96	17,94
200777764	Fuerza	8	9,07	16,36
200747930	Fuerza	8	5,88	16,52
200797431	Fuerza	2	10,99	16,32
200797432	Fuerza	8	6,07	19,26
200797433	Fuerza	8	4,98	18,20
200797434	Desplazamiento	8	8,98	15,42
200797435	Fuerza	8	9,15	15,92
200797436	Desplazamiento	8	6,51	18,71
200797436	Desplazamiento	3	9,00	14,41

Fuente: Autor.

Los métodos del laboratorio usados en el Instituto Colombiano De Petróleo ICP realizan el cálculo de la porosidad efectiva por medio de invasiones de fluido (Tolueno) o gas (Helio); como se menciona para este proyecto se requiere el cálculo de la porosidad absoluta que se haya por medio de la diferencia de peso (Ecuaciones 9) para este cálculo es esencial obtener la densidad del mineral de la muestra que se halla de forma aproximada mediante el aporte en peso de los diferentes minerales que conforman la roca, a partir de la Defección De Rayos X (DRX).

En la Figura 23 se presenta la curva esfuerzo deformaciones para la muestra con Sample ID 200802546:

**Figura 23.** Interpretaciones de la muestras con Sample ID 200802546.



Fuente: Autor.

En la **Tabla 18** se encuentra un resumen de los resultados obtenidos para las 11 muestras consolidadas en la Celda De Carga. Solo se presenta los resultados en los cuales se cuenta con buena confiabilidad, la relaciones de Poisson no se tomara en cuenta para los análisis.

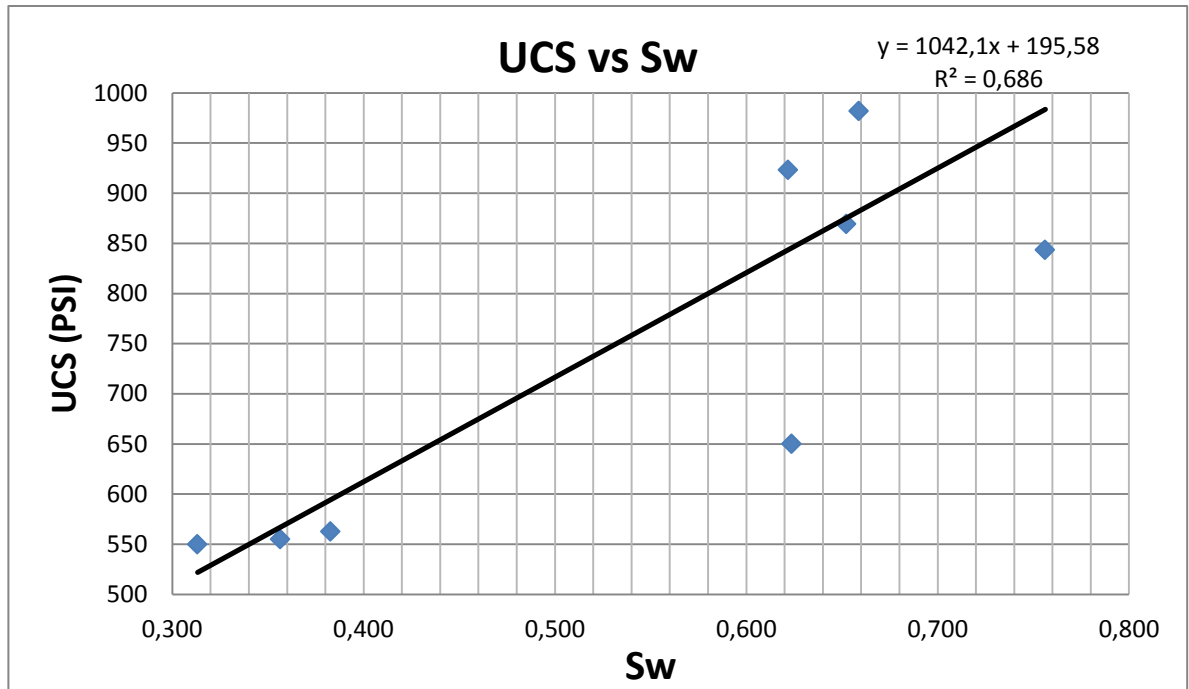
**Tabla 18.** Valores obtenidos de la Resistencia a la Compresión Uniaxial y Modulo de Young para las muestras Sintéticas.

<i>Sample ID</i>	<i>UCS (Psi)</i>	<i>E (Psi)</i>
200777762	1413,1	109445,00
200777763	699,79	49024,00
200777764	923,09	95235,55
200747930	1265,9	144480,27
200797431	843,37	65242,87
200797432	555,03	68906,03
200797433	549,81	69449,02
200797434	981,98	68398,47
200797435	869,35	65873,98
200797436	562,73	67658,23
200802546	1101,04	101225,12

Fuente: Autor.

Los Sample 200777762 y 200747930 son datos de rocas saturadas con agua dulce en su proceso de compactación en la Celda de Carga, estos datos no serán tenidos en cuenta para el análisis general.

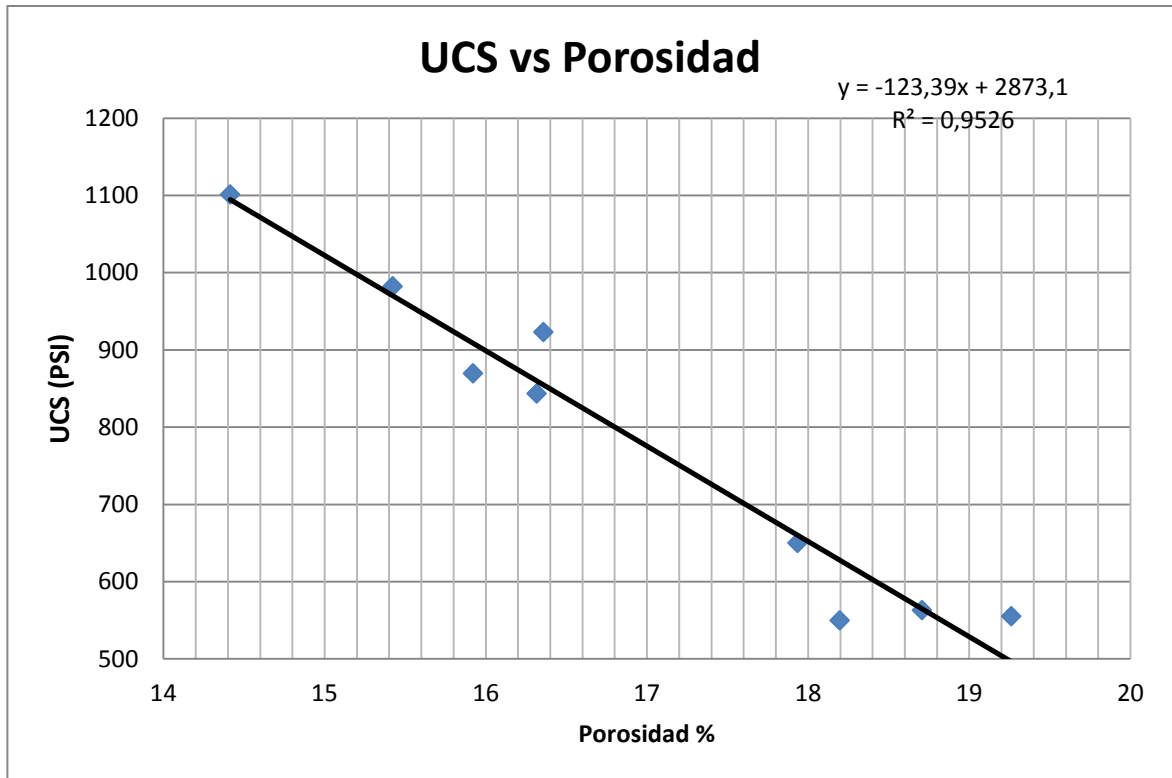
**Figura 24.** Respuesta de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la saturación.



Fuente: Autor.

Las condiciones iniciales la concentración de salmuera que se agregan en las primeras pruebas se mantienen para las demás. Por otra parte los valores de la de la Figura 24, UCS vs Saturación no representa un comportamiento general de la naturaleza de la roca clástica, sino un fenómeno del proceso de consolidación en la Celda de Carga, según cantidad de salmuera añadida al mineral triturado para consolidar, el espécimen adquiere un mejor arreglo de granos y por tanto mayor resistencia.

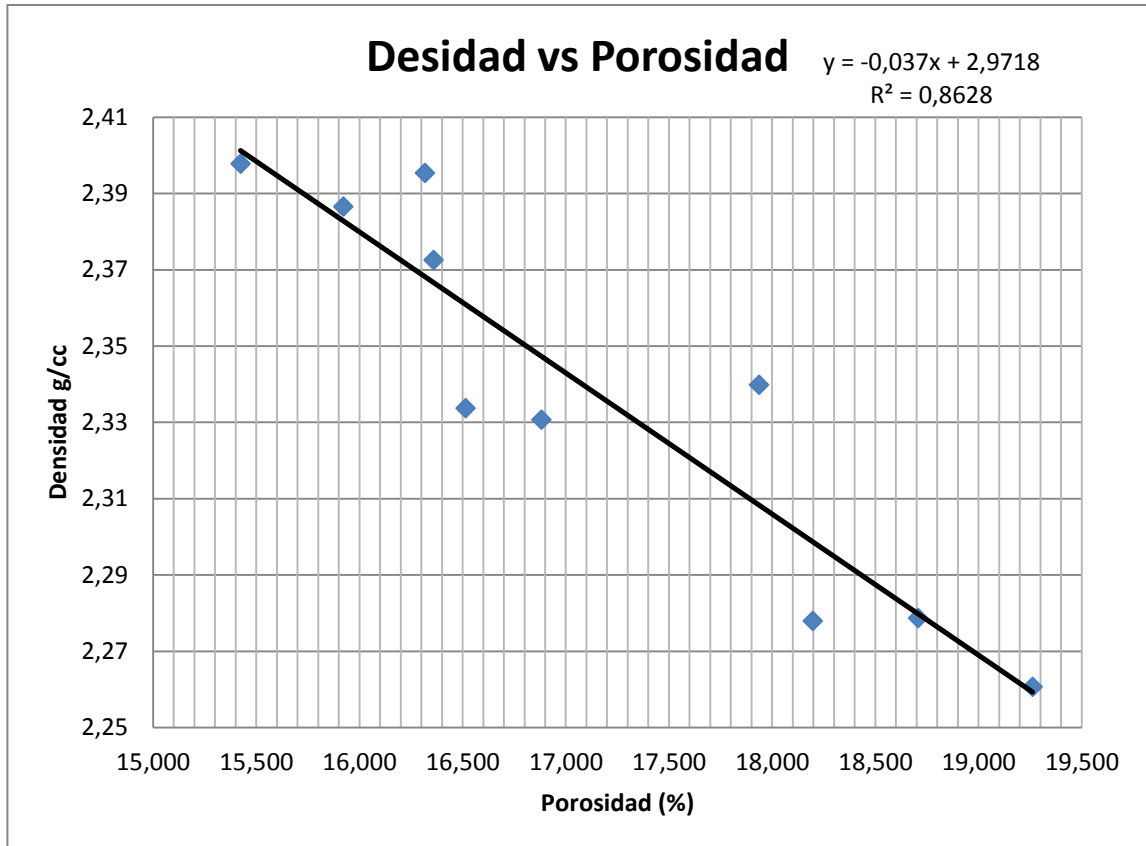
**Figura 25.** Respuesta de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la porosidad.



Fuente: Autor.

Aunque el rango de porosidad no es amplio debido a las limitantes al consolidar el material triturado en la celda de carga, se puede obtener un rango de observación aceptable mostrados en la Figura 25 la cual al aumentar el volumen de vacíos genera una reducción notable en la Resistencia a la Compresión Uniaxial “UCS” de la roca por disminución de sostenimiento de carga, corroborando las afirmaciones encontradas en el estado del arte que afirman que la porosidad es el mejor parámetro para predecir la resistencia de la roca.

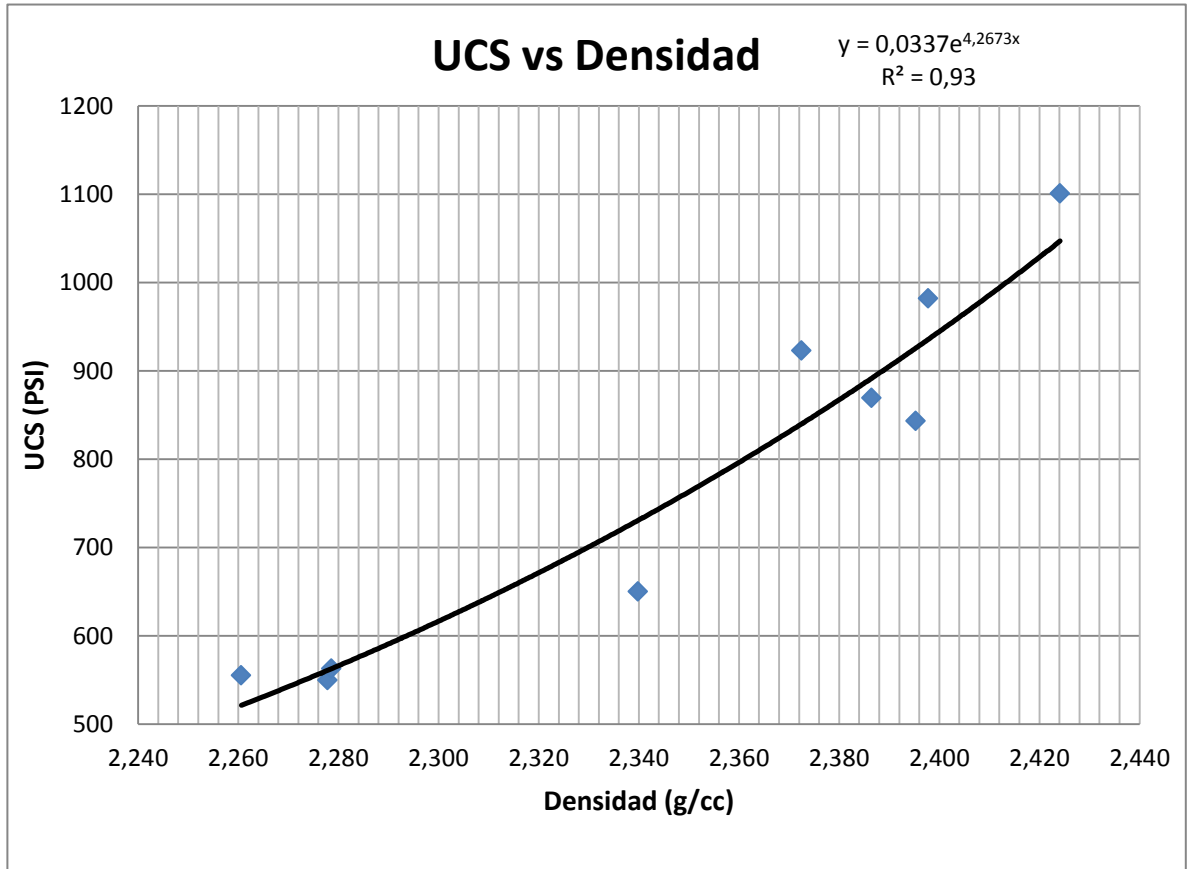
**Figura 26.** Relación entre la porosidad y la densidad para las muestras consolidadas en la Celda De Carga.



Fuente: Autor.

La relación entre la densidad y la porosidad mantiene un comportamiento teórico aceptable, la linalizaciones ajustado a la Ecuación 14 corroborando de esta manera la buena estimación de las propiedades petrofísicas.

**Figura 27** Resistencia entre la resistencia mecánica UCS y la densidad.



Fuente: Autor.

Por otra parte la densidad resulta ser un buen índice de predicción de resistencia, a medida que la densidad aumenta lo hace el sostenimiento de carga, la adhesión entre los granos y por concluyente la resistencia UCS aumenta.

#### **5.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE CORRELACIONES EXISTENTES.**

Dentro de las correlaciones encontradas en el estado del arte se destaca la porosidad y el contenido de arcilla como los mejores parámetros de predicción de la Resistencia a la Compresión Uniaxial, a si mismos la densidad no es un parámetro muy usado ya que aunque está vinculado con la porosidad su rango de

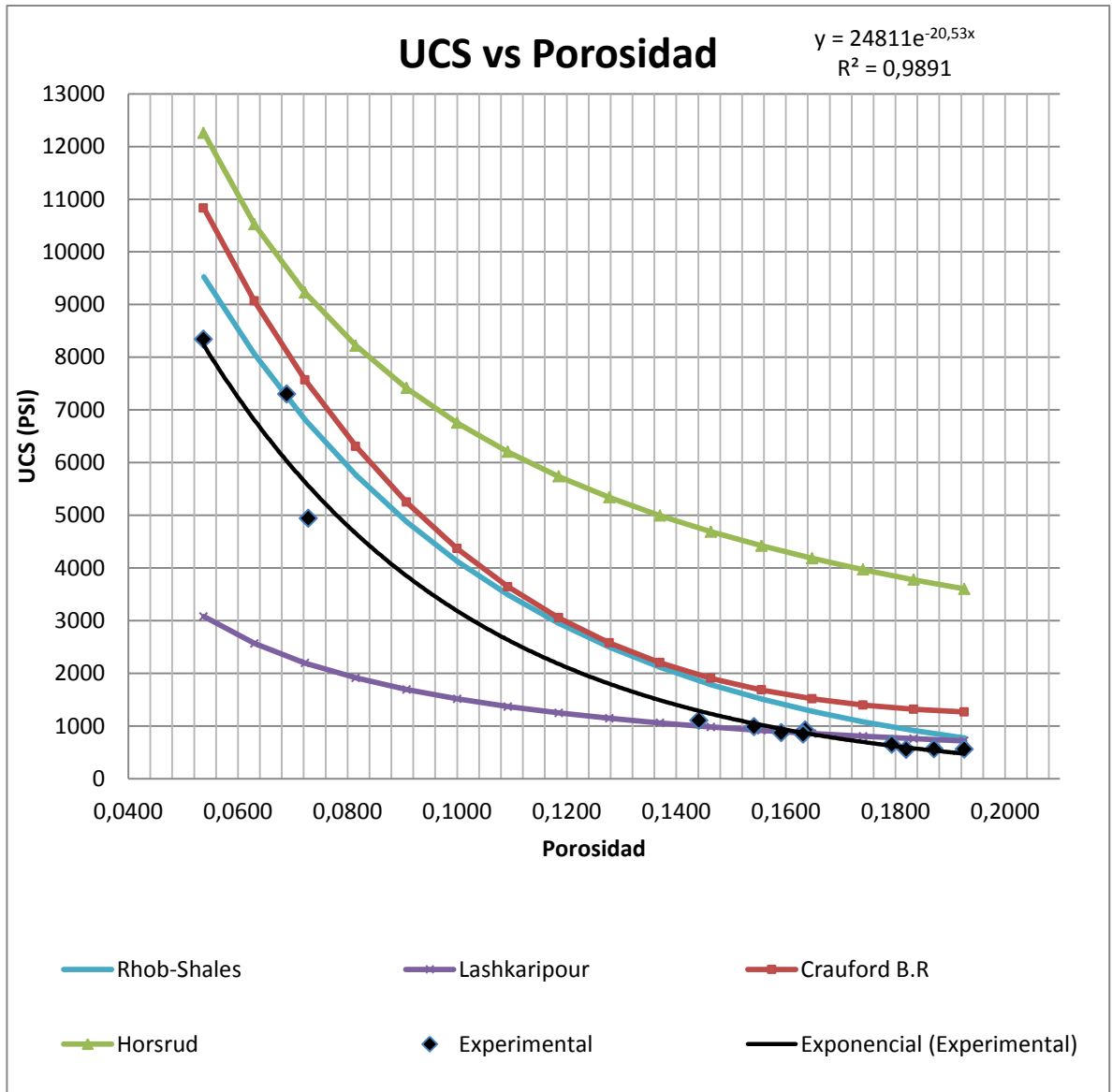
valores no genera un buen rango de observación, sumado a esto puede ser inferido un error si se considera que un minera como el cuarzo y minerales arcillosos como la illita o la caolinita presentan densidades de matriz semejantes, sumando a esto, en caso de que las rocas presenten porosidad similares pueden tener resistencias mecánica muy diferentes a las mismas condiciones.

La relación entre la Resistencia UCS y la saturación no genera confiabilidad por tratarse de una variable que para el proceso de compactación en la celda de carga, la porosidad y la saturación se encontraban relacionados. Por otra parte el efecto que tiene el contenido de sal (concentración de salmuera) en la resistencia mecánica no se estudiara en este trabajo y aunque se realizaron algunos análisis y pruebas pilotos el trabajar con este factor implica una variable compleja de interpretación de registros resistividad.

En las Tablas 7, 8 Y 9 se observa las diferentes correlaciones de predicción extraídas de la literatura y presentadas en la Figura 28, pero estas aunque normalmente son corridas en registros de pozo cuando no se cuenta con información previa, en realidad, son propias de cada formación y requieren de ajustes.

De igual manera se presenta en la Figura 28 la expresión inferida a partir de las muestras ensayadas en laboratorio de la formación Los Cuervos (line negra) tanto para las muestras consolidadas con la celda de carga (puntos inferiores), como las extraídas de la roca de afloramiento (puntos Superiores).

**Figura 28.** Cambio de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la porosidad a partir de la literatura.



Fuente: Autor.

En la Figura 28 se puede evidenciar que de las cuatro tendencias bibliográfica la expresión de Crawford, B.R [25]. y la llamada Rhob-Shales representan los mejores ajustes a los datos experimentales obtenido de la formación Los Cuervos, sin embargo aunque el mejor ajuste se encuentra en la relación de “Rhub-Shales”

está en realidad es una ecuación en funciones de la densidad (Tabla 19) y graficada a partir de la relación densidad porosidad observada en la Figura 25, siendo a si un valor que suma diferentes errores por ser bastante indirecto.

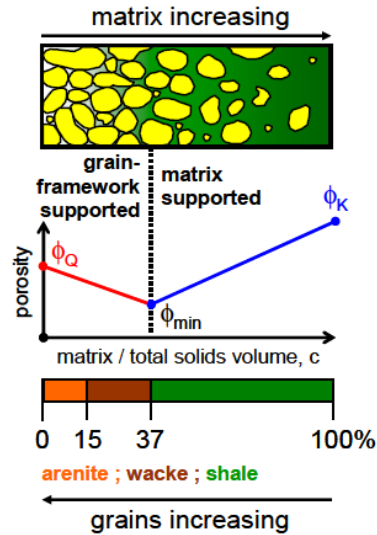
Otro de los inconvenientes del uso de la densidad como parámetro de correlación se encuentra en el uso de los registros de densidad corridos en pozo, estos son registros de contacto entre la herramienta de lectura y las paredes del pozo, normalmente para formaciones arcillosas las paredes del pozo se encuentran alteradas por derrumbes o cavernas, generando de esta forma que la lectura de la densidad no sea confiable.

En un trabajo realizado en el 2010 por Crawford, B.R. y colaboradores, explica de forma más general basado en una extensa base de datos la manera ideal en que se comporta la roca utilizando la ley de la mezcla bimodal y generando una familia de curvas que relaciona la porosidad, el contenido de arcilla y la resistencia mecánica.

#### **5.4.1 Uso del modelo propuesto por Crauford B.R para comparación.**

Según la literatura [25] la roca se encuentra compuesta de una mezcla de fracción de granos gruesos y granos finos, la porosidad en la mezcla puede ser cuantificada por un modelo geométrico mostrado en la Figura 28, la porosidad de la mezcla es expresada en términos de la porosidad de los dos miembros de extrema componentes. A su vez la composiciones esta necesariamente cuantificada en términos de una fracción de matriz o grano fino " $V_{mtriz}$ ".

**Figura 29.** Esquema de embalaje geométrico para la mezcla bimodal de partículas gruesas y de grano fino.



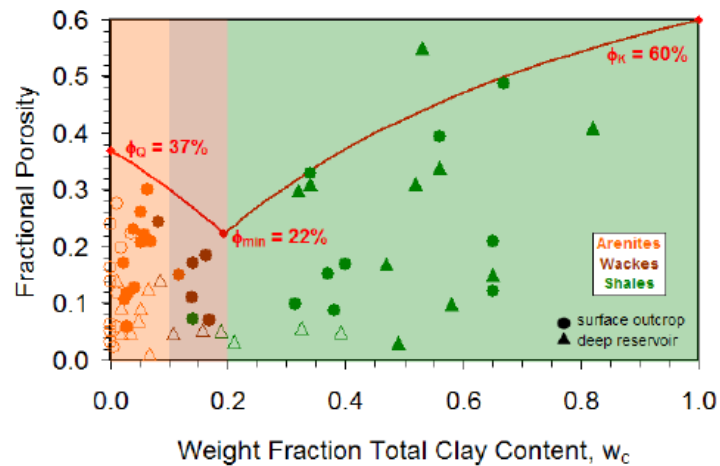
Fuente: Crawford, B.R., Gaillot, P.J. and Alramahi, B. Petrophysical Methodology for Predicting Compressive Strength in Siliciclastic "sandstone-to-shale" Rocks. 2010. Pag 5.

En la Figura 29 se puede observar que existen dos porosidades críticas  $\phi_c$  tanto para las arenas (sand) como para las arcillas (shales) que señalan la suspensión de las partículas y separación de los sedimentos portantes al momento de alcanzar el  $\phi_c$ , para las arenas se tiene  $\phi_c = \phi_Q = 37\%$  y para la matriz arcillosa  $\phi_c = \phi_K = 60\%$ . Se encuentra una porosidad mínima cuando la roca se encuentra bien gradada.

Crawford, B.R propone un comportamiento típico entre el valor de la cohesión de la roca clástica, la porosidad y contenido total de matriz arcillosa donde a medida que aumenta la porosidad la cohesión disminuye llegando a cero cuando esta supera la porosidad crítica de 37% para muestras con contenido de arcilla por debajo de 15% en peso (arenas o arenas arcillosas), a si mismo a medida que el contenido de arcilla aumenta de cero a 15% en peso para porosidades por debajo de 37% la cohesión disminuye; para rocas con tenido de arcilla por encima del 20% en peso (lutitas o shales) la cohesión de la roca presenta un comportamiento

típico hasta una porosidad máxima de 60%. De la misma forma el Angulo de Fricción Interno AFI [25], presenta una reducción con el aumento de porosidad y de contenido de arcilla en peso.

**Figura 30.** Porosidad en función de la fracción de peso total de arcilla.

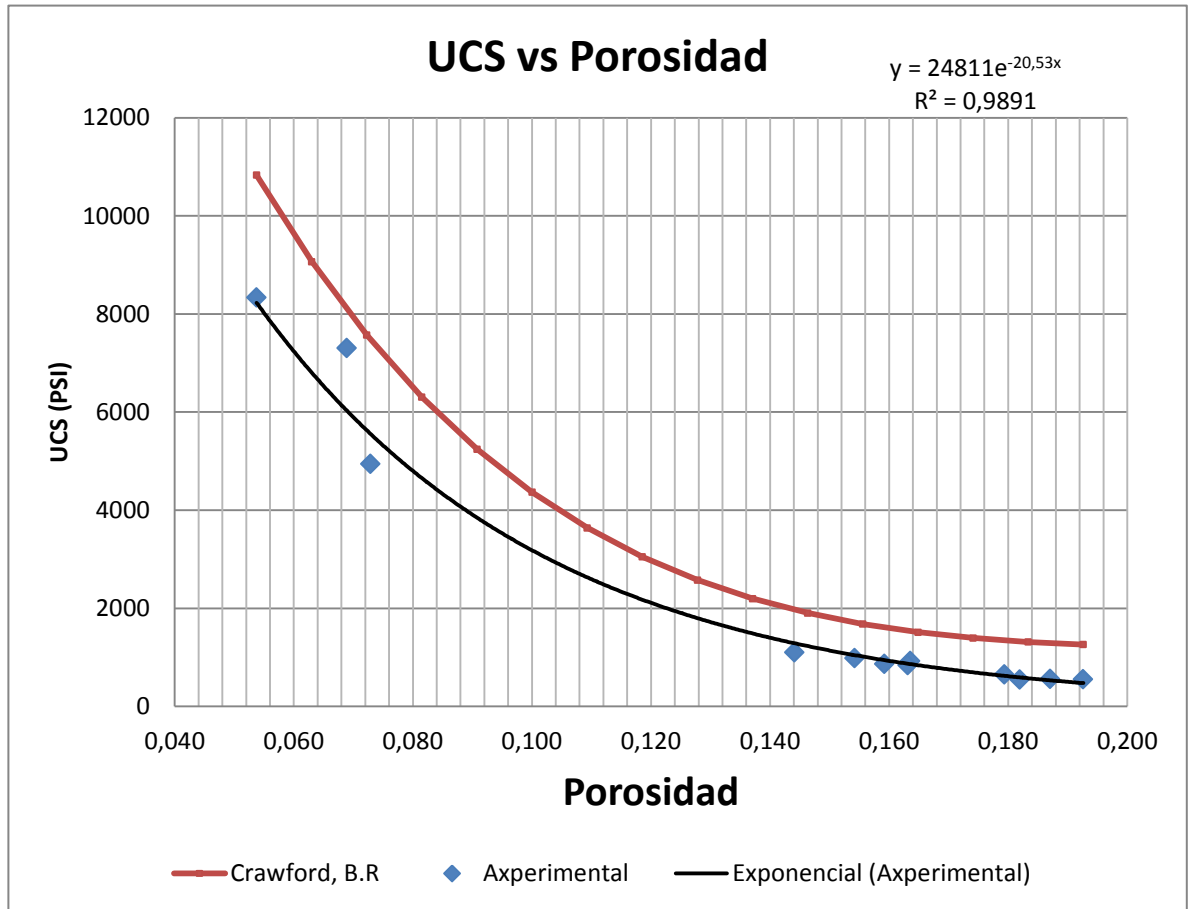


Fuente: Crawford, B.R., Gaillot, P.J. and Alramahi, B. Petrophysical Methodology for Predicting Compressive Strength in Siliciclastic "sandstone-to-shale" Rocks. 2010. Pag 6.

Usando las curvas de tendencia propuestas por Crawford, B.R para la cohesión y el ángulo de fricción Interno "AFI" desarrollada en su trabajo se pueden inferir el UCS utilizando el criterio Mohr Coulomb, el cual es el modelo más completo de correlaciones encontrado en el estado del arte, que tiene en cuenta las dos variables más significativas de soporte de la roca y a su vez pueden ser ajustada fácilmente si se cuenta con datos discretos de laboratorio.

En la siguiente grafica se muestra la relación entre la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS) y la porosidad para las muestras tanto de afloramiento como las compactadas con la celda de carga (línea azul); a sí mismo la línea rojo es la predicción de la familia de curvas que propone Crawford, B.R para una roca con 50% de arcilla y el mismo rango de porosidades de las rocas ensayadas.

**Figura 31.** Cambio de la Resistencia a la Compresión Uniaxial ante la variación de la porosidad para las muestras de la formación Los Cuervos y la tendencia propuesta por Crawford, B.R



Fuente: Autor.

Para los datos obtenidos de las muestras de afloramiento y las muestras consolidadas se puede extraer una correlación aplicable solo para la zona con contenido de arcilla por encima de 50% en volumen. Sin embargo es necesaria la retroalimentación de los valores para mayor confiabilidad al momento de ser corrida en pozo.

## 6. REGISTRO DE POZO

La formación Los Cuervos como se expuso con anterioridad, cuenta con tres litologías en el cual se encuentra: Shales (limolitas), Sand and shales (arenas arcillosas) y sand (Arenas).

Antes de la salida de campo para la búsqueda de los especímenes de roca fue necesario un trabajo de registros de pozo para comprender la litología de la formación, para ello se trabajo con 3 registros:

Gamma Ray o GR: Para el cálculo del índice de contenido de arcilla y el Vsh o volumen de arcilla

Neutrón o NPSS: Responden a la presencia de hidrogeno del gas y el agua, por tanto nos muestran la porosidad de la formación.

Density o RHOB: Proporciona el valor de la densidad de la roca,

Caliper: Representa el ancho del agujero del pozo. Este registro genera un perfil de estado de daño del agujero del pozo.

BS: Muestra el ancho de la sarta de perforación o broca.

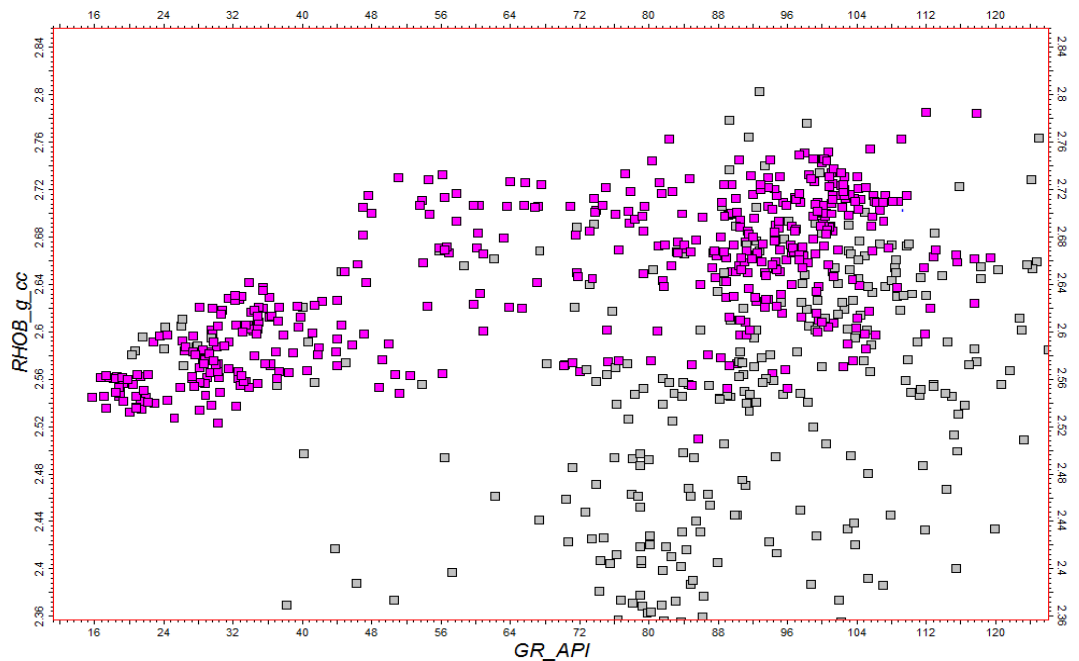
El análisis y la interpretación litológica se logran por medio de Croosplots los cuales ayudan a identificar el tipo de roca. La interpretación cualitativa de estos crossplots se basa en la transformación de las respuestas encontradas en el registro de pozo y los componentes litológicos de elementos minerales.

## 6.1 CROSSPLOT

Se escogieron 6 pozos candidatos para su análisis, inicialmente se ejerce un tratamiento para corregir los registros ya que la formación presenta normalmente daños de estabilidad y los registros como el density (RHOB) pueden estar alterados debido.

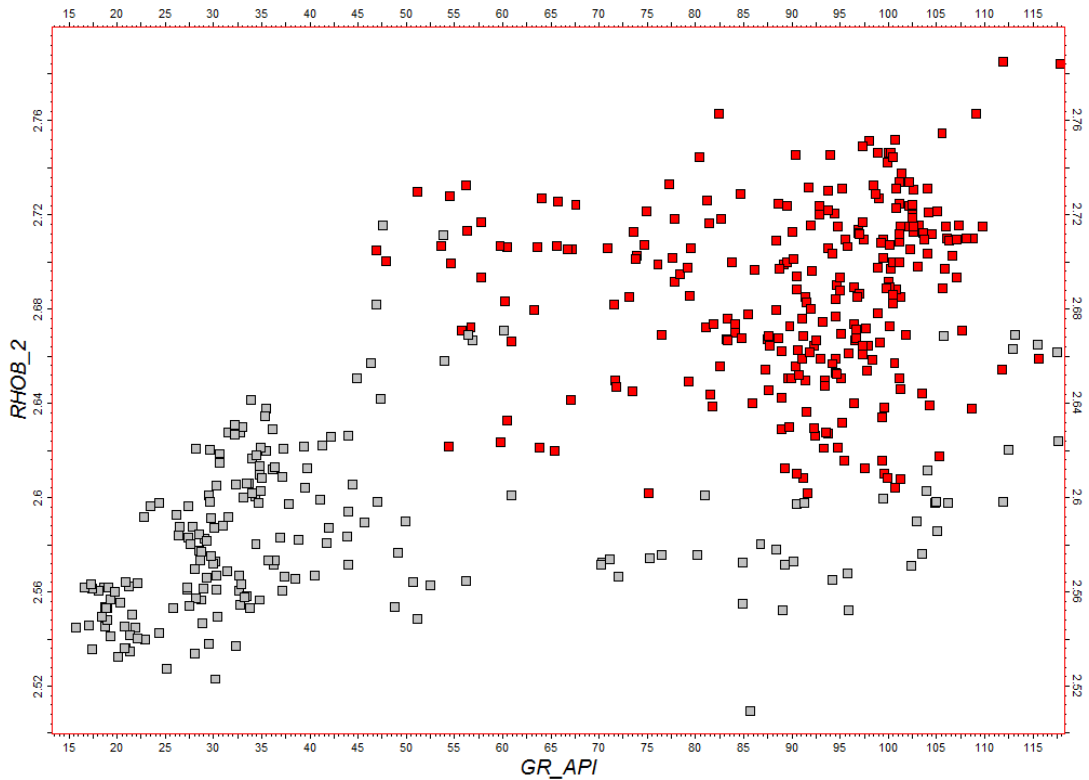
En la Figura 32 se observa la variación del contenido arcilla y la densidad de la formación, es evidente dos de las zonas de interés para el pozo UIS1, a un GR por debajo de 45 se presentan las arenas (Sand), y por encima 87 se encuentran las lutitas (Shales), la transición entre estas son las arenas arcillosas (Sand and Shale); En esta grafica se eliminan los valores de Density (RHOB) en la cual el CALIPER presenta daños; el arreglo de los valores se presentan en la Figura 33.

**Figura 32.** Densidad (RHOB) contra contenido de arcilla (Gamma Ray) para la formación Los Cuervos, Pozo UIS1



Fuente: Autor: Petrel 2009

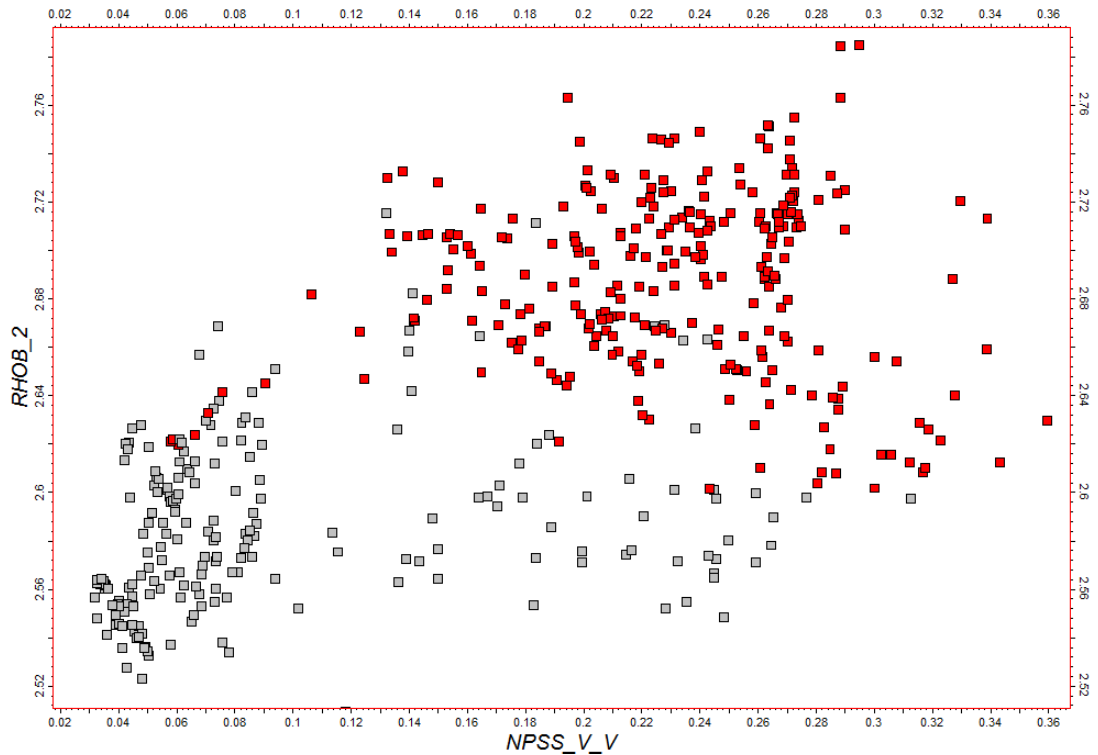
**Figura 33.** Densidad corregida (RHOB) contra contenido de arcilla (Gamma Ray) para la formación Los Cuervos, Pozo UIS1.



Fuente: Autor: Petrel 2009.

En la Figura 35 se encuentra el registro del pozo UIS1 en donde en la primer columna aparece el registro CALIPER y el BS, en la segunda columna el GR en la tercera la porosidad o Neutron (NPSS), la cuarta y sexta se encuentran los valores de la densidad RHOB\_2 corregida y densidad RHOB leída. Y por último en la columna quinta se encuentra la caracterización litológica.

**Figura 34.** Densidad corregida (RHOB) contra porosidad Nuetron (NPSS) para la formación Los Cuervos, Pozo UIS1.



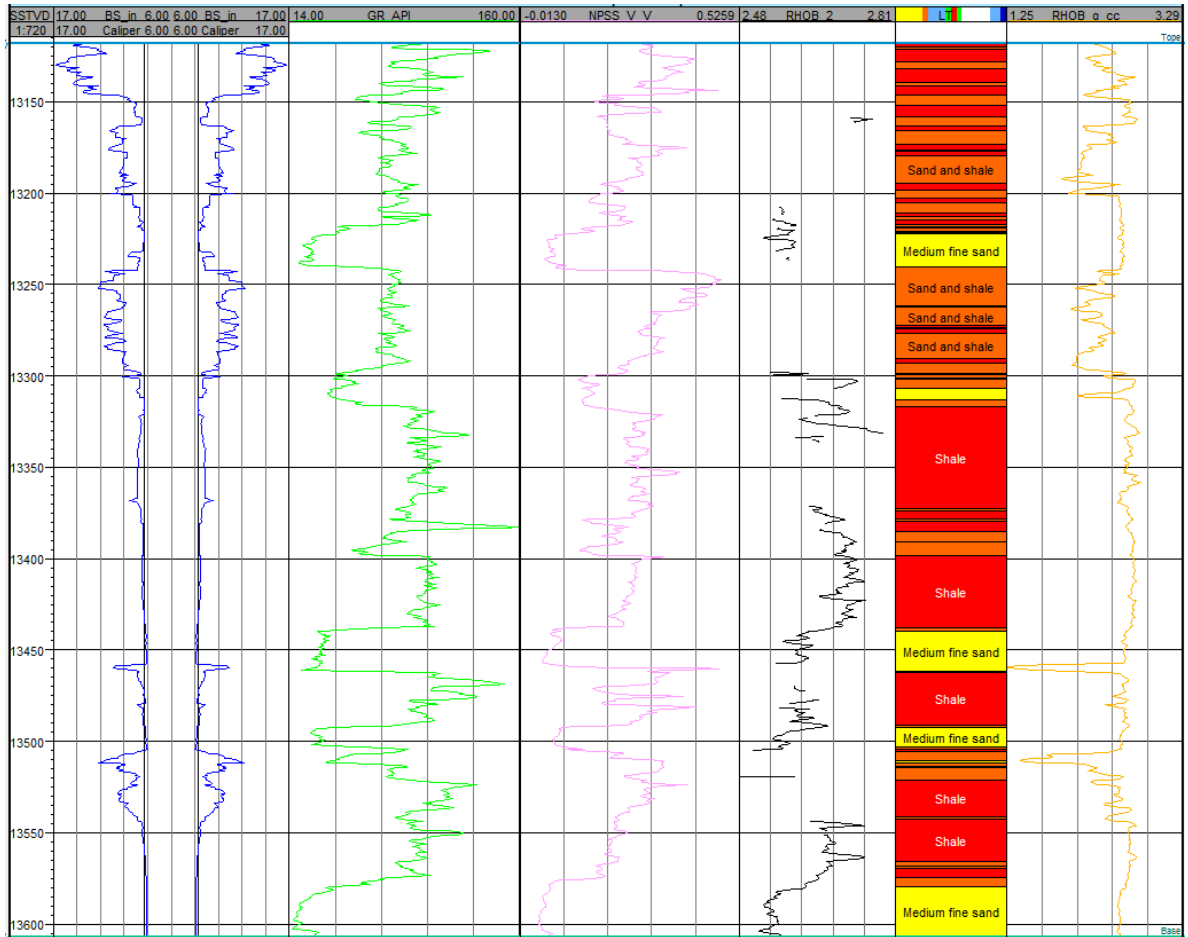
Fuente: Autor.

En la Figura 35 también es evidencia el cambio de la litología.

Este mismo proceso se realiza para los 6 pozos en la zona de Los Cuervos, pero por motivos práctico solo se expone el pozo que denomino UIS1.

La interpretación de registros requiere tener en cuenta estudio detallada e interpretación cuidados de toda la información, esto no sé expondrá con detalle.

**Figura 35.** Registros de Pozo para UIS1.



Fuente: Autor. Petrel 2009.

Al final es posible obtener una caracterización litológica del pozo.

### 6.3 APLICACIÓN DE LA CORRELACIONES PROPUESTA

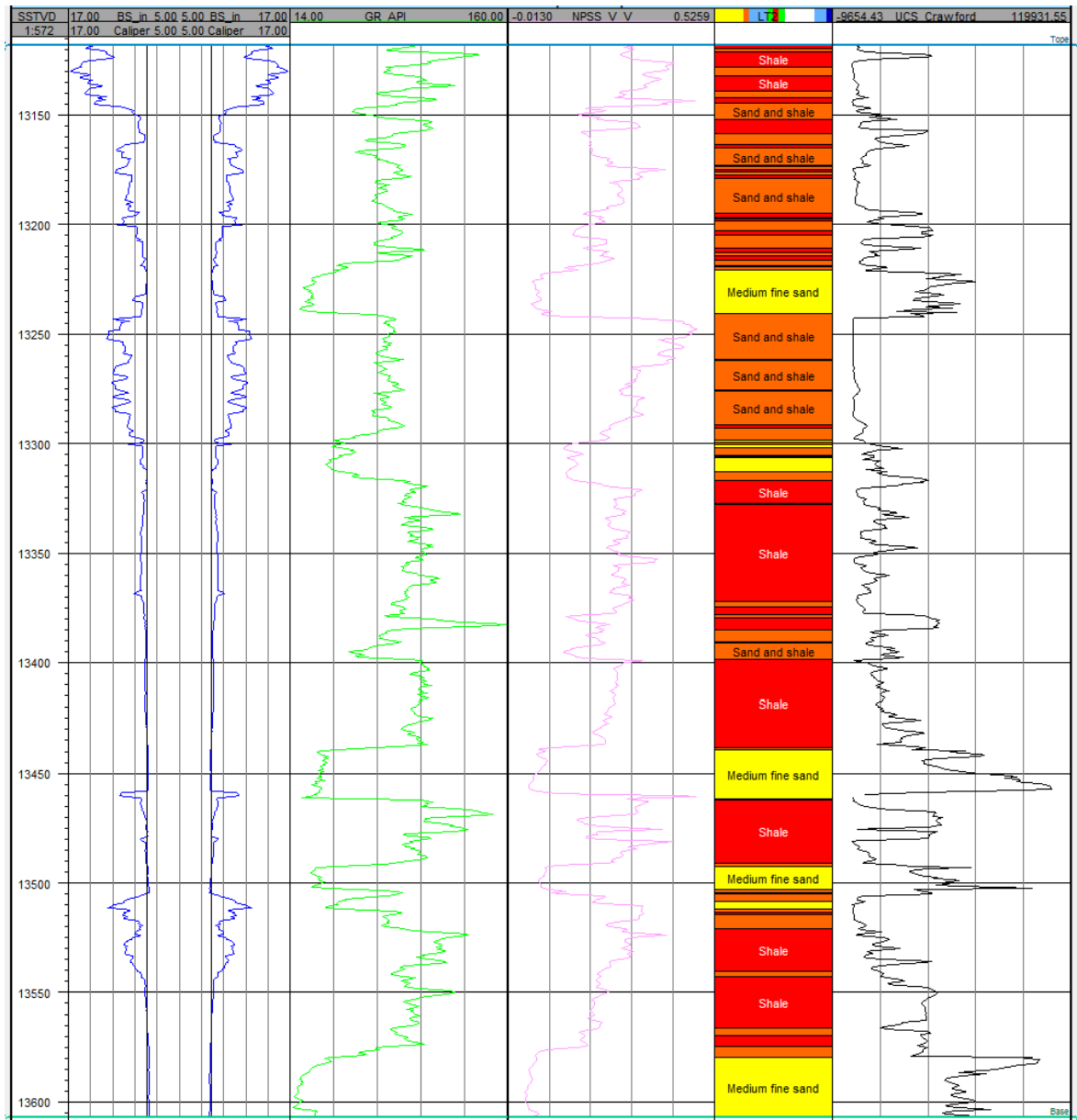
Para cada pozo se genera un perfil de UCS amarrado a los registros de pozo en función de contenido de arcilla extraída del GR y la porosidad leída del registro Neutron (NPSS).

Inicialmente se genera el índice de Rayos Gama " $I_{GR}$ " (Ecuaciones 17) luego se multiplica por el factor 0.7 para escalarlo a "peso de arcilla  $W_c$ " [25]; para cada porcentaje en peso de arcilla obtenido se genera una grafica de tendencia en función de la porosidad, posteriormente se corrige el registro de porosidad (NPSS) debido al aporte de contenido de hidrogeno de las arcillas, eso se realiza en funciones de  $I_{GR}$ .

La predicción de la resistencia genera un buen ajuste según la Figura 35, el rango de profundidad entre 13350ft y 13250ft donde se encuentran arenas arcillosas (Sand and Shale) la resistencia de la roca "UCS" presenta valores cercanos a 1500Psi, porosidades altas (Columna 2) a sí mismo el registro CALIPER (Columna1 Figura 26) se encuentra alterado por efecto de inestabilidad en las paredes de pozo.

Por otro lado en zonas con profundidades entre 13328ft y 13372ft se puede observar un alto contenido de arcilla, moderados valores de porosidad, y valores altos entre 11600Psi de UCS, para esta zona el registro CALIPER muestra estabilidad de las paredes del pozo. Según la Figura 36 son las arenas arcillosas las que generan daños a la formación, debido a altos valores de porosidad.

**Figura 36.** Predicción en Registros de Pozo de UCS para UIS1.



Fuente: Autor. Petrel 2009.

## CONCLUSIONES

Por medio de la metodología de correlaciones fue posible corroborar que la resistencia se reduce cuantitativamente con el aumento de la porosidad y el contenido de arcilla como lo señalan los diferentes autores; esta reducción obedece a la disminución de carga de material al aumentar la porosidad y volumen de matriz arcillosa.

El trabajar con formaciones arcillosas implica un mayor cuidado debido a que estas presentan problemas de interacción química con los diferentes fluidos, cohesiones bajas y sensibilidad para generar geometría convencional (PLUG), debido a esto, es de gran ayuda trabajar con la celda de carga ya que nos proporciona informaciones extra de muestras poco consolidadas y difíciles de manipular, a su vez puede explicar de mejor manera el fenómeno natural de compactaciones.

El uso de la saturación de la roca fue útil en el momento que se quería controlar la porosidad de los especímenes, sin embargo para esta tesis no fue posible controlar la variable “porosidad” sin alterar la “saturación”. Es necesario afirmar que la salinidad del fluido saturante puede alterar los resultados mecánicos si se excede la concentración a la cual la arcilla se mantiene estable.

Dentro de las mejores correlaciones publicadas en la literatura y aplicadas en esta tesis la tendencia propuesta por Crawford, B.R en su trabajo podría ser la más acertada a nivel general, para formaciones arenosas y arcillosas.

La formación Los Cuervos siempre ha sido una formación difícil de caracterizar y modelar debido a la dificultad de manipular muestras de su litología. Mediante este trabajo fue posible adquirir información de propiedades mecánicas de la Formación Los Cuervos que antes no se tenía, para alimentar la confiabilidad en la predicción del comportamiento mecánico.

## RECOMENDACIONES

Es posible mediante consolidación en la celda de carga generar variaciones en el contenido de arcilla a presión de consolidación constante para evaluar el cambio de la resistencia inconfiada ante en cambio del contenido de arcilla.

Es importante alimentar las correlaciones encontradas en la formación Los Cuervos con más especímenes de pozo y afloramiento, para aumentar de esta forma el grado de confiabilidad de los datos obtenidos en esta tesis.

Los valores obtenidos del volumen de arcilla "Vsh" obtenida de los registros deben ser calibrados con información obtenida del la Difracción De Rayos X (DRX) para la mismas zona de estudio, esto para una mejor relación entre el IR y el DRX y posterior caracterización de la formación de estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martin P.J. Schopfer, Steffen Abe, Conrad Childs, John J. Walsh The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: Insights from DEM modeling. 2008
- [2] Is-ik Yilmaz. Influence of water content on the strength and deformability of gypsum. Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, 58140 Sivas, Turkey
- [3] Engin C. Koncagul, Paul M. Santi. Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties. Department of Geological and Petroleum Engineering, School of Mines and Metallurgy, University of Missouri-Rolla, 1998.
- [4] Woehrl B, Pei J, Renner J. Comparison of Methods to Derive Rock Mechanical Properties from Formation Evaluation Logs. 2010.
- [5] Kuhn, B.T, MacLaughlin M.M. Hudyma, N. Relationships between Unit Weight, Unconfined Compressive Strength, and Deformation Modulus of Vesicular Basalt. 2010.
- [6] Mohammad Nabaei, Khalil Shahbazi. Uncertainty Analysis in Unconfined Rock Compressive Strength Prediction. SPE, Petroleum University of Technology, Arash Shadravan, Islamic Azad University. 2010.
- [7] J-P. Sarda, Nicolas Kessler, Emmanuelle Wicquart, Gaz de France; Kevin Hannaford, Use of Porosity as a Strength Indicator for Sand Production Evaluation. 1993.
- [8] Z.A. Erguler, R. Ulusay Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. 2007.

- [9] Chandong Chang, Mark D. Zoback, Abbas Khaksar. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Department of Geophysics, Stanford University, GeoMechanics International. 2006.
- [10] B. Vásárhelyi, P. Ván. Influence of water content on the strength of rock. Department of Building Mat. & Engng. Geol., Department of Chemical Physics. 2005
- [11] A. Khaksar, P.G. Taylor, Z. Fang, T. Kayes, A. Salazar, K Rahman; SPE, Helix RDS. Rock Strength from Core and Logs, Where We Stand and Ways to Go. 2009.
- [12] A. Fakhimi, E. Alavi Gharahbagh, Discrete element analysis of the effect of pore size and pore distribution on the mechanical behavior of rock. Department of Mineral Engineering, New Mexico Tech, Socorro, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University 2010.
- [13] Mohammed S. Ameen, Brian G.D. Smart, J.Mc. Somerville, Sally Hammlton, Nassir A. Najj. Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia). Structural Geology and Rock Mechanics Group, Geological Technical Services Division, Exploration Technical Services Department, Saudi Aramco, Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Riccarton Campus.
- [14] A.A. Al-Harhi, R.M. Al-Amri, W.M. Shehata. The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia. *Department of Engineering Geology, Faculty of Earth Sciences, King Abdulaziz University. 1999*
- [15] Mao Haijun, Yang Chunhe, Liu Haiming, Study on mechanical properties of slates in different conditions. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering. 2010.

- [16] Soroush, H. A rapid method for real-time evaluation of formation strength. Technical and Soil Laboratory, Tehran, Iran. Currently with Geomechanics International Inc., Perth, Australia. 2008
- [17] Ore Alm. The effect of water on the mechanical properties and microstructures of granitic rocks at high pressures and high temperatures. Research Scientist, Division of Rock Mechanics, University of Lule, Swede
- [18] B. Velde, Compaction trends of clay-rich deep sea sediments. Laboratoire de Gkologie, UR 1316 CNRS, Ecole Normale Suptrieure, 24 rue Lhomond, 75231, Paris, France. 1996.
- [19] F.G. Bell, P. Lindsay. The petrographic and geomechanical properties of some sandstones from the Newspaper Member of the Natal Group near Durban, South Africa. *Department of Geology and Applied Geology, University of Natal, Durban 4041, South Africa. 1998*
- [20] Dewhurst, D.N., Siggins, A.F., Kuila, U., Clennell, M.B. Raven, M.D. Nordgård-Bolås, H.M. Elastic, Geomechanical and Petrophysical Properties of Shales. CSIRO Petroleum, Kensington, Western Australia, Australia, CSIRO Land and Water, Urrbrae, South Australia, Australia, StatoilHydro Research Centre, Trondheim, Norway. 2008
- [21] Manohar Lal. Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength, SPE, BP Amoco. 1999.
- [22] Per Horsrud, Estimating Mechanical Properties of Shale From Empirical Correlations. SPE, SINTEF Petroleum Research.
- [23] P. Horsrud, E. F. Sonstebo, R. Boe, Mechanical and Petrophysical Properties of North Sea Shales.

[24] Tosin Odunlami, Hamed Soroush and Paul Kalathingal, Weatherford, Jim Somerville. Log-Based Rock Property Evaluation - A New Capability in A Specialized Log Data Management Platform. Heriot-Watt University. 2011.

[25] Crawford, B.R. Gaillot, P.J. and Alramahi, B. Petrophysical Methodology for Predicting Compressive Strength in Siliciclastic "sandstone-to-shale" Rocks. 2010.