

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ROCAS YACIMIENTO EN CUENCAS
SEDIMENTARIAS DE COLOMBIA, CON BASE EN INFORMACIÓN DISPONIBLE EN
EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL ICP**

**DANIEL HERNÁNDEZ CARRILLO
NICOL MAURICIO PINZÓN CORZO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ROCAS YACIMIENTO EN CUENCAS
SEDIMENTARIAS DE COLOMBIA, CON BASE EN INFORMACIÓN DISPONIBLE EN
EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL ICP**

**DANIEL HERNÁNDEZ CARRILLO
NICOL MAURICIO PINZÓN CORZO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos**

**Avalado por el grupo de Estabilidad de pozo en el marco del Acuerdo de
Cooperación AC. 18 derivada del Convenio 5222395 entre la Universidad
Industrial de Santander y ECOPETROL S.A. – Instituto Colombiano del
Petróleo**



**Directora
Ph.D. ZULY HIMELDA CALDERÓN CARRILLO**

**Codirector
M.Sc. NESTOR FERNANDO SAAVEDRA
M.Sc. JENNY MABEL CARVAJAL
QUÍMICO. JHOAO VILLABONA CAMACHO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios por brindarme sabiduría, guiarme y permitirme realizar este proyecto.

A mi hermano David por su amor y apoyo incondicional durante estos años.

A mi hermana Tatiana por su confianza y fe en los proyectos realizados.

A mis padres que amo por su comprensión, amor y sacrificio durante mis años de vida.

A mi familia por brindarme su afecto y apoyo.

A mis amigos por brindarme felicidad en los momentos difíciles.

A la universidad por permitirme educarme y poder adquirir conocimiento.

DANIEL HERNÁNDEZ

DEDICATORIA

A Dios por permitirme tantas oportunidades en mi formación profesional y su amor incondicional.

A mi hermano Andres por sus enseñanzas, amor y comprensión en mi vida.

A Simoncho por sus ocurrencias, colmarme de alegría y su gran amor.

A mis padres que amo tanto y que han sido pilares en mi formación.

A mi nona por brindarme tanto amor, guiarme y siempre estar en los momentos más difíciles.

A mis amigos que me acompañaron durante la gestión de este título.

A mi alma máter por educarme y formarme como profesional en esta gran carrera.

MAURICIO PINZÓN

AGRADECIMIENTOS

Los autores extienden sus agradecimientos a:

El grupo de investigación “Estabilidad de pozo” por habernos dado la oportunidad de realizar este trabajo.

A la Ing. Zuly Himelda Calderón por su valiosa asesoría y consejos y por confiar en nosotros y en nuestras capacidades.

Al Ing. Néstor Fernando Saavedra por su colaboración.

A la Ing Jenny Mabel Carvajal por su paciencia, enseñanzas, colaboración y su oportuna orientación.

Al Ing Jhoao Villabona por confiar y permitirnos pertenecer a este proyecto.

.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
1. GEOMECÁNICA DE YACIMIENTOS	20
1.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ROCAS.....	22
1.1.1 Propiedades físicas y mecánicas de algunas rocas	23
1.2 PROPIEDADES DE LA RESISTENCIA DE LA ROCA	26
1.2.1 Resistencia a la compresión no confinada (UCS).....	26
1.2.2 Angulo de fricción interna (AFI, ϕ)	26
1.2.3 Cohesión de la roca (C_o).....	27
1.2.4 Resistencia a la tensión (T_o)	27
1.2.5 Resistencia a la compresión con confinamiento (CCS)	28
1.2.5.1 Presión de confinamiento (P_c)	28
1.3 PROPIEDADES ELASTICAS DE LA ROCA.....	29
1.3.1 Módulo de Young o de elasticidad (E)	30
1.3.2 Relación de Poisson (ν)	31
1.4 COMPRESIBILIDAD DE LA ROCA.....	32
1.4.1 Coeficiente de Biot (α).....	33
1.5 TIPOS DE FALLA DE LA ROCA.....	33
1.5.1 Fallas Por Compresión	35
1.5.1.1 Breakout	35
1.5.1.2 Falla Tórica	36
1.5.1.3 Falla Helicoidal.....	36
1.5.1.4 Falla Alargada.....	36

1.5.2	Falla Por Tensión	37
1.5.2.1	Fractura Hidráulica.....	37
1.5.2.2	Falla Por Exfoliación	39
1.6	ESFUERZOS IN SITU.....	39
1.7	PRESIÓN DE PORO.....	41
1.8	CRITERIOS DE FALLA	45
1.8.2	Criterio de falla Mohr Coulomb	45
1.8.3	Criterio de falla Hoek Brown	48
1.8.4	Criterio de Von Mises	51
1.8.5	Criterio de falla por tensión.....	52
2	CONCEPTOS ESTADÍSTICOS APLICADOS A LA GEOMECÁNICA	53
2.1	ENFOQUE PROBABILISTICO DE LA ESTABILIDAD DE POZO	53
2.2	REVISIÓN DE CONCEPTOS ESTADÍSTICOS	57
2.2.1	Media aritmética para datos agrupados	57
2.2.1.1	Marca de clase	58
2.2.2	Mediana	58
2.2.3	Moda.....	59
2.2.4	Varianza	59
2.2.5	Desviación estándar	59
2.2.6	Histograma de frecuencias	60
2.2.7	Diagrama de cajas y bigotes	60
2.2.8	Distribución de probabilidades	61
2.2.8.1	Distribución de probabilidad normal	62
2.3	Distribuciones de probabilidad utilizados en estabilidad de pozos	64
2.4	ANÁLISIS ANOVA	65
3.	METODOLOGÍA DE TRABAJO PROPUESTA.....	67

3.1	METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LAS FORMACIONES SELECCIONADAS	70
3.1.1	Planteamiento de Hipótesis	70
3.1.2	Supuesto de Normalidad	71
3.1.2	Supuesto de Independencia	71
3.1.3	Supuesto de Homogeneidad de varianzas o de (Homocedasticidad)	71
3.1.4	Pruebas Post-Hoc.	72
4.	TRATAMIENTO DE DATOS	76
4.1	CONSOLIDADO BASE DE DATOS LMR DEL ICP	76
4.1.1	Criterios de selección de las formaciones de estudio	76
4.1.2	Breve descripción de las formaciones de estudio	79
4.2	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA FORMACIÓN LA LUNA	87
4.2.1	Resistencia a la tensión (T_o), formación la luna	88
4.2.2	Resistencia a la Compresión no confinada (UCS), formación la Luna.	93
4.2.3	Angulo de fricción interna (AFI), formación la Luna	99
4.2.4	Relación de Poisson (ν), formación la Luna.	103
4.2.5	Módulo de Young (E), formación la Luna.	107
4.3	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA FORMACIÓN GACHETA	111
4.3.1	Resistencia a la tensión T_o , formación Gacheta.	112
4.3.2.	Cohesión C_o , formación Gacheta.....	114
4.3.3.	AFI, formación Gacheta.....	115
4.3.4	(ν), formación Gacheta.	116
4.3.5	UCS extrapolados de EFM, formación Gacheta.	117
4.3.6	(E), formación Gacheta.	119
4.4	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA FORMACIÓN MIRADOR	120
4.4.1	C_s , formación Mirador.....	120
4.5	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA FORMACIONES DE ESTUDIO	130

5. CONCLUSIONES	136
6. RECOMENDACIONES.....	138
BIBLIOGRAFÍA.....	139

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Relación esquemática del peso de lodo y las fallas de pozo. MW: Peso de lodo, PP: Presión de poro, SFG: Gradiente de presión de colapso, FG: Gradiente de fractura. (Zhang et al. 2008)	21
Figura 2 Gráfico de Deere-Miller.	24
Figura 3 Esquema de la prueba brasilera para prueba de materiales.	28
Figura 4 Fallas por compresión o cizalla.	35
Figura 5 Fallas por tensión.	38
Figura 6 Esquema de los esfuerzos in situ.	40
Figura 7 Esquemmatización del Modelo de Terzaghi y Peck (1948).	42
Figura 8 Circulo de Mohr-Coulomb.	46
Figura 9 Representación envolvente de falla Mohr-Coulomb.	47
Figura 10 Envolventes de falla del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b), representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa.	49
Figura 11 Envolvente de falla Von Mises.	52
Figura 12 Esquema de los parámetros involucrados en la estabilidad de pozo.	54
Figura 13 Representación diagrama de caja y bigotes.	61
Figura 14 Distribución de probabilidad normal.	64
Figura 15 Procedimiento de muestras en LMR del ICP.	67
Figura 16 Línea temporal de trabajo en el LMR del ICP.	69
Figura 17 Diagrama de flujo para el análisis ANOVA de un factor.	74
Figura 18 Diagrama de flujo para el supuesto de Normalidad.	75
Figura 19 Columna Estratigráfica de la Formación La Luna.	81

Figura 20 Columna Estratigráfica Generalizada del Piedemonte Llanero.....	83
Figura 21 Sección estratigráfica al sur de la cuenca Llanos Orientales ubicación pozo Gaván 1.....	85

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfico 1 Histograma de frecuencias (unidades) de las diferentes pruebas realizadas en las formaciones de estudio.	79
Gráfico 2 Histograma de frecuencias en la formación la luna para miembro Galembo. ..	89
Gráfico 3 Histograma de frecuencias de UCS para la formación la Luna.....	98
Gráfico 4 Histograma de frecuencias (v) para la formación la Luna	104
Gráfico 5 Histograma de frecuencias para (E) en la formación la Luna en el miembro Galembo.	108
Gráfico 6 Histograma de frecuencias para la To en la formación Gacheta.....	113
Gráfico 7 Histograma de frecuencias para el (E) en la formación Gacheta	120
Gráfico 8 Rango de valores de Cs (1/psi) en las diferentes muestras	123
Gráfico 9 Histograma de frecuencias Cs.....	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas.	24
Tabla 2 Ángulos de fricción interna de algunas rocas.....	25
Tabla 3 Resistencia a la compresión uniaxial de diferentes rocas	25
Tabla 4 Relaciones existentes entre módulos elásticos en materiales isotrópicos.....	30
Tabla 5 Pruebas geomecánicas para el estudio de estabilidad de pozo.....	31
Tabla 6 Causas de la inestabilidad de pozos.....	34
Tabla 7 Fallas por compresión de acuerdo con sus esfuerzos. σ_θ : Esfuerzo Tangencial, σ_z : Esfuerzo Vertical, σ_r : Esfuerzo Radial.	36
Tabla 8 Métodos utilizados en la estimación de la presión de poro.	43
Tabla 9 Estimación de la constante m_i del material intacto en función del tipo de roca. Los parámetros entre paréntesis son aproximados	51
Tabla 10 Propiedades medidas de laboratorio en rocas intactas.	55
Tabla 11 Rangos de variación de los datos de entrada con base en los diferentes enfoques de cuantificación de incertidumbre para la formación la Luna	57
Tabla 12 Distribuciones de probabilidad de los parámetros de entrada utilizados en diferentes estudios de estabilidad de pozo con un enfoque probabilístico.	65
Tabla 13 Compilación de datos de los diferentes ensayos realizados en el LMR del ICP. (Número de ensayos)	78
Tabla 14 Base de datos para resistencia a la tensión (incompleta).	87
Tabla 15 Pruebas de normalidad para T_o en la Luna.	88
Tabla 16 Descriptivos estadísticos en la formación la luna para miembro Galembo.	90
Tabla 17 Prueba de homogeneidad de varianzas de la resistencia a la tensión para la formación la Luna para el modelo de los tres miembros	90
Tabla 18 Estadísticos descriptivos de T_o para la formación La Luna	91

Tabla 19 Pruebas de comparaciones múltiples de la To por el método de Gabriel para Formación la Luna	92
Tabla 20 ANOVA de un Factor de To para un modelo de miembros de la formación la Luna	93
Tabla 21 Descriptivos para UCS en la formación La Luna.....	94
Tabla 22 Pruebas de normalidad para UCS en la formación La Luna.	94
Tabla 23 Prueba de homogeneidad de varianzas de UCS de la formación la Luna para el modelo de los tres miembros	96
Tabla 24 Prueba post-hoc de Gabriel para el UCS de la formación la Luna	97
Tabla 25 Prueba ANOVA para el UCS de la formación la Luna.....	99
Tabla 26 Descriptivos para el AFI de la formación la Luna	100
Tabla 27 Pruebas de normalidad para el AFI de la formación la Luna.....	100
Tabla 28 Prueba de homocedasticidad para el AFI de la formación la Luna	101
Tabla 29 Prueba Post-hoc de Gabriel para el AFI de la formación la Luna.....	101
Tabla 30 Prueba ANOVA para el AFI de la formación la Luna	102
Tabla 31 Pruebas de normalidad para la (v) de la formación la Luna	103
Tabla 32 Descriptivos para la (v) de la formación la Luna	104
Tabla 33 Prueba de homocedasticidad para la (v) de la formación la Luna	105
Tabla 34 Prueba Post-hoc de Gabriel para la (v) de la formación la Luna	105
Tabla 35 Prueba ANOVA para la (v) de la formación la Luna	106
Tabla 36 Pruebas de normalidad para el (E) de la formación la Luna.....	108
Tabla 37 Descriptivos para el (E) de la formación la Luna.....	109
Tabla 38 Prueba de homocedasticidad para el (E) de la formación la Luna	110
Tabla 39 Prueba Post-hoc de Gabriel para el (E) de la formación la Luna	110
Tabla 40. Prueba ANOVA para el E de la formación la Luna.....	111
Tabla 41 Estadísticos descriptivos para la To de la formación Gacheta.	112

Tabla 42 Pruebas de normalidad para la To de la formación Gacheta.	114
Tabla 43 Estadísticos descriptivos Co en la formación Gacheta.....	114
Tabla 44 Pruebas de normalidad Co en la formación Gacheta.....	115
Tabla 45 Estadísticos descriptivos del AFI en la formación Gacheta.	116
Tabla 46 Pruebas de normalidad del AFI en la formación Gacheta.	116
Tabla 47 Estadísticos descriptivos de la (v) en la formación Gacheta.	117
Tabla 48 Pruebas de normalidad de la (v) en la formación Gacheta.	117
Tabla 49 Estadísticos descriptivos de la UCS en la formación Gacheta.	118
Tabla 50 Pruebas de normalidad de la UCS en la formación Gacheta.	118
Tabla 51 Estadísticos descriptivos del (E) en la formación Gacheta.....	119
Tabla 52 Pruebas de normalidad del (E) en la formación Gacheta.....	120
Tabla 53 Valores asignados a las diferentes muestras para el ingreso al software	121
Tabla 54 Prueba de normalidad para Cs en la formación mirador.	122
Tabla 55 Pruebas de normalidad formación mirador.	124
Tabla 56 Prueba de homocedasticidad para Cs formación Mirador.....	125
Tabla 57 Pruebas Post-hoc para Cs formación Mirador.	127
Tabla 58 Valores estadísticos descriptivos para Cs formación Mirador.	130
Tabla 59 Tipo de distribución de probabilidad de diferentes parámetros mecánicos de las formaciones de estudio.....	130
Tabla 60 Consolidado de medias de las formaciones de estudio.	135

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ROCAS YACIMIENTOS EN CUENCAS SEDIMENTARIAS EN COLOMBIA, CON BASE EN INFORMACIÓN DISPONIBLE EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL ICP.

AUTOR: DANIEL HENÁNDEZ CARRILLO, MAURICIO PINZÓN CORZO.

PALABRAS CLAVE: ANOVA, propiedades mecánicas, estabilidad de pozo, incertidumbre, modelo, análisis, probabilidad.

DESCRIPCIÓN:

La caracterización del comportamiento mecánico de rocas yacimiento se realiza en la industria de los hidrocarburos con el fin de; minimizar problemas asociados a la estabilidad de pozos, diseñar programas de fracturamiento hidráulico, modelar el movimiento de fluidos y a predecir como la remoción o la inyección de fluidos produce cambios en la permeabilidad, la presión de fluido y los esfuerzos locales. Una correcta caracterización se obtiene mediante propiedades mecánicas obtenidas de ensayos de laboratorio.

Los parámetros geomecánicos son difíciles de conocer debido a la información insuficiente y la necesidad de extrapolar la información disponible sobre un rango de profundidad para el cual cualquier parámetro dado puede variar como función de la profundidad. Un problema adicional se relaciona con la incertidumbre intrínseca o error asociado con cada medida. Para cuantificar los efectos de estas incertidumbres sobre las predicciones de estabilidad de pozo se hace necesario usar métodos probabilísticos

Un análisis estadístico permite recoger, organizar y analizar una población de datos, dado el caso de diferentes propiedades mecánicas de la roca, para obtener conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en tal análisis. Con el fin de describir e interpretar la población estudiada y disminuir rangos de incertidumbre de las formaciones colombianas representadas por medidas obtenidas de una sola muestra.

El trabajo propuesto constituye la estimación de propiedades mecánicas de rocas yacimiento de forma probabilística mediante un análisis ANOVA, una herramienta muy útil donde se involucra la decisión bajo incertidumbre, con el fin de construir futuros modelos geomecánicos para las formaciones de estudio y de este modo minimizar los errores asociados con parámetros clave, maximizando a su vez la posibilidad de adoptar en una operación de estabilidad la decisión correcta.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ph.D. Zuly

H. Calderón Carrillo. Codirector: M.Sc. Nestor Saavedra, M.Sc Jenny Carvajal, Jhoao Villabona.

ABSTRACT

TÍTULO: MECHANICAL CHARACTERIZATION OF ROCAS DEPOSITS IN SEDIMENTARY BASINS IN COLOMBIA, BASED ON INFORMATION AVAILABLE IN THE ICP ROCK MECHANICS LABORATORY

AUTOR: DANIEL HENANDEZ CARRILLO, MAURICIO PINZÓN CORZO **

PALABRAS CLAVE: Anova, wellbore stability, sensitivity, analysis, uncertainty, probability, geomechanical parameters.

DESCRIPCIÓN:

The characterization of the mechanical behavior of reservoir rocks is carried out in the hydrocarbon industry in order to; minimize problems associated with well stability, design hydraulic fracturing programs, model fluid movement, and predict how fluid removal or injection produces changes in permeability, fluid pressure, and local stresses. A correct characterization is obtained by mechanical properties obtained from laboratory tests

Geomechanical parameters are difficult to know due to insufficient information and the need to extrapolate the available information over a range of depth for which any given parameter can vary as a function of depth. An additional problem is related to the intrinsic uncertainty or error associated with each measurement. To quantify the effects of these uncertainties on the predictions of well stability, it is necessary to use probabilistic methods.

A statistical analysis allows to collect, organize and analyze a group of data, as the different mechanical properties of the rock, to obtain valid conclusions and make reasonable decisions based on such analysis. In order to describe and interpret the population studied and reduce ranges of uncertainty of the Colombian formations represented by measurements obtained from a single sample.

The proposed investigation constitutes the estimation of mechanical properties of reservoir rocks with a probabilistic focus by means of an ANOVA analysis, a very useful tool where the decision is involved under uncertainty, in order to build geomechanical models for the study formations and in this way minimize the errors associated with key parameters, maximizing in turn the possibility of adopting the correct decision in a stability operation.

* Undergraduate project

** Physiochemical Engineerings Faculty. Petroleum Engineering School. Director: Ph.D. Zuly H. Calderón Carrillo. Codirector: M.Sc. Nestor Saavedra, M.Sc Jenny Carvajal, Jhoao Villabona

INTRODUCCIÓN

El estudio de la mecánica de rocas en la industria de los hidrocarburos ha presentado un auge en las últimas décadas con el propósito de solucionar problemas relacionados con la estabilidad de pozo, integridad de revestimientos, reactivación de fallas, compactación y subsidencia, e ineficiencia en el fracturamiento hidráulico entre otros.

La determinación de las propiedades mecánicas de la roca busca, entre muchas otras cosas, disminuir la incertidumbre en el desarrollo de un modelo geomecánico. Esta determinación requiere datos obtenidos en el laboratorio de mecánica de rocas tales como, UCS - Resistencia a la Compresión No-confinada, la cohesión (C_0), la resistencia a la tensión (T_0), el ángulo de fricción interna (AFI), módulos elásticos entre otros.

En el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del petróleo (ICP), existe una extensa base de datos de propiedades mecánicas de diferentes tipos de rocas en Colombia. Sin embargo, esta información se encuentra muy dispersa y sin un orden establecido adecuadamente. Un correcto y adecuado tratamiento ingenieril a toda esta información, permitiría la adecuada caracterización mecánica de rocas yacimiento de diversas cuencas sedimentarias en Colombia, lo cual es de vital importancia para la descripción y conocimiento de las mismas.

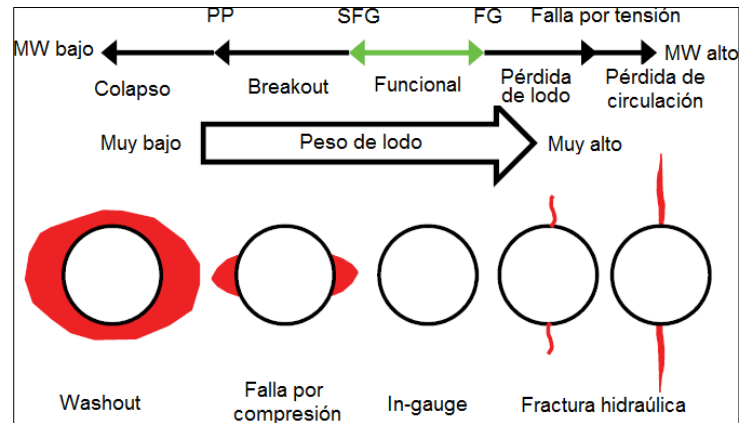
Mediante un tratamiento de análisis estadístico e incertidumbre de las propiedades mecánicas de la roca obtenidas en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP es posible brindar un proceso estocástico a los parámetros de entrada de resistencia de la roca y módulos elásticos para la construcción de modelos geomecánicos de tal forma que se logren resultados más realistas y se mejoren las bases para la toma de decisiones.

1. GEOMECÁNICA DE YACIMIENTOS

La geomecánica es el estudio de cómo se deforman los suelos y las rocas, hasta terminar a veces en su falla, en respuesta a los cambios de esfuerzos, presión, temperatura y otros parámetros ambientales. La geomecánica también desempeña un rol importante en la comprensión de la estabilidad y la integridad del pozo durante la perforación. A escala de pozo, la geomecánica resulta esencial para comprender los cambios producidos en operaciones de perforación, la presión del fluido de perforación induce cambios en el estado de los esfuerzos de la roca. Como resultado, la roca que rodea el pozo puede fallar si los esfuerzos redistribuidos superan la resistencia de la roca. La fisuración por tracción se produce si la presión del lodo se vuelve demasiado alta y genera tensión en la pared del pozo. Las ovalizaciones por ruptura de la pared del pozo, que ocurren si la presión del lodo se vuelve muy baja, son regiones de ensanchamiento en los lados opuestos de un pozo, en las que se ha producido fisuración por cizalladura y la roca fracturada ha sido removida con la barrena, los estabilizadores o el flujo de lodo. Estas fallas pueden producir problemas de atascamiento de la tubería, pérdida de circulación y otros problemas de perforación, pero también pueden constituir una fuente de información valiosa acerca de las magnitudes y las orientaciones de los esfuerzos. (Cook, 2008)

Guo et al. (2009) definió la ventana operacional de lodo como el rango entre el mínimo y máximo peso del lodo permitido. El peso mínimo del lodo es medido usando la presión de poro que se obtiene de los registros de densidad. El peso de lodo diseñado debe exceder el peso mínimo permitido para evitar el influjo de fluidos. Por razones de seguridad, un factor general de 200 psi se añade a la presión mínima del lodo (Islam et al. 2010). Si el peso del lodo es menor que el mínimo, el pozo se derrumbará porque la presión de la formación es mayor que la presión hidrostática creada durante la perforación. La presión del lodo tampoco debe ser mayor al esfuerzo horizontal mínimo, si es mayor hará que la formación se fracture, la fractura se propagara alrededor del área del pozo, causando la perdida de circulación de fluido de perforación. La Figura 1 muestra la relación del peso del lodo (o presión del lodo), la presión de poro, y la estabilidad del pozo en varias formas de falla del pozo. (M. Z. Yusoff, 2013)

Figura 1 Relación esquemática del peso de lodo y las fallas de pozo. MW: Peso de lodo, PP: Presión de poro, SFG: Gradiente de presión de colapso, FG: Gradiente de fractura. (Zhang et al. 2008)



Fuente: WILLIAM PAO., M.Z YUSOFF., 2013. Mud Weight Prediction for Deviated Drilling. Department of Petroleum Engineering Universiti Teknologi Petronas.

Para el control efectivo de la estabilidad del pozo, especialmente a lo largo de trayectorias desafiantes, se necesita el monitoreo en tiempo real de las condiciones del pozo y la predicción, previa a la perforación, del programa de presión de lodo requerido. Un desafío para el modelado y las predicciones geomecánicas es la disponibilidad de datos de entrada, principalmente la resistencia de la roca y los esfuerzos locales. La resistencia de la roca es fácil de medir en muestras de núcleos, en el laboratorio, pero el proceso requiere mucho tiempo y es costoso, y los resultados generalmente sirven para los pozos futuros, pero no para el pozo en el que se trabaja en ese momento. En consecuencia, se invierte un esfuerzo considerable en la derivación de los valores de resistencia de las rocas a partir de sónicos y datos adquiridos con herramientas operadas con cable.

La geomecánica de yacimientos busca solventar problemas generados durante el ciclo de vida de un yacimiento de hidrocarburos, mediante el desarrollo de modelos geomecánicos del yacimiento y de las formaciones por encima de él. Estos incluyen preguntas que surgen durante: (Zoback, 2010).

- I. La fase de exploración y evaluación del desarrollo del yacimiento tales como predicción de la presión de poros, la altura de las columnas de hidrocarburos y la posible presencia de fallas sellantes o de fugas.
- II. La fase de desarrollo en donde los ingenieros buscan optimizar la estabilidad del pozo mediante la determinación de trayectorias óptimas de los pozos, los puntos de fijación de los revestimientos y el peso del lodo.
- III. Toda la fase de producción del yacimiento en donde se requiere la selección de metodologías óptimas de completamiento, la predicción de cambios en el rendimiento del yacimiento durante la depleción y la evaluación de técnicas como la fracturación hidráulica repetida, para optimizar la recuperación total del crudo.
- IV. Las fases de recuperación secundaria y terciaria optimizando procesos tales como inyección de agua y vapor.

1.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ROCAS

Una caracterización mecánica de rocas comprende la definición de las propiedades mecánicas elásticas de la roca (módulo de Young, relación de Poisson), de la resistencia y el comportamiento esfuerzo-deformación, del campo de esfuerzos (magnitud de los esfuerzos in situ, presión de poro, dirección de los esfuerzos). Los estudios geomecánicos necesitan muestras de roca para realizar ensayos de laboratorio que permiten determinar las propiedades mecánicas de la roca. Por otra parte, es fundamental en el comportamiento mecánico de las rocas del yacimiento conocer el esfuerzo efectivo, por lo que es indispensable definir la presión de poro en la formación. (Bracho, 2005)

La caracterización mecánica de las rocas permite elaborar modelos predictivos de esfuerzos in situ , predecir la deformación de un pozo y del yacimiento, optimizar los planes de desarrollo del campo y encontrar soluciones de ingeniería para diagnosticar problemas.

Las propiedades de las rocas son producto de la composición mineralógica, ambiente de depositación e historia geológica. La variación de estas propiedades (resistencia del material y modelo de deformación) se reflejan en comportamientos mecánicos diferentes frente a fuerzas que actúan sobre las rocas (Gonzales de Vallejo et al, 2004).

Cuando una muestra de roca sólida es sometida a grandes esfuerzos lo más seguro es que la roca sea fallada; estas fallas dependerán del estado de esfuerzos, del tipo del material y de la geometría de la muestra. También, la historia de los esfuerzos del espécimen puede ser de gran importancia. Las técnicas sugeridas para determinar la deformabilidad, resistencia y las constantes elásticas son dadas por la ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas).

1.1.1 Propiedades físicas y mecánicas de algunas rocas. Diversos investigadores han obtenido resultados de caracterizaciones mecánicas y físicas de las litologías que aparecen con mas frecuencia en el macizo rocoso.

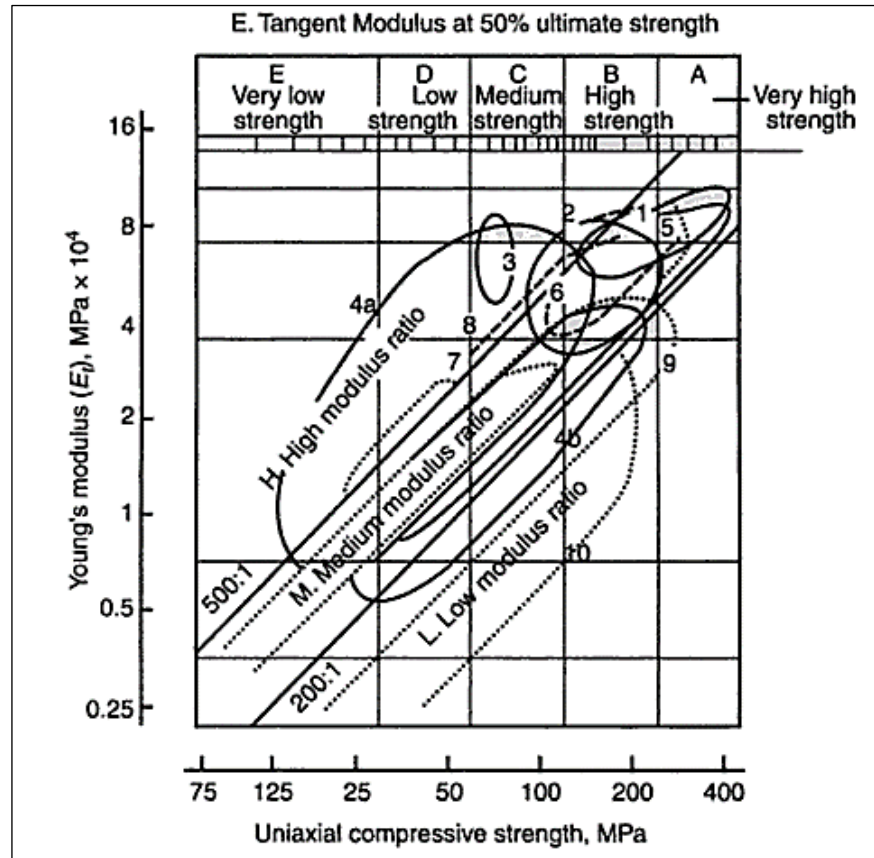
En la Tabla 1 se han agrupado datos de densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, porosidad y resistencia a compresión, tracción y flexión de varias rocas, obtenidos por los siguientes investigadores: Bieniaswki (1974) y Brown (1980), Hoek y Bray (1981) y Brady y Brown (1985).

En la Tabla 2 se presentan datos del ángulo de fricción interna de algunas rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas, con resistencia a la compresión uniaxial comprendidas entre 5 y 400 Mpa.

En la Tabla 3 se presentan rangos de datos de resistencia a la compresión uniaxial de diferentes rocas.

En la Figura 1 se presenta un gráfico, de los denominados de Deere-Miller, en el que se relacionan la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo elástico de las siguientes rocas: cuarcita, granito, limolita, dolomita, arenisca y shale, en ambos ejes de este grafico se utilizaron ejes logarítmicos (Stagg and Zienkiewicz, 1968).

Figura 2 Gráfico de Deere-Miller.



Fuente: Tomada de Deere-Miller (1996).

Tabla 1 Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas.

ROCAS	DENSIDAD (kg/m ³)	MÓDULO DE YOUNG (Gpa)	COEFICIENTE DE POISSON	POROSIDAD %	UCS (MPa)	To(MPa)	RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)
Rocas batolíticas							
Granito granodiorita	2500-2750	30-70	0,12-0,25	0,1-2	120-280	4-7,0	10-20,0
Gabro	2920-3050	60-100	0,12-0,25	2- 5,0	150-200	5-8,0	10-22,0
Rocas extrusivas							
Riolitas	2450-2600	10 -20,0	0,1-0,2	0,4-4	80-160	5-9,0	10-22,0
Dacita	2500-2750	8 -18,0	0,09-0,2	0,5-5	80-160	3-8,0	9-20,0

Fuente: (Pedro Ramírez Oyanguren, 2004).

Tabla 2 Ángulos de fricción interna de algunas rocas

Clase de roca	Tipo de roca	Resistencia a compresión simple (MPa)	Ángulo de fricción Φ en grados
Rocas sedimentarias	Caliza	50-200	33-40
	Marga	5-15	----
	Arenisca	50-150	25-35
	Limolita	5-200	27-31
	Esquistos	50-100	27
Rocas metamórficas	Gneis	100-200	23-33
	Mármol	100-200	25-35
	Cuarcita	200-400	48
Rocas ígneas	Basalto	100-300	31-38
	Gabro	100-300	----
	Granito	100-200	29-35

Fuente: (Pedro Ramírez Oyanguren, 2004).

Tabla 3 Resistencia a la compresión uniaxial de diferentes rocas

Roca	Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)
Granito	100-250
Diorita	150-300
Dolerita	100-300
Gabro	150-300
Basalto	150-300
Arenisca	20-170
Lutita	5-100
Caliza	30-250
Dolomita	30-250
Carbón	5-50
Cuarcita	150-300
Neiss	50-200
Mármol	100-250
Pizarra	100-200

Fuente: Tomada de Suarez (1998).

1.2 PROPIEDADES DE LA RESISTENCIA DE LA ROCA

Una información cuantitativa confiable de la resistencia y propiedades de la roca puede ser solo obtenida de corazones. Sin embargo, en casos de campo, los corazones no siempre están disponibles y usualmente son discontinuos y parciales. Por lo tanto, estos parámetros son deducidos de correlaciones de registros. Cada relación empírica es desarrollada para un particular tipo, edad, profundidad, rango y campo. Por consiguiente, se deben calibrar con medidas de núcleos siempre que sea posible.

Registros sínicos y de densidad son los más comúnmente usados para predecir la resistencia de una roca (Horsrud 2001, Chang et al. 2006, Lal 1999).

1.2.1 Resistencia a la compresión no confinada (UCS). La UCS representa la fuerza máxima que pueden soportar las rocas antes de fallar. Estas propiedades determinadas mediante la prueba de compresión sin confinamiento, la cual consiste en aplicar una fuerza axial sobre la roca en una forma continúa incrementando su magnitud hasta que se observe una falla por compresión (ASTM D 2938 – 95), de acuerdo con Carvajal et al. (2007).

En el caso que no se cuenten con núcleos para realizar estas pruebas, es posible recurrir a ciertas correlaciones que van a depender de las condiciones específicas de la formación a evaluar (litología, porosidad, propiedades elásticas, etc.), como las que pueden ser encontradas en Zoback (2007).

1.2.2 Angulo de fricción interna (AFI, ϕ). Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca (Pascal, 2013), Se puede determinar gráficamente con el método del círculo de Mohr Coulomb y se usa para determinar el coeficiente de fricción interna (μ) mediante la ecuación 1. Y este a su vez se define como la resistencia a la fricción

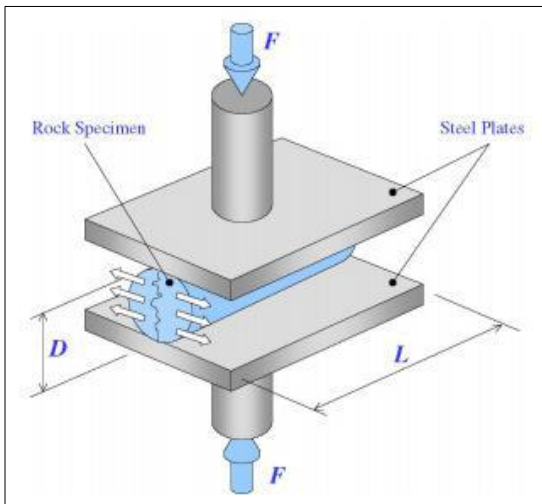
por deslizamiento y rodamiento entre los planos de cizalla y los granos que se encuentran en esos planos.

$$\tan\varphi = \mu \quad (1)$$

1.2.3 Cohesión de la roca (Co). La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas del suelo, en mecánica de suelos esta propiedad representa la resistencia a esfuerzos de corte producida por la cementación (Suarez, 1998). Se puede calcular gráficamente mediante el círculo de Mohr Coulomb.

1.2.4 Resistencia a la tensión (To). La resistencia a la tensión describe la capacidad de la roca para resistir esfuerzos de tensión. Usualmente esta propiedad es evaluada mediante una prueba brasilera, como se ilustra en la Figura 3, la cual implica el incremento progresivo de una fuerza compresiva aplicada transversalmente al eje axial de la muestra en un punto del diámetro hasta que la roca falle en un modo de tensión indirecto (ASTM D 3967-05, 2002), tal como lo indica Carvajal et al. (2007).

Figura 3 Esquema de la prueba brasilera para prueba de materiales.



Fuente: AADNOY, B. y REZA L., 2011. Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design. Elsevier, USA. 376 p.

1.2.5 Resistencia a la compresión con confinamiento (CCS). Comúnmente llamada resistencia a la compresión triaxial es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión con confinamiento. Uno de los métodos de determinación de esta propiedad es la prueba triaxial, usualmente realizada en el laboratorio incrementando la carga axial y de confinamiento simultáneamente hasta alcanzar el esfuerzo hidrostático recomendado, luego, la presión de confinamiento es mantenida constante mientras la carga axial se va incrementando hasta que la falla ocurra.

Para el caso especial de la estimación de resistencia a la compresión con confinamiento, es importante tener en cuenta la presión de confinamiento como factor influyente en el valor de la resistencia, por tal razón esta propiedad forma parte de las variables de entrada de la red neuronal y es definida a continuación.

1.2.5.1 Presión de confinamiento (Pc). Suma de la presión litostática (o de carga de todos los materiales que se encuentran situados por todos los lados de la

roca) más la presión de fluidos (en poros y rocas), que tiene lugar en rocas permeables que permiten el flujo de fluidos a través de sus poros, grietas o fisuras.

1.3 PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LA ROCA

Los módulos elásticos son propiedades que manifiestan los cambios de forma cuando la roca es sometida a esfuerzos. Los esfuerzos a los que son sometidas las rocas pueden ser estáticos o dinámicos, que se diferencian en el método de medición los estáticos mediante cambios visuales o deformaciones mediante la aplicación de esfuerzos y los dinámicos mediante la propagación de ondas acústicas.

En la teoría de elasticidad en materiales homogéneos e isotrópicos, se establece que solo son necesarios dos módulos elásticos para conocer todo el comportamiento elástico del material. El esfuerzo puede ser expresado en términos de esfuerzos aplicados utilizando la ecuación 2 (Zoback, 2010).

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_{00}) + \frac{1}{3K} \delta_{ij}\sigma_{00} \quad (2)$$

Donde:

δ : Esfuerzo de cizalla.

σ_{00} : Esfuerzo hidrostático.

Como son necesarios solo dos módulos para conocer todo el comportamiento en la literatura se plantean una serie de ecuaciones que relacionan estos parámetros entre sí para dado caso en que se conozcan solo dos parámetros de dichas ecuaciones como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4 Relaciones existentes entre módulos elásticos en materiales isotrópicos.

K	E	λ	ν	G	M
$\lambda + \frac{2G}{3}$	$G \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G}$	-	$\frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$	-	$\lambda + 2G$
-	$9K \frac{K - \lambda}{3K - \lambda}$	-	$\frac{\lambda}{3K - \lambda}$	$3 \frac{K - \lambda}{2}$	$3K - 2\lambda$
-	$\frac{9K - G}{3K - G}$	$K - \frac{2G}{3}$	$\frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$	-	$K + 4 \frac{G}{3}$
$\frac{\varepsilon G}{3(3G - E)}$	-	$G \frac{E - 2G}{3G - E}$	$\frac{E}{2G} - 1$	-	$G \frac{4G - E}{3G - E}$
-	-	$3K \frac{3K - E}{9K - E}$	$\frac{3K - E}{6K}$	$\frac{3KE}{9K - E}$	$3K \frac{3K + E}{9K - E}$
$\lambda \frac{1 + \nu}{3\nu}$	$\lambda \frac{(1 + \nu)(1 - \nu)}{\nu}$	-	-	$\lambda \frac{1 - 2\nu}{2\nu}$	$\lambda \frac{1 - \nu}{\nu}$
$G \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$2G(1 + \nu)$	$G \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$	-	-	$G \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}$
-	$3K(1 - 2\nu)$	$3K \frac{\nu}{1 + \nu}$	-	$3K \frac{1 - 2\nu}{2 + 2\nu}$	$3K \frac{1 - \nu}{1 + \nu}$
$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	-	$\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	-	$\frac{E}{2 + 2\nu}$	$\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$

Fuente: Tomada de (Zoback, 2010).

1.3.1 Módulo de Young o de elasticidad (E). Es una medida de la propiedad que tiene la roca para resistir la deformación. El principio básico es que si a un cuerpo se le aplica un esfuerzo, y después de un tiempo este se retira, el cuerpo retorna a su cuerpo y tamaño original. Este parámetro permite obtener la relación existente entre la aplicación de un esfuerzo axial (σ_{axial}) y la deformación longitudinal (ε_{axial}) representada en la ecuación 3 Comportamiento observado por el científico inglés Thomas Young (Pascal, 2013).

$$E = \frac{\sigma_{axial}}{\varepsilon_{axial}} \quad (3)$$

El orden de magnitud del módulo de Young para rocas esta entre 1 y 100 GPa. Valores altos de este parámetro significan una alta resistencia y comportamiento

de tipo más frágil.

1.3.2 Relación de Poisson (ν). Es un parámetro adimensional y se define como la relación entre la deformación lateral (deformación perpendicular al esfuerzo aplicado) sobre la deformación longitudinal (deformación en la dirección del esfuerzo aplicado), en una muestra sometida a un esfuerzo uniaxial.

La relación de Poisson en rocas puede variar en rangos distintos de acuerdo al autor pero el rango puede establecerse de forma conservativa entre 0,1 y 0,3. A medida que este parámetro se hace más alto, el material tiende a ser más incompresible.

Los dos últimos parámetros elásticos: módulo de Young y relación de Poisson, son suficientes para describir completamente el comportamiento de materiales isotrópicos y elásticos lineales. No obstante, existen otros módulos elásticos importantes como son: el módulo de rigidez, el módulo volumétrico y la constante de Lamé, los cuales pueden ser obtenidos de relaciones matemáticas con los dos módulos descritos Tabla 4.

Es simplemente la relación entre la expansión lateral del radio (ε_{long}) y la contracción axial (ε_{axial}) de la muestra cuando esta es sometida a una carga axial ecuación 4 (Zoback, 2010).

$$\nu = \frac{\varepsilon_{long}}{\varepsilon_{axial}} \quad (4)$$

Tabla 5 Pruebas geomecánicas para el estudio de estabilidad de pozo.

Prueba	Parámetro evaluado
--------	--------------------

Prueba de compresión uniaxial	Módulo de Young
	Relación de Poisson
	UCS
	Deformaciones: axial, circunferencial, volumétrica
	Velocidades: de compresión y de cizalla
Prueba brasilera	Resistencia a la tensión
Prueba de compresión triaxial	Módulo de Young
	Relación de Poisson
	CCS
	Deformaciones: axial, circunferencial, volumétrica
Envolvente de falla múltiple	Cohesión
	Ángulo de fricción interna

Fuente: CARVAJAL J. et al., 2007. Geomechanical wellbore stability modeling of exploratory wells – study case at Middle Magdalena basin. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro, Volumen 3, Número 3.

1.4 COMPRESIBILIDAD DE LA ROCA

La compresibilidad de la roca al igual que la de los fluidos es un mecanismo de expulsión de hidrocarburos. Al comenzar la explotación de un yacimiento y caer la presión se expande la roca y los fluidos. La expansión de la roca causa una disminución del espacio poroso interconectado. La expansión de los fluidos tiende a contrarrestar el vaciamiento ocurrido por la producción de fluidos que a su vez causó la caída de presión. Ambos efectos van en la misma dirección, la cual es expulsar fluidos del espacio poroso interconectado. Este mecanismo de expulsión es especialmente importante en la producción de yacimientos subsaturados sin empuje de agua hasta que la presión baja hasta la presión de saturación. De hecho, en el caso de la compresibilidad es la única fuente de energía de producción. En el caso de la formación se definen tres tipos de compresibilidades:

- Compresibilidad de los Poros (C_p).
- Compresibilidad de la Matriz (C_r).

- Compresibilidad Total de la Roca (C_b).

Geertsma, 1957, y Evan & ZOLOTUKHIN, 1997, muestran que la compresibilidad del poro C_p , del volumen total de la roca, C_b y de los sólidos (matriz de la roca), C_r , presenta la siguiente relación:

$$c_p = \frac{C_b - (1 + \phi)C_r}{\phi} \quad (5)$$

Cuando se extrae fluido de la roca yacimiento, la presión interna cambia, aumentando la presión diferencial entre esta presión interna y la presión externa de sobrecarga que permanece constante. Esto trae como consecuencia el desarrollo de diferentes esfuerzos en la roca dando como resultado un cambio en la parte sólida, en los poros y por consiguiente en la roca total. Desde el punto de vista de ingeniería de yacimientos, el cambio principal es el sufrido por los poros. El cambio en el volumen total es importante en áreas donde ocurre fenómeno de subsidencia.

1.4.1 Coeficiente de Biot (α). Mide la cantidad de esfuerzo que toma el fluido, es decir, describe la eficacia de la presión del fluido en contrarrestar el esfuerzo total aplicado, éste varía entre (0 y 1). Todos los efectos medibles de un cambio de esfuerzo (compresión, distorsión, resistencia) son debidos solamente a esfuerzos efectivos. En materiales muy porosos (arenas no consolidadas) el valor de α tiene un máximo igual a 1, lo que significa que toda la presión de poros está contribuyendo a soportar el esfuerzo total. En rocas de baja porosidad es posible que este número sea cercano a 0,8 (Vásquez y Sánchez, 1999). El coeficiente de Biot está dado por la siguiente ecuación:

$$\alpha = 1 - \frac{c_r}{c_b} \quad (6)$$

1.5 TIPOS DE FALLA DE LA ROCA

Los fenómenos que causan cómo falla una roca es una combinación de las condiciones que las propician. En este sentido la causa de la inestabilidad de pozos es una mezcla de factores que pueden ser clasificados por sus orígenes como controlables y no controlables de acuerdo con Pasic et al. (2007). Estos factores se muestran en la Tabla 6

Tabla 6 Causas de la inestabilidad de pozos.

CAUSAS DE LA INESTABILIDAD DE POZO	
FACTORES INCONTROLABLES (NATURALES)	FACTORES CONTROLABLES
Formaciones naturalmente fracturadas	Presión en fondo de pozo (Densidad del lodo)
Formaciones tectónicamente activas	Inclinación y Acimut del pozo
Altos esfuerzos in situ	Presiones de poro transitorias
Formaciones móviles	Interacción fisicoquímica de la roca-fluido
Formaciones no consolidadas	Vibraciones de la sarta de perforación
Colapso de lutitas naturalmente sobrepresionados	Erosión del pozo
Colapso de lutitas con sobrepresión inducida	Temperatura del fluido de perforación

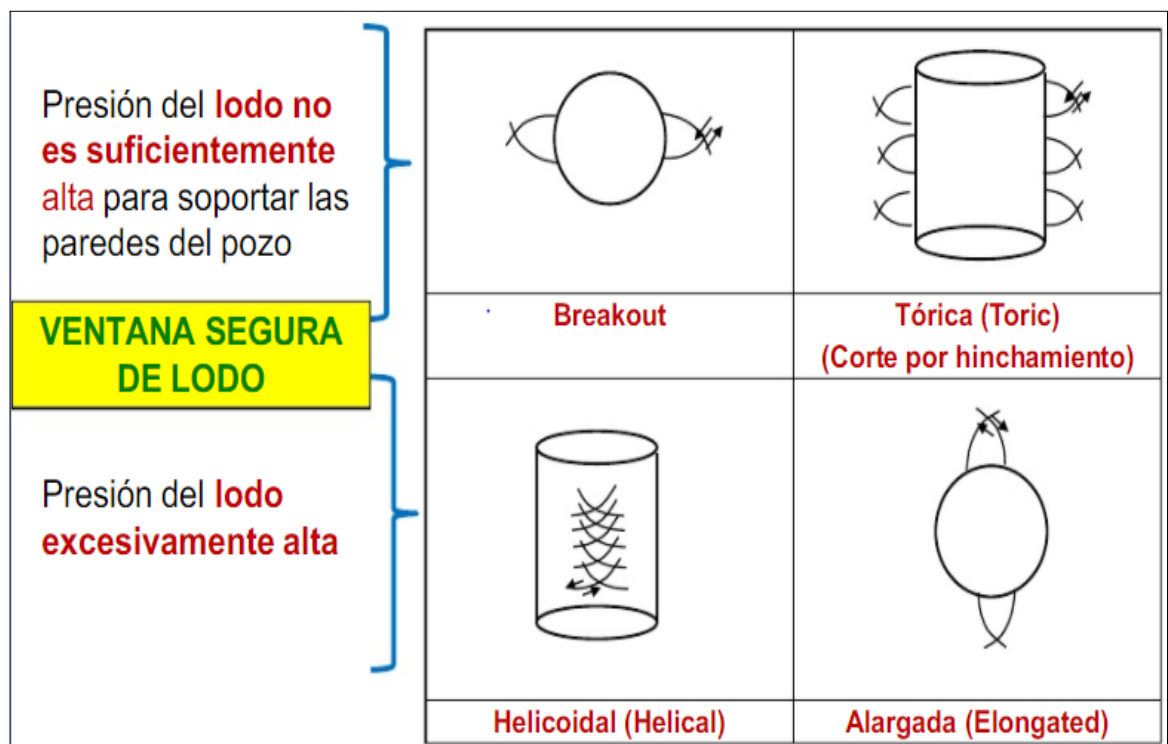
Fuente: (Ortíz, 2009)

La perforación de pozos modifica el estado inicial de esfuerzos y causa su redistribución en la vecindad del pozo. Esta redistribución del estado de esfuerzos puede exceder la resistencia de la roca y ocasionar la falla.

Los mecanismos de falla inducidos por los esfuerzos in situ en un pozo se clasifican en: fallas por compresión (si excede la resistencia de cizalla de la formación) y en fallas por tensión (si excede la resistencia tensil de la formación).

1.5.1 Fallas Por Compresión. Las fallas por compresión o cizalladura que ocurren en la pared del pozo se clasifican en cuatro modos, en términos de los esfuerzos principales en un sistema de coordenadas cilíndricas: breakout, falla tórica, helicoidal y alargada. (Eduard Pabón, Yussed Méndez, 2004)

Figura 4 Fallas por compresión o cizalla.



Fuente: Modificado de Tan y Willoughby, 1993,102.

1.5.1.1 Breakout. Los breakouts se forman en el área alrededor de un pozo donde la concentración de esfuerzos excede la resistencia de la roca. Para que haya formación de breakout se debe dar que el esfuerzo tangencial sea mayor que el esfuerzo vertical y este a su vez sea mayor al esfuerzo radial. Se da en la dirección

del esfuerzo mínimo horizontal.

1.5.1.2 Falla Tórica. Para que ocurra una falla tórica el esfuerzo vertical debe ser mayor al tangencial y este a su vez mayor al radial. Ocurre cuando el peso del lodo no es suficientemente alto para soportar las paredes del pozo. Se da en la dirección del esfuerzo mínimo horizontal.

1.5.1.3 Falla Helicoidal. Se debe dar que el esfuerzo vertical sea mayor que el radial y este a su vez sea mayor al tangencial. Ocurre cuando la presión del lodo es excesivamente alta y puede darse en la dirección ortogonal a las fallas de breakout y tórica (esfuerzo horizontal máximo).

1.5.1.4 Falla Alargada. El esfuerzo radial debe ser mayor al vertical y este a su vez mayor al tangencial o que el radial sea mayor al tangencial y este a su vez mayor al vertical. Ocurre cuando la presión del lodo es excesivamente alta y puede darse en la dirección ortogonal a las fallas de breakout y tórica (esfuerzo horizontal máximo).

Tabla 7 Fallas por compresión de acuerdo con sus esfuerzos. σ_θ : Esfuerzo Tangencial, σ_z : Esfuerzo Vertical, σ_r : Esfuerzo Radial.

MODO	CONDICIÓN
Ruptura (Breakout)	$\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$
Tórica (Toric)	$\sigma_z > \sigma_\theta > \sigma_r$
Helicoidal (Helical)	$\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$
Alargada (Elongated)	$\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$ ó $\sigma_r > \sigma_\theta > \sigma_z$

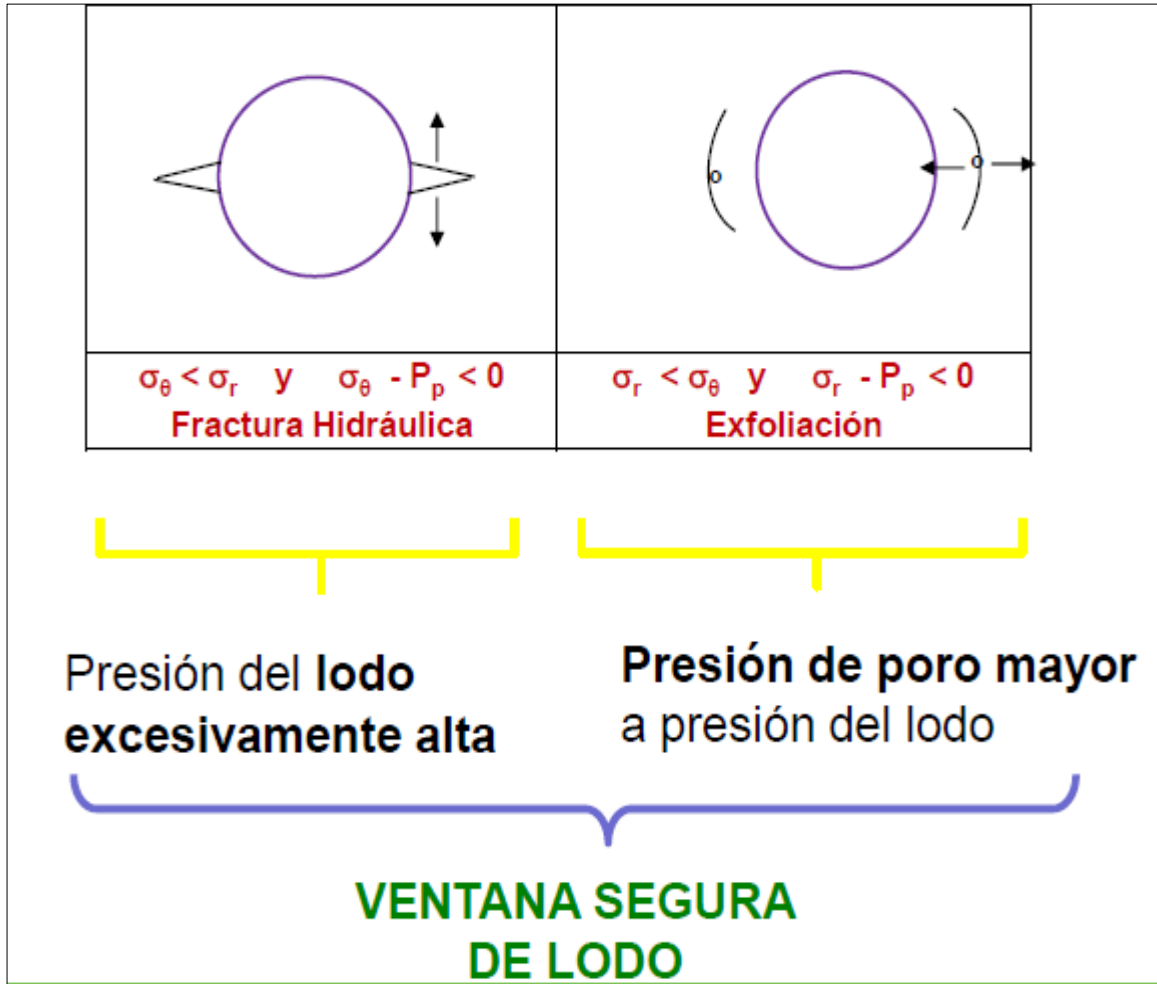
Fuente: Presentación Zuly Calderón Carrillo. Estabilidad de pozos (wellbore stability).

1.5.2 Falla Por Tensión Las rocas generalmente tienen poca resistencia a la tensión, usualmente menor a 1000 psi y raramente mayores a 3000 psi. Las fallas por tensión encontradas con mayor frecuencia en la práctica son clasificadas de dos modos, en términos de los esfuerzos principales en un sistema de coordenadas cilíndricas (Figura 5): Fracturas hidráulicas y falla por exfoliación.

1.5.2.1 Fractura Hidráulica. Para que se presente la fractura hidráulica el esfuerzo tangencial debe ser menor que el esfuerzo radial; y la diferencia entre el esfuerzo tangencial y la presión de poro debe ser menor que cero. La fractura hidráulica ocurrirá cuando la presión de lodo sea excesivamente alta y se supere el valor del esfuerzo mínimo efectivo más la resistencia a la roca por tensión.

Una presión de fractura determinada será la presión de lodo crítica para evitar pérdidas de circulación. De esta manera la presión de pérdida de circulación de lodo corresponderá al menor de los esfuerzos horizontales y verticales.

Figura 5 Fallas por tensión.



Fuente: Presentación Zuly Calderón Carrillo. Estabilidad de pozos (wellbore stability).

1.5.2.2 Falla Por Exfoliación. Para que se presente la falla por exfoliación, el esfuerzo radial debe ser menor que el tangencial y la diferencia entre el esfuerzo tangencial y la presión de poro debe ser menor que cero. Generalmente esta falla se da cuando la presión de poro llega a ser más alta que la presión del lodo y da como resultado una deformación en la matriz bajo condiciones de no drenaje. De aquí, que se concluya la existencia de un límite mínimo y máximo de presiones de lodo entre los cuales está la ventana segura del lodo para la cual no ocurrirá la falla por tensión.

Las fallas por cizalla o por esfuerzo de corte exceden la resistencia mecánica de la formación y las fallas por tensión vencen la cohesión de la formación, por lo cual se considera un límite máximo y el límite mínimo operacional de densidad de lodo, para perforar y evitar problemas asociados de inestabilidad de pozo.

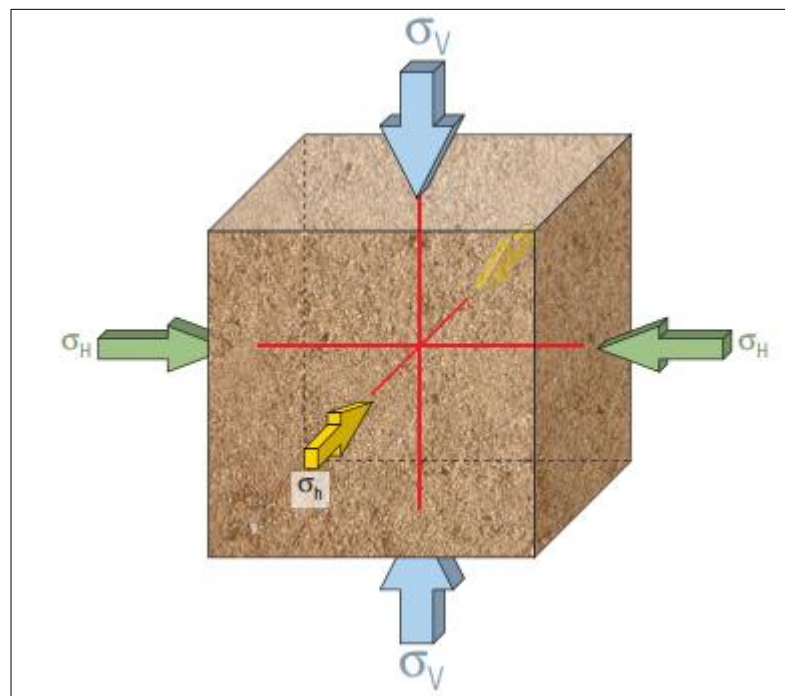
1.6 ESFUERZOS IN SITU

Los esfuerzos que actúan sobre una formación pueden variar en su origen, magnitud y dirección. Los esfuerzos locales verticales naturales son originados fundamentalmente por el peso de los estratos de sobrecarga. Los esfuerzos horizontales poseen además un componente gravitacional que puede ser intensificado por la tectónica, los efectos térmicos y la estructura geológica. No obstante, otros factores tales como la litología, la presión de poro y la temperatura, inciden en la magnitud y orientación de los esfuerzos, además del grado en que la roca responde a los esfuerzos. El esfuerzo, una medida de la fuerza que actúa sobre un área determinada, está compuesto por componentes normales y componentes de corte. El esfuerzo normal (σ) es el que se aplica en forma perpendicular a un plano o a la superficie de la roca. El esfuerzo de corte (τ) se aplica a lo largo de la cara del plano.

En la Figura 6 se aprecian los esfuerzos locales y esfuerzos principales. Los esfuerzos aplicados sobre un cubo de material, sepultado en la tierra, se designan

como σ_V , σ_H y σ_h , donde V indica la dirección vertical, H indica la dirección del mayor esfuerzo horizontal y h, la dirección del menor esfuerzo horizontal. Por razones de simplicidad, a menudo se asume que éstas son las direcciones de los esfuerzos principales, pero las direcciones principales de esfuerzo pueden ser rotadas en forma significativa con respecto a estos tres ejes. Los esfuerzos principales se indican en general como σ_1 , σ_2 y σ_3 , en orden de magnitud decreciente. Cuando las direcciones de los esfuerzos principales no coinciden con las direcciones vertical y horizontal, también habrá esfuerzos de corte sobre las caras del cubo en la orientación mostrada.

Figura 6 Esquema de los esfuerzos in situ.



Fuente: JOHN COOK., RENÉ A., KLAUS HASBO., 2008. Las rocas importan: Realidades de la geomecánica. Oilfield Review.

Un cuerpo de roca responde al esfuerzo aplicado a través de diversos modos de deformación relativa (deformación) que producen cambios de volumen y forma, a menudo acompañados por cambios en las propiedades de las rocas. El espectro de deformación oscila entre la deformación elástica, o reversible, y la deformación

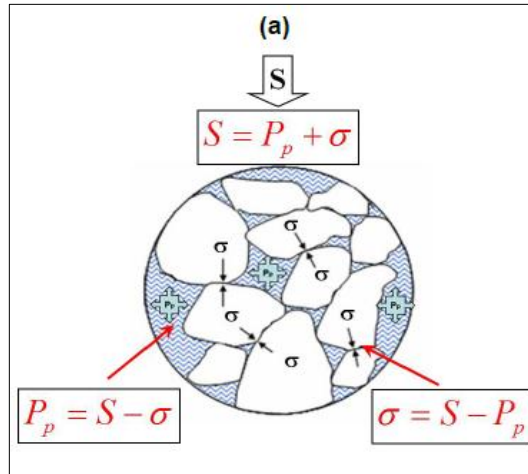
plástica, o permanente, antes de terminar finalmente en la falla de la roca. La deformación causada por la compresión, la tensión o el esfuerzo de corte puede producir fenómenos de compactación, extensión, traslación o rotación, que se traducen finalmente en rotura por cizalladura, fracturamiento o fallamiento. Además de la magnitud del esfuerzo aplicado, la respuesta de una roca al esfuerzo depende en gran medida del tipo de roca, la cementación, la porosidad y la profundidad de sepultamiento. En las areniscas, el tamaño, la forma y el área de los puntos de contacto entre los granos de roca individuales inciden en la deformación.

El esfuerzo y la presión de poro están intrínsecamente ligados. En los espacios porosos de las formaciones, el esfuerzo se transmite a los líquidos o a los gases en forma de presión. La magnitud de la presión aplicada en cualquier dirección es la misma para todas las direcciones. Si es comprimido, un fluido reacciona ejerciendo una presión equivalente y opuesta hacia afuera. Bajo presión, los fluidos alojados en los poros a menudo absorben parte del esfuerzo impuesto sobre una formación. Por eso, la presión de poro es un componente importante del esfuerzo neto aplicado a un cuerpo de roca.

1.7 PRESIÓN DE PORO

La presión de formación, también conocida como presión de poro (P_p), es aquella a la cual se encuentran confinados los fluidos en el espacio poroso de la formación, que pueden ser gas, aceite y/o agua salada. Terzaghi en (1936) propuso la teoría del esfuerzo efectivo, y confirmó que el esfuerzo efectivo controla la deformación del sólido y está en función de la presión de poros junto al esfuerzo de sobrecarga (Moutchel J.P. y Mitchell A., 1989). La Figura 7 muestra el modelo de compactación de Terzaghi y Peck (1948) de cómo la presión de sobrecarga se reparte entre el contacto grano a grano (esfuerzo efectivo) y en los fluidos dentro de los poros de la formación (presión de poro).

Figura 7 Esquematización del Modelo de Terzaghi y Peck (1948).



Fuente: DAVIS, C. y GUSTAVO C.,2014. Nuevo método para el análisis de la presión de poro basado en registros de pozo, MEXICO.

Las partículas sólidas en contacto forman la estructura del suelo, que también forman un sistema intersticial de vacíos intercomunicados o no, la interacción entre la estructura del suelo y el fluido de los vacíos determinan dicho comportamiento. La presión de poros normal, por ser una presión hidrostática, tiene igual intensidad en todas las direcciones. Examinando los esfuerzos normales a la membrana, se puede apreciar que la diferencia de esfuerzo de sobrecarga y la presión de poros se transmite a la estructura del suelo a través de la membrana, para una situación de equilibrio. Calculando el esfuerzo de sobrecarga y el esfuerzo efectivo, se puede determinar la presión de poros utilizando la ecuación formulada por Terzagui (1943):

$$\sigma = \sigma' + P_p \quad (7)$$

Dónde:

σ : Esfuerzo total aplicado

σ' : Esfuerzo efectivo

P_p : Presión de poro

Esta ecuación denominada ecuación de Terzaghi es muy importante en el análisis de presiones de poro ya que la mayoría de los métodos que predicen perfiles de presión se basan en esta ecuación.

Los métodos usados en la determinación de presiones de poro se pueden categorizar en tres grupos de acuerdo con el tiempo en el cual son aplicados: por un lado, están los métodos usados antes de la perforación de los pozos (métodos predictivos); en segundo lugar, están los métodos usados durante la perforación como tal (métodos de detección); y finalmente, los métodos usados después de la perforación de los pozos (métodos de evaluación y verificación). En la Tabla 8, se registran algunos de los métodos mencionados anteriormente.

Tabla 8 Métodos utilizados en la estimación de la presión de poro.

TIEMPO DE APLICACIÓN	MÉTODO
Predictivos (antes de la perforación)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reportes de lodo y perforación de pozos de correlación. ➤ Correlaciones geológicas de regiones similares. ➤ Evaluación de registros de pozos de referencia. ➤ Métodos geofísicos: <ul style="list-style-type: none"> - Sísmicos (velocidad). - Gravedad (densidad). - Magnéticos. - Prospección eléctrica.

<p style="text-align: center;">De Detección (durante la perforación)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Parámetros de perforación. ➤ Parámetros de lodo (aumento de fluido en las piscinas de lodo, presencia de fluidos de formación en el lodo, tasa de flujo del lodo, entre otros. ➤ Parámetros de recortes de perforación (tamaño, volumen, forma). ➤ Toma de registros durante la perforación (LWD).
<p style="text-align: center;">Verificación y calibración (después de la perforación)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Medidas de presión directa tomadas en el fondo de pozo. ➤ Evaluación con registro de pozo.

Fuente: CALDERÓN, Zuly. Introducción a la mecánica de rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo. Bucaramanga-Colombia: División de Publicaciones UIS, 2012. 456 p.

1.8 CRITERIOS DE FALLA

Dependiendo de la resistencia de la roca, magnitud y dirección de los esfuerzos in-situ, puede existir una gran diferencia entre los esfuerzos in situ y los esfuerzos en la pared del pozo cuando este se está perforando. Si esta diferencia excede el criterio de falla de la roca, la roca fallará. A esta condición se le llama criterio de falla del pozo, y representa las condiciones límite en las cuales ocurre la falla. Este estado de esfuerzos puede conducir a pozos estables o inestables.

Por lo tanto, el criterio de falla es uno de los elementos necesarios para poder realizar un análisis de estabilidad. Una vez que se han determinado los esfuerzos alrededor del pozo es necesario compararlos con la resistencia de la formación. En los puntos donde el estado de esfuerzos exceda la resistencia de la formación (ya sea por tensión o por compresión) es donde se considera que inicia la falla.

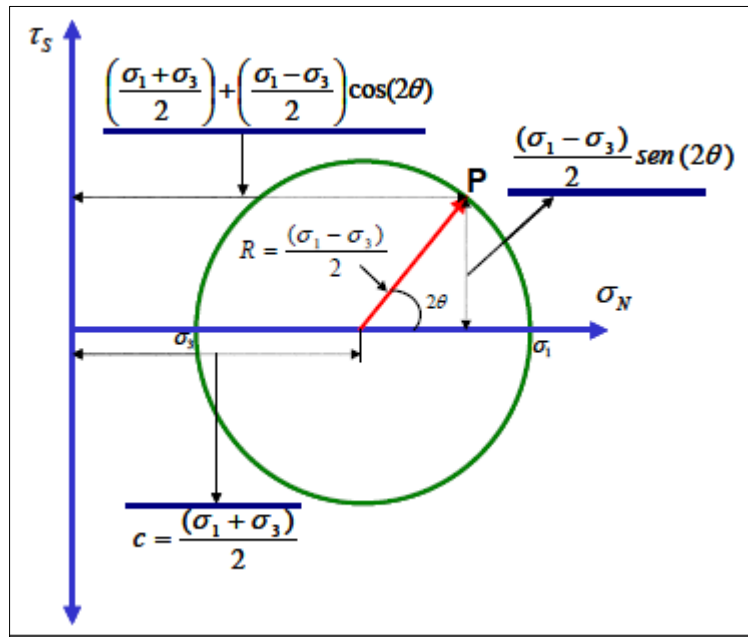
1.8.2 Criterio de falla Mohr Coulomb. Este criterio postula que la resistencia al corte de las rocas tiene dos componentes: cohesión y ángulo de fricción, siendo esta última dependiente del esfuerzo efectivo normal sobre el plano de rotura. Según esta teoría la resistencia al corte que puede desarrollar una roca en un plano que forma un ángulo β con el esfuerzo principal menor, σ_3 , (ver Figura 8) se puede expresar mediante la ecuación:

$$\tau = c + \sigma n \tan \varphi \quad (8)$$

Donde τ es el esfuerzo de cizalla, σn es el esfuerzo normal efectivo, c y φ son la cohesión y el ángulo de fricción interna respectivamente.

Si la roca está sometida a tensión en lugar de a compresión, su resistencia estará determinada por el resultado de los ensayos de tracción realizados en el laboratorio con núcleos de la roca en cuestión.

Figura 8 Circulo de Mohr-Coulomb.



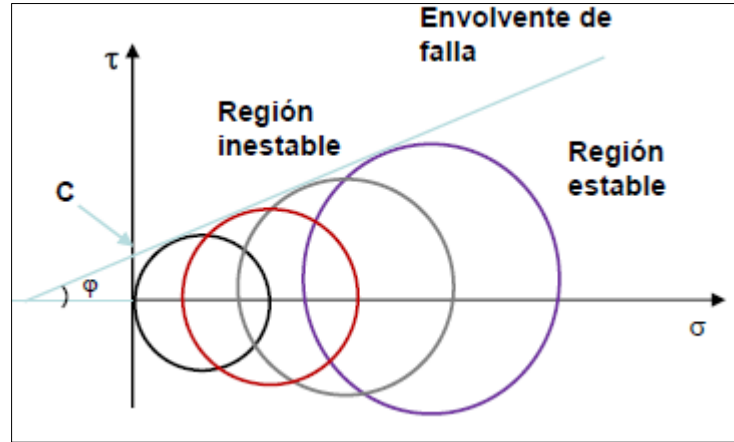
Fuente: Tomado de (TARAZONA, 2004).

A partir de los esfuerzos efectivos principales se pueden obtener esfuerzo normal y de cizalla en el plano de rotura, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (9)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (10)$$

Figura 9 Representación envolvente de falla Mohr-Coulomb.



Fuente: Presentación Zuly Calderón Carrillo. Estabilidad de pozos (wellbore stability).

Llevando las ecuaciones (9) y (10) a la ecuación (11), se obtiene el criterio de falla de Mohr-Coulomb expresado en función de los esfuerzos principales:

$$\sigma_1 = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (11)$$

De la ecuación (11) se deduce el valor de la resistencia a compresión uniaxial (UCS) de la roca en función de la cohesión y la fricción:

$$R_0 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

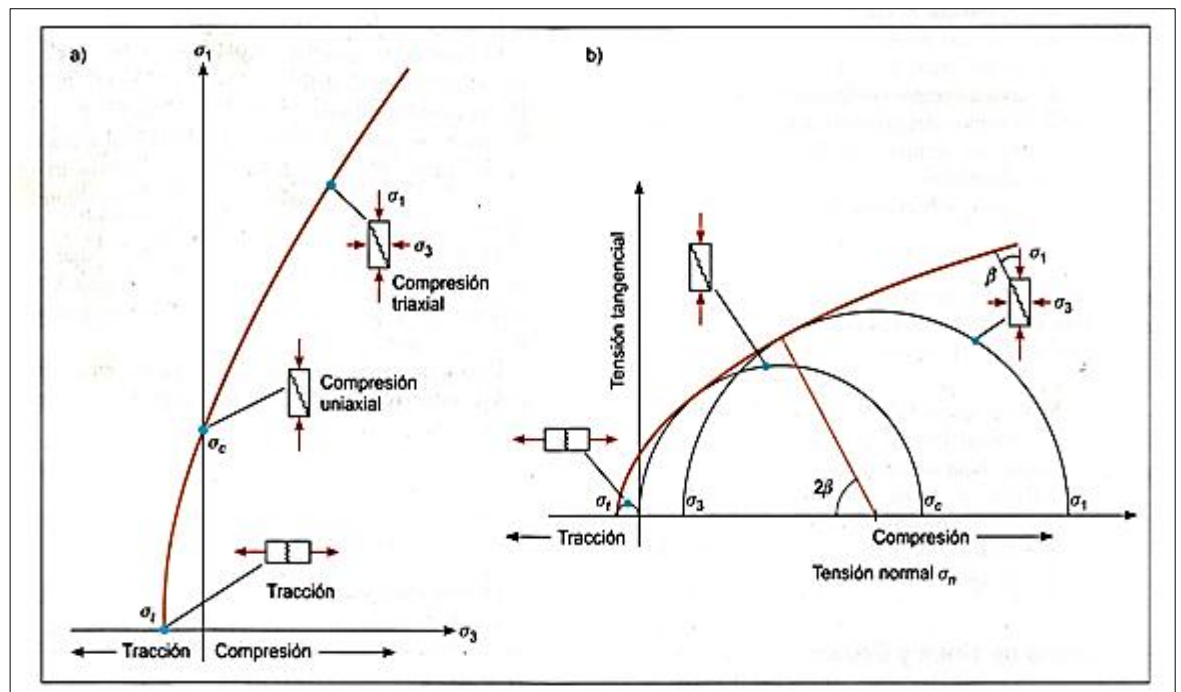
Para representar el criterio de Mohr–Coulomb hay que ajustar una recta que sea tangente a los círculos de falla obtenidos mediante los ensayos triaxiales como se aprecia en la Figura 9. Debido a que diversos factores, inherentes a las rocas y a los propios ensayos, introducen errores en los resultados de éstos, el ajuste no suele tener una solución matemática exacta, ya que habrá círculos de Mohr que son cortados por la recta de Mohr–Coulomb y otros que se aproximen a ella sin ser tangentes ni secantes. (Pedro Ramírez Oyanguren, 2004).

La ausencia del esfuerzo principal intermedia en éste y en otros criterios de rotura se debe a que se ha demostrado que su influencia en la resistencia de la roca es prácticamente despreciable.

1.8.3 Criterio de falla Hoek Brown. Este criterio, introducido por Hoek and Brown (1980). Se trata de un criterio no lineal, puramente empírico, que permite valorar, de manera sencilla, la rotura de un medio rocoso mediante la introducción de las principales características geológicas y geotécnicas y es usualmente aplicado a yacimientos naturalmente fracturados.

En la Figura 10 (b) se representa las tensiones de rotura para el criterio de falla de Hoek Brown. En la figura se aprecia que la función que define el dominio elástico es no lineal. Los estados de tensiones encima de la curva están en rotura, mientras que los interiores están en el dominio elástico, y los estados tensionales por encima de la curva son inaccesibles para este determinado caso.

Figura 10 Envolventes de falla del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b), representación de las diferentes condiciones de esfuerzo para rotura de la matriz rocosa.



Fuente: Tomado de (Barrales, 2015).

El esfuerzo normal y de cizalla en el plano de rotura se pueden obtener, a partir de los esfuerzos principales, mediante las siguientes ecuaciones de Balmer (1952):

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \frac{d\sigma_1/\partial\sigma_3 - 1}{\partial\sigma_1/\partial\sigma_3 + 1} \quad (13)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \frac{\sqrt{\partial\sigma_1/\partial\sigma_3}}{\partial\sigma_1/\partial\sigma_3 + 1} \quad (14)$$

Según el criterio de Hoek–Brown (1980) la resistencia a la tensión de la roca se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left(m_i - \sqrt{m_i^2 + 4} \right) \quad (15)$$

El valor del parámetro σ_{ci} , es decir, la resistencia a compresión uniaxial de la roca se debe obtener a partir de los correspondientes ensayos de laboratorio. Para estimar la constante m_i es conveniente realizar ensayos triaxiales.

El valor del parámetro m_i se puede estimar en primera aproximación a partir de la Tabla 9:

Tabla 9 Estimación de la constante m_i del material intacto en función del tipo de roca. Los parámetros entre paréntesis son aproximados

Tipo de roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Argilita 4
			← Grauwaca (18) →			
	No clásticas	Orgánicas	← Creta(18) →			
		Carbonatadas	← Carbón (8-21) →			
		Evaporitas	Brecha (20)	Caliza Espárrtica (10)	Caliza Micrítica 8	
METAMÓRFICAS	No foliadas		Mármol 9	Corneanas (19)	Cuarcita 24	
	Ligeramente foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 31	Milota (6)	
	Foliadas*		Gneiss 33	Esquisto (10)	Filita (10)	Pizarra 9
IGNEAS	Claras		Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorita (30)		Dacita (17)	
			Diorita (28)		Dacita 19	
	Oscuras		Gabro 27	Dolerita (19)	Basalto (17)	
			Norita 22			
Extrusivas piroclásticas		Aglomerado (20)	Brecha (18)	Toba (15)		

Fuente: Modificado de Hoek et al., 1994.

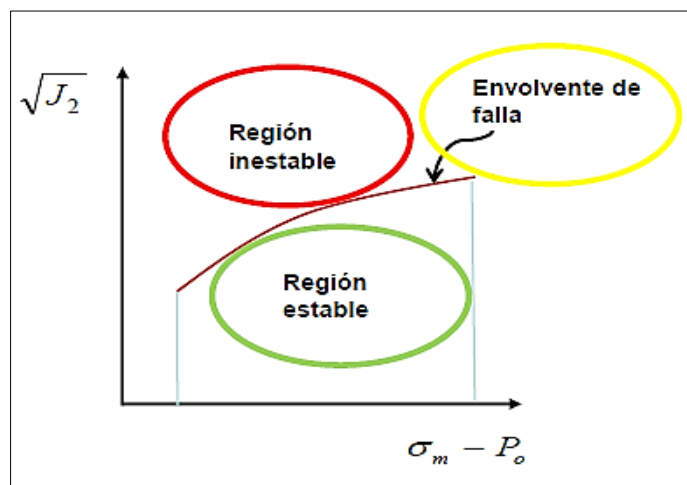
1.8.4 Criterio de Von Mises. Este criterio fue introducido por Von Mises (1913) y ha sido usado como uno de los criterios más confiables para materiales de ingeniería. Este se basa en el segundo esfuerzo deviatorio invariante y el esfuerzo efectivo promedio. Asumiendo una condición de prueba triaxial donde $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, estos esfuerzos pueden ser definidos como:

$$\sqrt{J_2} = \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (16)$$

$$\sigma_m - p_\rho = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) - p_\rho \quad (17)$$

En este criterio, el segundo esfuerzo deviatorio invariante es graficado contra el esfuerzo efectivo promedio para varias cargas axiales σ_1 y presiones de confinamiento σ_3 . La curva resultante, conocida como envoltente de falla, especifica dos regiones, aquella debajo de la curva que es segura y estable, y la correspondiente a la parte superior que es inestable y lleva a la falla tal y como se aprecia en la Figura 11.

Figura 11 Envoltente de falla Von Mises.



Fuente: Presentación Zuly Carrillo. Estabilidad de pozos (wellbore stability).

1.8.5 Criterio de falla por tensión. La falla por tensión ocurre cuando el esfuerzo impuesto por el lodo de perforación excede la resistencia a la tensión de la formación. Una densidad excesiva del lodo de perforación crea una fractura hidráulica teniendo como resultado pérdidas de circulación y deformación de la matriz. Por lo tanto, esta falla es el límite superior de la densidad del lodo para una perforación segura. La falla por tensión comúnmente ocurre cuando el esfuerzo principal mínimo efectivo excede la resistencia a la tensión de la roca. Matemáticamente este criterio se puede expresar como sigue:

$$\sigma_3 - p_\rho \leq T_0 \quad (18)$$

donde T_0 es la resistencia a la tensión de la roca, σ_3 es el esfuerzo principal mínimo y P_p es la presión de poro.

2 CONCEPTOS ESTADÍSTICOS APLICADOS A LA GEOMECÁNICA

La aplicación de las probabilidades y la estadística en la geomecánica, han logrado resolver el problema de la incertidumbre y el riesgo asociado a determinados modelos de estabilidad de pozo, la estadística como herramienta aplicada, en la mecánica de rocas brinda una visión más real y amplia de los valores que puede asumir un modelo, constituido por parámetros geomecánicos determinados mediante aspectos cualitativos. La incertidumbre asociada a las propiedades mecánicas de las rocas y los valores obtenidos a partir de ellas para la toma de decisiones apropiadas, ha llevado a varios autores a sugerir que los métodos determinísticos tradicionales de análisis de estabilidad en taludes deben ser reemplazados por métodos probabilísticos (Priest & Brown, 1983; McMahon, 1975; Vanmarcke, 1980; Morriss & Stoter, 1983; Read & Lye, 1983).

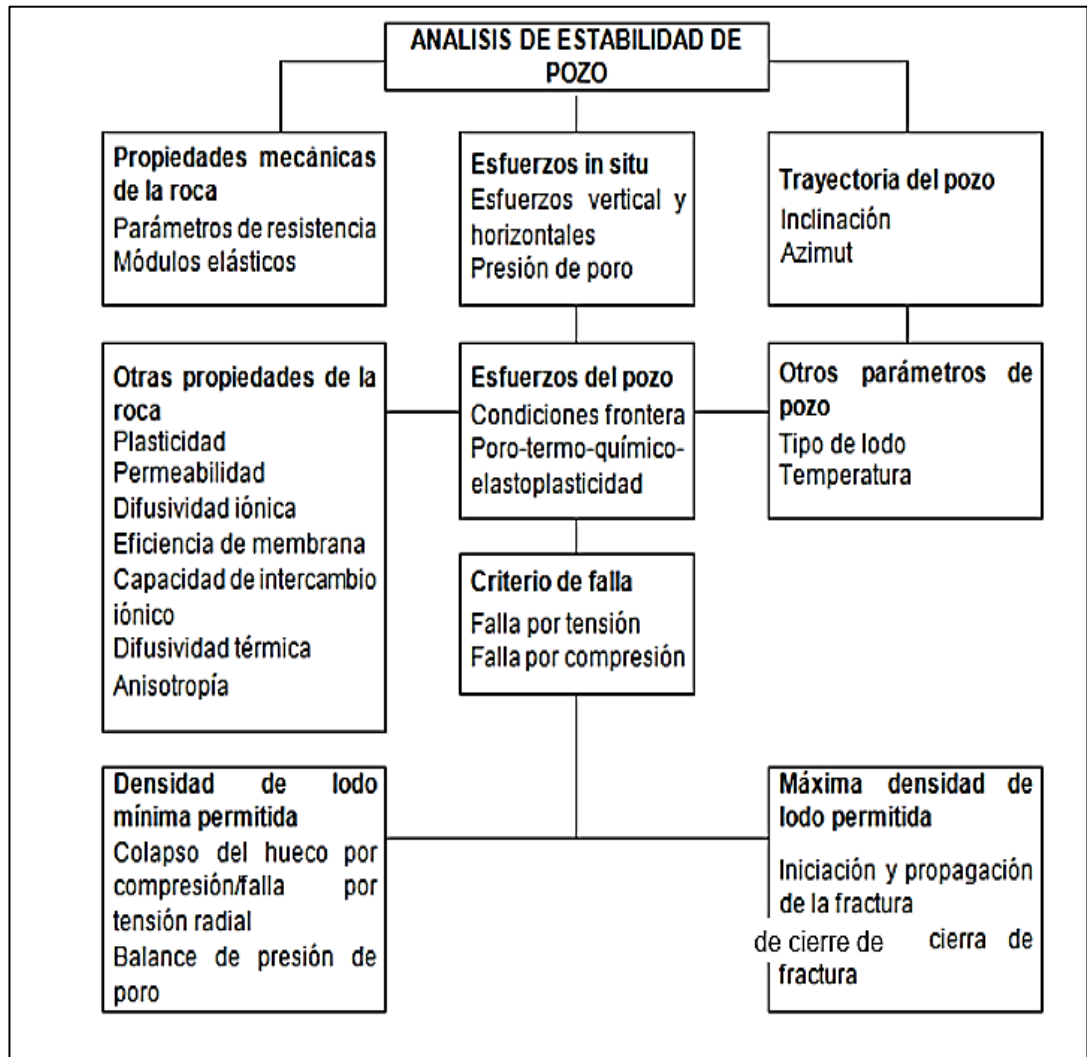
2.1 ENFOQUE PROBABILISTICO DE LA ESTABILIDAD DE POZO

La simulación de Monte Carlo (SMC) consiste en generar aleatoriamente una muestra de N valores de parámetros inciertos tomados de cada una de sus distribuciones de probabilidad, y calcular los N valores correspondientes de los resultados de un modelo. El resultado final será N conjuntos de parámetros inciertos y los respectivos N valores de los resultados del modelo, con lo cual es posible construir una distribución de probabilidad para los resultados de dicho modelo. Una aplicación de la SMC se da en el modelo de estabilidad de pozo. (Plazas, 2015)

Los modelos de estabilidad tradicionales se enfocan en métodos determinísticos que han demostrado ser claves en la planeación del pozo y descripción de la estabilidad de este, sin embargo, estos modelos están basados en la suposición de condiciones in situ y propiedades de la roca que son conocidas de forma precisa. Un problema adicional de estos modelos tiene que ver con el error asociado con cada medida o

incertidumbre intrínseca. Generalmente se considera solo el valor promedio o representativo de cada parámetro geomecánico, sin embargo, estos valores son aleatorios en diferentes grados y constan de una determinada distribución de probabilidad que puede ser modeladas. Es necesario tomar en cuenta la variabilidad de estos parámetros, porque su incidencia en el diseño es considerable (Hoek E. , 1998)

Figura 12 Esquema de los parámetros involucrados en la estabilidad de pozo.



Fuente: Modificado de FJAER, E. et al., 2008. Petroleum related rock mechanics. Elsevier, Hungary. 492 p.

En la figura 12 se observan los parámetros de entrada involucrados en el modelo de estabilidad de pozo esta investigación se basa en la caracterización estadística de las propiedades mecánicas de la roca obtenidas por medición directa (parte izquierda superior del diagrama). Los métodos de simulación como la SMC son necesarios cuando se requiere realizar un análisis probabilístico de una función de estado límite con muchas variables aleatorias implícitas. Para esto es necesario conocer las propiedades estadísticas de cada una de las variables, sus medidas de tendencia central, sus varianzas y en cuanto sea posible sus cuartiles, para determinar a cuál distribución de probabilidad mejor se ajusta.

Distintos autores presentan variabilidades y promedios de diferentes parámetros geomecánicos dependiendo del interés de estudio de la investigación. (Plazas, 2015; Hoek E. , 2006)

Tabla 10. Propiedades medidas de laboratorio en rocas intactas.

Tabla 10 Propiedades medidas de laboratorio en rocas intactas.

<i>Rock type</i>	<i>Uniaxial compressive Strength MPa</i>		<i>Modulus of elasticity GPa</i>	
	<i>Range</i>	<i>Average</i>	<i>Range</i>	<i>Average</i>
Sandstone	101-219	166	14.3-29.3	22.3
Siltstone	22-95	41	6.7-16.2	10.6
Interbedded sandstone and siltstone	34-97	66	10.1-17.9	12.8
Coarse grained sandstone	49-123	72		

Fuente: Modificado de (Hoek E. , 2006, pág. 6)

En la Tabla 10 se definen rangos de valores según tipo de roca, es decir se tiene un rango de valores muy amplio para una formación como tal, que puede estar compuesta por sucesiones de limos y areniscas ya sea el caso esto de entrada genera un valor de incertidumbre en la estimación del valor de la propiedad, mientras que de la tabla 11 se tiene un caso de estudio particular para la formación la Luna en un rango de profundidad sin embargo los valores presentados provienen de métodos cualitativos con su respectivo error intrínseco.

Tabla 11 Rangos de variación de los datos de entrada con base en los diferentes enfoques de cuantificación de incertidumbre para la formación la Luna

PARAMETRO	ENFOQUE					
	OPINION EXPERTO		VARIABILIDAD		PROPUESTO	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Presión de poro (psi/ft)	0.4554	0.8458	0.5918	0.7094	0.6306	0.6706
Esfuerzo vertical (psi/ft)	1.0132	1.0592	1.0455	1.0467	1.0396	1.0526
Relación de Poisson	0.2290	0.2798	0.2317	0.2771	0.1938	0.3149
Cohesión (psi)	910.28	2730.82	1221.22	2419.87	1578.42	2062.68
Angulo de fricción (rad)	28.02	42.04	33.04	37.02	33.95	36.10
Esfuerzo horizontal mínimo (psi/ft)	0.9313	1.0132	0.9367	1.0239	0.9406	1.02
Esfuerzo horizontal máximo (psi/ft)	1.0592	1.2866	1.0467	1.1280	1.0526	1.203
Resistencia a la tensión (psi)	524.204	786.31	436.73	873.78	568.56	741.94

Fuente: Modificado de (Plazas, 2015, pág. 93)

2.2 REVISIÓN DE CONCEPTOS ESTADÍSTICOS

Es necesario conocer los conceptos básicos de la estadística descriptiva mediante un resumen para comprender la importancia de los mismos en la caracterización estadística de las formaciones.

2.2.1 Media aritmética para datos agrupados. Es el promedio aritmético de todos los datos o valores. Podemos agrupar los datos en tablas de

frecuencia y en intervalos, se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i f_i}{n} \quad (19)$$

Donde:

\bar{x} : Media aritmética.

x_i : Marca de clase.

f_i : Frecuencia de clase

n : Total de frecuencias.

2.2.1.1 Marca de clase. La marca de clase es el punto medio de cada intervalo. Esta dada por la siguiente ecuación:

$$x_i = \frac{L_i + L_s}{2} \quad (20)$$

Donde L_i : límite inferior del intervalo y L_s : límite superior del intervalo.

2.2.2 Mediana. La mediana se encuentra en el intervalo donde la frecuencia acumulada llega hasta la mitad de la suma de las frecuencias absolutas. Esta dada por la siguiente ecuación:

$$M_e = \frac{L_i + \frac{n}{2} - F_{i-1}}{f_i} \cdot a \quad (21)$$

Donde:

M_e : Mediana.

a : Amplitud de intervalo.

F_{i-1} : Frecuencia acumulada anterior.

2.2.3 Moda. Es el valor que representa la mayor frecuencia absoluta. Esta dada por la siguiente ecuación:

$$M_0 = L_i + \frac{f_i - f_{i-1}}{(f_i - f_{i-1}) + (f_i - f_{i+1})} \cdot a \quad (22)$$

2.2.4 Varianza. Es el promedio de los cuadrados de las desviaciones con respecto a la media aritmética. Matemáticamente es una buena medida de dispersión, pero da valores muy altos, por lo cual en estadística descriptiva se utiliza la desviación estándar. Se apoya en una propiedad de la media aritmética según la cual la suma de los cuadrados de las desviaciones respecto a la media es un valor mínimo. La varianza permite comparar la dispersión de dos o más muestras si sus medias aritméticas son similares (Botella, 1993).

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 f_i}{n} \quad (23)$$

2.2.5 Desviación estándar. Esta medida permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media. La desviación estándar nos da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para calcular la desviación estándar basta con hallar la raíz cuadrada de la varianza, por lo tanto su ecuación sería:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 f_i}{n}} \quad (24)$$

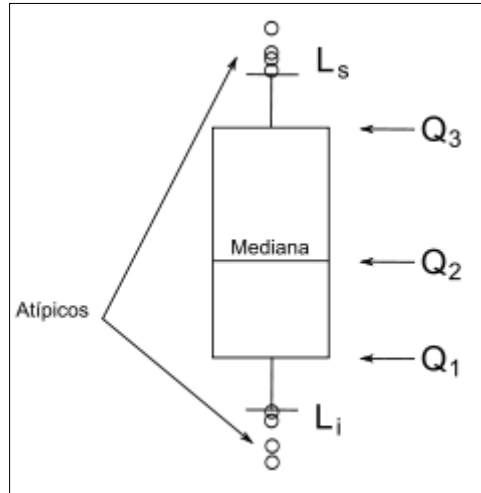
2.2.6 Histograma de frecuencias. En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos. La utilidad del histograma tiene que ver con la posibilidad de establecer de manera visual, ordenada y fácilmente comprensible todos los datos numéricos estadísticos que pueden tornarse difíciles de entender.

Se utiliza cuando se estudia una variable continua, sus valores se agrupan en clases, es decir, valores continuos.

2.2.7 Diagrama de cajas y bigotes. Los diagramas de Caja-Bigotes son una presentación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo, tales como la dispersión y simetría. Para su realización se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos, sobre un rectángulo, alineado horizontal o verticalmente como se puede ver en la Figura 13.

Una gráfica de este tipo consiste en una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartilico. Este rectángulo está dividido por un segmento vertical que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero (recordemos que el segundo cuartil coincide con la mediana). Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes. Estos bigotes tienen un límite de prolongación, de modo que cualquier dato o caso que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente.

Figura 13 Representación diagrama de caja y bigotes.



Fuente: Tomado de (Barrios, 2015).

2.2.8 Distribución de probabilidades. La distribución de probabilidad de una variable aleatoria es una función que asigna a cada suceso definido sobre la variable aleatoria la probabilidad de que dicho suceso ocurra. La distribución de probabilidad está definida sobre el conjunto de todos los sucesos y cada uno de los sucesos es el rango de valores de la variable aleatoria. Las distribuciones de probabilidad están relacionadas con la distribución de frecuencias. De hecho, podemos pensar en la distribución de probabilidad como una distribución de frecuencias teórica. Una distribución de frecuencias teórica es una distribución de probabilidades que describe la forma en que se espera que varíen los resultados. Debido a que estas distribuciones tratan sobre expectativas de que algo suceda, resultan ser modelos útiles para hacer inferencias y tomar decisiones de incertidumbre (Badii et al., 2007a, 2007b).

Los objetivos de distribuciones de probabilidad son:

- a. Introducir las distribuciones de probabilidad que más se utilizan en la toma de decisiones.

- b. Utilizar el concepto de valor esperado para tomar decisiones.
- c. Mostrar qué distribución de probabilidad utilizar, y cómo encontrar sus valores.
- d. Entender las limitaciones de cada una de las distribuciones de probabilidad que utilice.

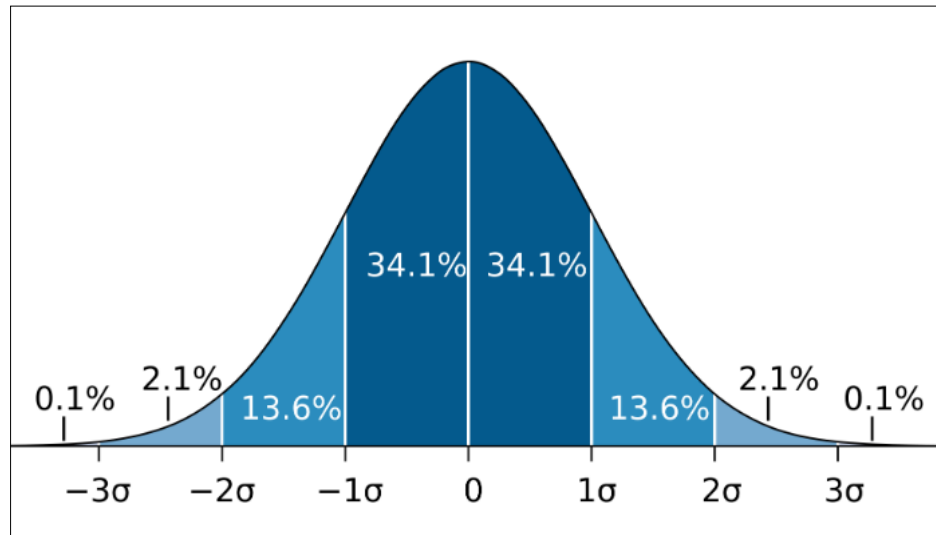
2.2.8.1 Distribución de probabilidad normal. El objetivo de la distribución de probabilidad normal es conducir la variable aleatoria normal, una de las variables aleatorias continuas más importantes y que se utiliza con mayor frecuencia. Se da su distribución de probabilidad y se muestra cómo puede emplearse la distribución de probabilidad (Badii et al., 2007a).

La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos naturales, es importante por su relación con la estimación por mínimos cuadrados. La distribución de probabilidad normal se trata de enseñar a encontrar la probabilidad de un suceso por medio de la curva normal ver Figura 14 y la tabla de las áreas bajo la curva normal. La distribución normal se utiliza cuando existe una variable aleatoria continua, donde dicha variable puede asumir cualquier valor de una gama de ellos y por tanto la distribución de probabilidad es continua. La distribución normal representa las siguientes propiedades:

- a. La curva es simétrica, tiene un solo pico, por consiguiente, es unimodal, presenta una forma de campana.

- b. La media de una población distribuida normalmente se encuentra en el centro de su curva normal.
- c. A causa de la simetría de la distribución normal de probabilidad, la media, la moda y la mediana de la distribución se encuentran también en el centro; en consecuencia, para una curva normal, la media, la mediana y la moda tienen el mismo valor.
- d. Teóricamente, la curva se extiende en ambas direcciones, y tiende gradualmente a unirse con el eje horizontal. Sin embargo, se extiende al infinito, sin tocar nunca el eje de la abscisa.

Figura 14 Distribución de probabilidad normal.



Fuente: Tomada de (Veenhoff, 2016).

2.3 Distribuciones de probabilidad utilizados en estabilidad de pozos

Generalmente se requiere asumir algún tipo de distribución de probabilidad en los parámetros de entrada, debido a la insuficiencia de datos de la muestra analizada en estudios de estabilidad de pozo, estas asunciones se basan en estudios anteriores sobre litologías similares o correlaciones con poblaciones de datos arrojados de registros, En la tabla 12 se observa como la distribución probabilística de tipo normal se establece en la mayoría de los estudios, esto debido a que es el modelo más común para caracterizar distintos fenómenos reales, entre ellos los errores cometidos al medir magnitudes físicas.

Tabla 12 Distribuciones de probabilidad de los parámetros de entrada utilizados en diferentes estudios de estabilidad de pozo con un enfoque probabilístico.

ESTUDIO	TIPO DE DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA USADA
DA FONTAURA, Sergio, et al. (2002)	No aplica
MOOS, Daniel, et al. (2003)	Normal
LI AND BAI (2012)	Normal y log-normal
TRAN AND ABOUSLEIMAN (2010)	Normal
UDEGBUNAM ET AL. (2013)	Triangular y uniforme
OTTESEN ET AL. (1999)	Variable
MORITA (1995)	Normal
AL-AJMI AND AL-HARTHY (2010)	Uniforme
HOLZBERG B. (2001)	Normal
(Plazas, 2015)	Normal

Fuente: Tomado de (cretáceo, 2015).

2.4 ANÁLISIS ANOVA

El análisis de la varianza (ANOVA) es una potente herramienta estadística, de gran utilidad, para el control de procesos, como en el laboratorio de mecánica de rocas análisis, para el control de métodos analíticos. Los ejemplos de aplicación son múltiples, pudiéndose agrupar, según el objetivo que persiguen, en dos principalmente: la comparación de múltiples

columnas de datos y la estimación de los componentes de variación de un proceso.

La comparación de diversos conjuntos de resultados es habitual en los laboratorios analíticos. Así, por ejemplo, puede interesar comparar diversos métodos de análisis con diferentes características, diversas muestras de una misma formación como varían sus propiedades mecánicas de la roca. También sería el caso cuando queremos analizar una muestra que ha estado sometida a diferentes pruebas de laboratorio. En todos estos ejemplos hay dos posibles fuentes de variación: una es el error aleatorio en la medida y la otra es lo que se denomina factor controlado (tipo de método, diferentes condiciones, analista o laboratorio). Una de las herramientas estadísticas más utilizadas que permite la separación de las diversas fuentes de variación es el análisis de la varianza ANOVA.

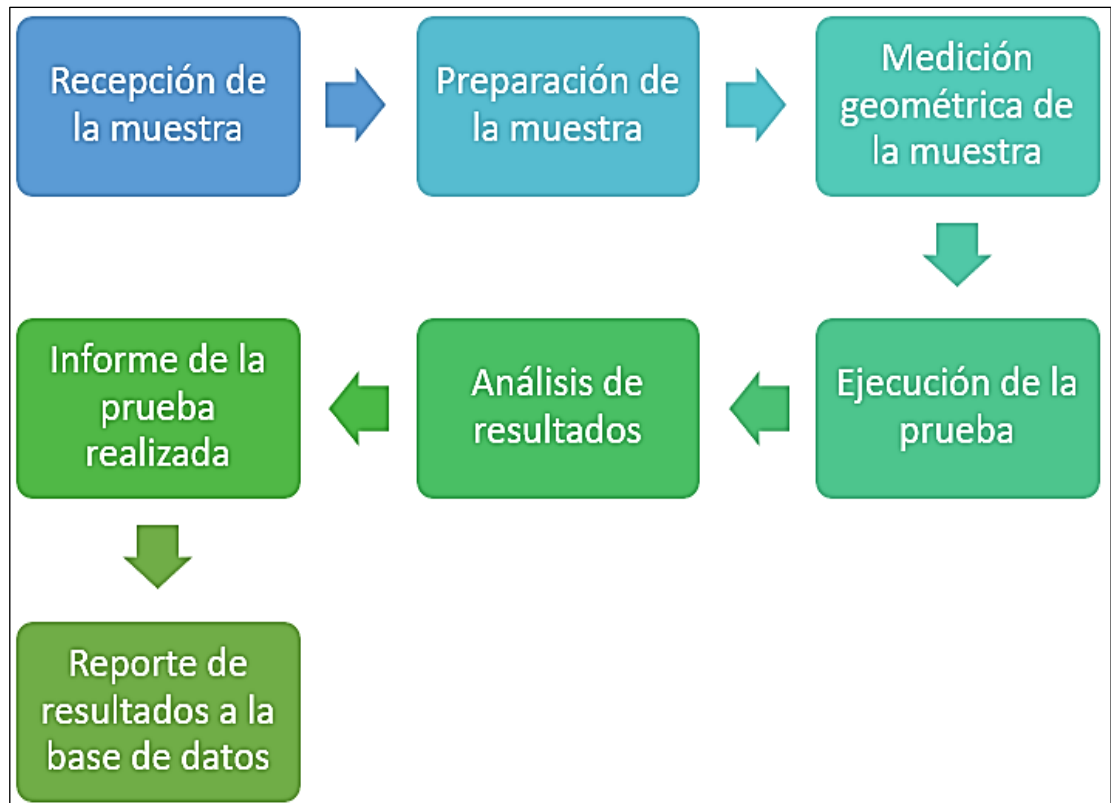
Para utilizar el ANOVA de forma satisfactoria deben cumplirse tres tipos de hipótesis, aunque se aceptan ligeras desviaciones de las condiciones ideales:

- Cada conjunto de datos debe ser independiente del resto.
- Los resultados obtenidos para cada conjunto deben seguir una distribución normal.
- Las varianzas de cada conjunto de datos no deben diferir de forma significativa.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO PROPUESTA

Para plantear una metodología de trabajo que resulte eficiente en el tratamiento de datos con parámetros matemáticos y estadísticos de las propiedades mecánicas medidas en el laboratorio de mecánica de rocas (LMR) del ICP en rocas yacimiento, es indispensable conocer el proceso que resulta en el insumo conocido como propiedad mecánica puntual de la muestra. En la Figura 15 se representa el proceso que siguen las muestras desde el ingreso al LMR del ICP para sus respectivos ensayos y entrega de resultados.

Figura 15 Procedimiento de muestras en LMR del ICP.



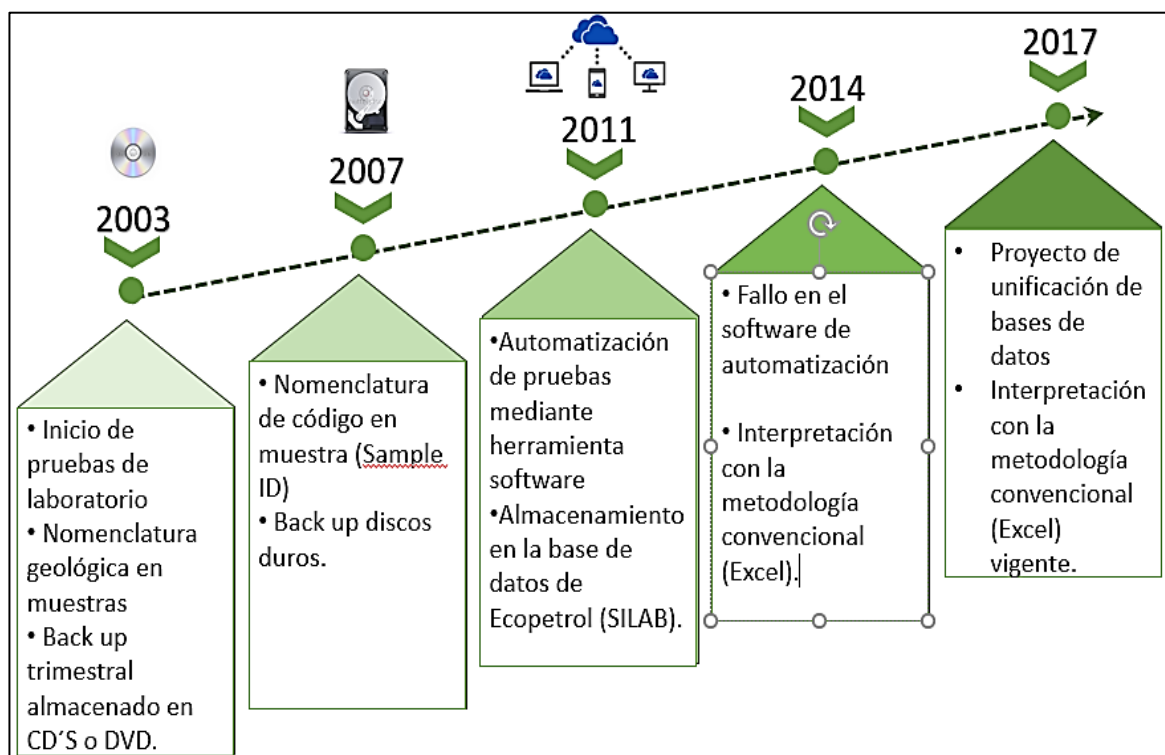
El producto o material para ensayar se entrega por los clientes al LMR del ICP para la ejecución de los diferentes ensayos que se realizan en el

laboratorio. Lo primero que se realiza es la preparación del testigo según la normativa ASTM D4543-04 aplicada en el LMR del ICP, esto implica que la muestra debe poseer una longitud, diámetro y pulido de caras determinado, para su correcta utilización en las diferentes pruebas de mecánica de rocas tanto de carácter no destructivo y destructivo.

Se procede a la evaluación de las propiedades mecánicas de la roca a través de los diferentes equipos dependiendo de la propiedad a estimar, cada ensayo posee una norma técnica o especificación para realizar la prueba. Cuando se realiza una prueba el equipo tiene un software el cual arroja un .dat que es analizado por el personal del LMR del ICP mediante un tratamiento matemático ya sea con un software especializado o una plantilla de Excel. Por último, se valida la información con el profesional a cargo del LMR del ICP, elaborando un informe técnico de la muestra y ensayos realizados con su análisis de resultados. Esta información se carga a la base de datos (SILAB) del instituto colombiano del petróleo.

La Figura 16 indica las diferentes metodologías que se han utilizado en el LMR del ICP para el tratamiento de datos. Al inicio del LMR del ICP, las muestras analizadas se les asignaba una nomenclatura alfanumérica que representaba el campo o formación de origen del testigo acompañado de un código, la información se almacenaba en CD-ROOM o DVD.

Figura 16 Línea temporal de trabajo en el LMR del ICP



En el 2007 se cambian de nomenclatura a las muestras de ingreso del LMR del ICP por un código denominado Simple ID, además la información se guarda en discos duros. Del año 2011 al 2014 se utilizó un software para interpretar las pruebas de laboratorio y la información se almacena en la base de datos de Ecopetrol (Silab). Debido a problemas con el software de automatización de pruebas, actualmente se interpretan las pruebas mediante plantillas de Excel.

La información que se dispone para la presente investigación consta de los datos almacenados en los CD's y discos duros, partiendo de las discontinuidades de metodologías de almacenamiento en el LMR se hace necesario depurar, recuperar y compilar la información referente a pruebas de laboratorio esto debido principalmente al riesgo de daños irreversibles en la información por su dispositivo de almacenamiento.

Los datos obtenidos de la compilación serán analizados con expertos y categorizados por formación, correlacionando datos de profundidad con

registros para así lograr una cuantificación de la cantidad de datos que se tiene para cada formación o paquete de datos una subcategoría será el tipo de prueba realizada para así tener una noción del tamaño muestral que se tiene para cada análisis estadístico. La investigación pretende sentar un precedente de agrupación de valores medidos en laboratorio para las formaciones medidas en el LMR para el caso específico rocas yacimiento.

Las formaciones seleccionadas serán aquellas que representen un interés investigativo por parte de los expertos del LMR o de alguna manera posean características estadísticas particulares que permitan definir una caracterización mecánica acompañada de valores probabilísticos.

3.1 METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LAS FORMACIONES SELECCIONADAS

Como se menciona en el capítulo anterior la herramienta estadística seleccionada será el análisis ANOVA de un factor, la metodología propuesta por (Serra Añó, Ponce Darós, López Bueno, González Moreno, & García Massó, 2014) será la aplicada la cual se representa en las figuras 17 y 18 mediante un diagrama de flujo.

3.1.1 Planteamiento de Hipótesis. El análisis es desarrollado mediante la ayuda del software SPSS statistics como tal la metodología parte del planteamiento de las hipótesis nula y alternativa.

- Hipótesis nula.

H_0 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son iguales

- Hipótesis alternativa

H_1 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son significativamente diferentes

Luego del planteamiento de las hipótesis, se procede a comprobar el cumplimiento de supuestos.

3.1.2 Supuesto de Normalidad. Se comprueba con test de Kolmorov-Smirnoff o Shapiro-Wilks dependiendo de la cantidad de datos analizados, si estos son mayores a 50 se utiliza el test de Kolmorov-Smirnoff en caso contrario se usará Shapiro Wilks.

La metodología propone que si la significancia de los resultados arrojados por el software es superior al 5% se acepta la hipótesis nula validando los supuestos dado el caso.

En caso tal no se cumpla el supuesto de normalidad, existen alternativas:

- Eliminar valores extremos
- Transformar los datos
- Usar prueba de Kruskal Walls con las pruebas Post-Hoc U de Mann-Whitney y ajustando los errores (tasa de error de 0,05 por cada contraste realizado entre pares de datos.
- Comprobar por método grafico y asumir que el ANOVA es robusta y controla los errores de tipo I y II

3.1.2 Supuesto de Independencia. Es decir que las mediciones tomadas no dependen de una misma muestra.

En caso tal no se cumpla este supuesto se sugiere usar el ANOVA de medidas repetidas.

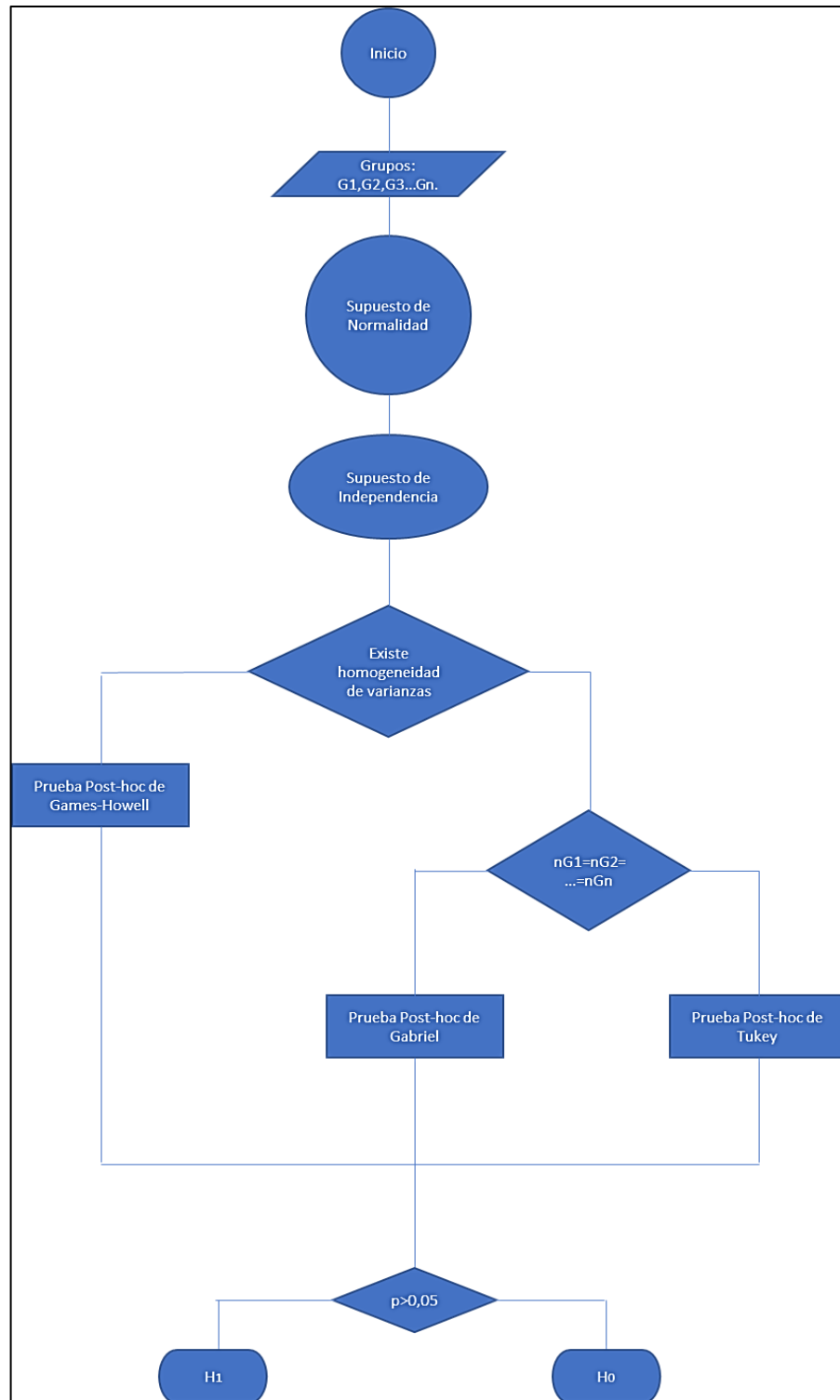
3.1.3 Supuesto de Homogeneidad de varianzas o de (Homocedasticidad). La varianza de una muestra debe ser similar a la varianza de la otra muestra, este supuesto se comprueba con test de levenne y determina el tipo de prueba Post-Hoc seleccionada.

3.1.4 Pruebas Post-Hoc. Estas pruebas buscan las diferencias entre pares de grupos, deben controlar el error de tipo I dependiendo del cumplimiento del supuesto de homocedasticidad y el tamaño muestral se selecciona una u otra.

- Bonferroni: Es mas potente cuando el número de comparaciones es pequeño y se cumple el supuesto de homocedasticidad.
- Tukey: Es mas potente cuando el número de comparaciones es grande y el tamaño de las muestras es similar en los diferentes grupos, además se aplica cuando se cumple el supuesto de homocedasticidad.
- Gabriel: Se usa cuando los tamaños muestrales, son distintos en los diferentes grupos y se cumple el supuesto de homocedasticidad.
- Games-Howell: Se usa cuando las varianzas no son iguales y los tamaños muestrales son distintos en los diferentes grupos.

Luego de la comparación estadística entre pares de grupo se establece según la significancia si existen diferencias significativas entre los grupos además de medir mediante el tamaño del efecto(η^2) la cantidad de varianza que se debe a las diferencias existentes entre las características de los grupos como tal y no de modo individual.

Figura 17 Diagrama de flujo para el análisis ANOVA de un factor



4. TRATAMIENTO DE DATOS

4.1 CONSOLIDADO BASE DE DATOS LMR DEL ICP

Se dispuso de la base de datos del Laboratorio de mecánica de rocas (LMR) del instituto colombiano del petróleo (ICP) la cual constaba de back ups almacenados en CD's y Discos duros, dicha información fue depurada y consolidada como se evidencia en la Tabla 13.

Los datos fueron almacenados por carpetas de muestras (Sample ID) dentro de las cuales se encuentran los diferentes ensayos e interpretaciones realizadas en el LMR del ICP para cada una de estas, la Tabla 13 contiene la información compilada por formación o campo de los diferentes tipos de ensayos realizados en cada una de las muestras.

4.1.1 Criterios de selección de las formaciones de estudio. El objetivo de caracterizar las diferentes rocas yacimiento se plantea mediante métodos estadísticos por formación y se realiza un análisis estadístico por propiedad en cada una de las formaciones de la Tabla 13 se tiene que las formaciones con una mayor cantidad de datos de laboratorio son La Luna, Gacheta, Mirador y Mugrosa con 180, 59, 59 y 46 número de ensayos validados respectivamente, que en este caso serán las rocas yacimiento de estudio ya que además poseen casos estadísticos particulares de estudio como la Luna que es una formación compuesta por diferentes miembros y se plantea con la asesoría de expertos verificar cómo se comportan las diferentes propiedades en cada uno de sus miembros y si es posible analizar algunas de sus propiedades en toda la formación como un mismo paquete de datos estadístico. La formación Mirador que por su parte posee mediciones puntuales de compresibilidad en diferentes pozos y cuáles de ellos presentan igualdad de medias estadísticas y finalmente la formación Mugrosa que tiene datos medidos de laboratorio para muestras de pozo y afloramientos, un análisis estadístico permitiría determinar si las mediciones de afloramientos son representativas para algunas propiedades mecánicas.(Nota: los valores analizados para la formación Mugrosa fueron descartados del estudio debido a la sugerencia de los expertos quienes mencionaron que los valores validados eran significativamente superiores al rango de valores que debería asumir la formación por consiguiente no eran datos consistentes carecían de calidad y confianza por lo que fueron considerados no válidos y de interés de

estudio para el LMR del ICP)

Cada una de las formaciones tiene una cantidad de ensayos validados mediante informes, para cada caso de estudio como se observa en el Grafico 1 se tiene la cuantificación de lo anterior mencionado. Cabe resaltar que el proceso de entrega del insumo o propiedad medida en el laboratorio consta de tres partes.

- La generación de un .dat arrojado por el software de las diferentes herramientas del LMR.
- El análisis de los resultados en un Software o plantilla de Excel previamente establecida.
- La validación de los datos por parte del ingeniero a cargo del LMR para la elaboración de un informe que es almacenado en la base de datos.

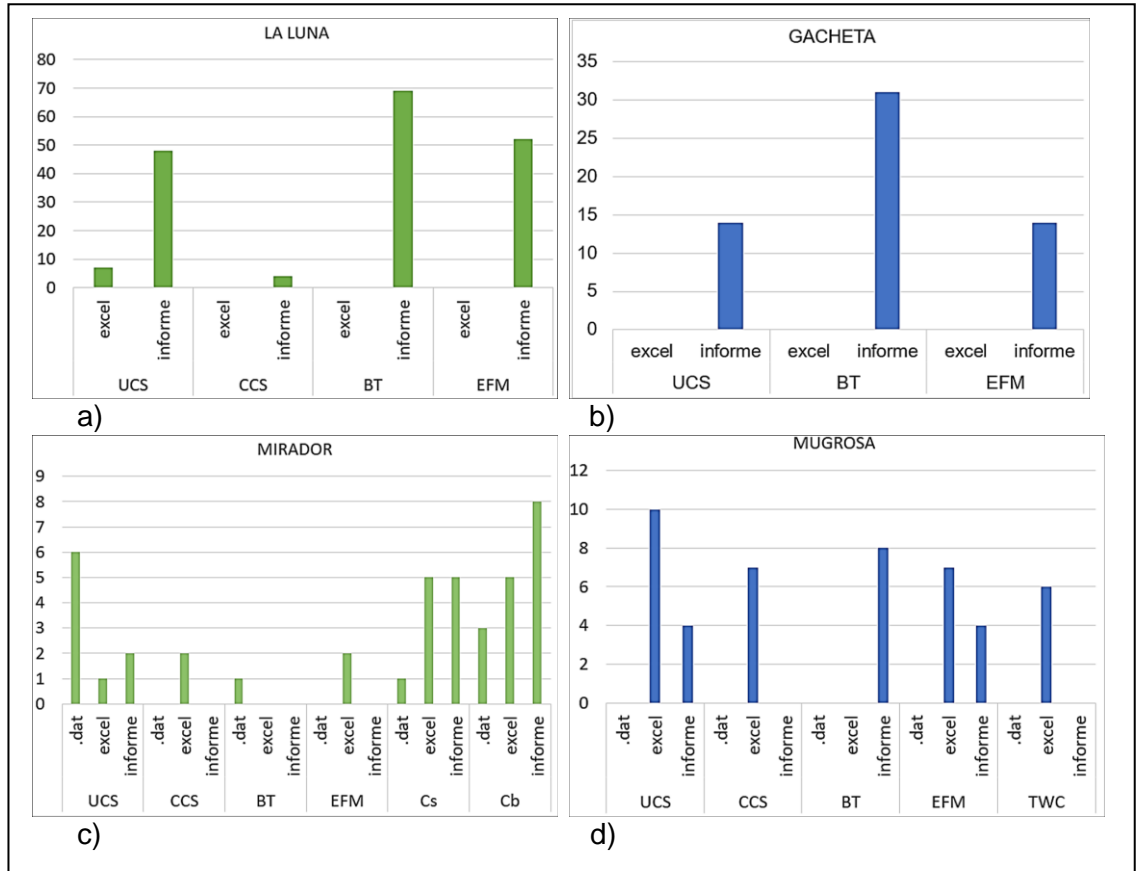
En el Grafico 1 la cuantificación se da para tres casos diferentes (.dat, Excel e informe) los cuales hacen referencia al proceso de validación de información de las diferentes muestras, se deduce por consiguiente que las muestras con Excel ya poseen su respectivo (.dat) y las muestras con informe ya poseen su respectivo Excel y (.dat), excepto aquellas muestras con daños en sus dispositivos de almacenaje.

Tabla 13 Compilación de datos de los diferentes ensayos realizados en el LMR del ICP. (Número de ensayos)

FORMACIÓN/CAMPO/MUESTRA	UCS	CCS	BT	EFM	Uniaxial Acústica	TWC	Cs	Cb	TOTAL
*LA LUNA	55	4	69	52	0	0	0	0	180
GREYSTAR	46	0	0	45	0	0	0	0	91
TETUAN	0	7	55	0	24	0	0	0	86
*GACHETA	14	0	31	14	0	0	0	0	59
*MIRADOR	9	2	1	2	18	0	11	16	59
CEMENTOS SCHLUMBERGER	14	0	28	14	0	0	0	0	56
*MUGROSA	14	7	8	11	0	6	0	0	46
BARCO	8	5	0	7	3	0	8	8	39
TABLAZO	0	0	36	0	0	0	0	0	36
PETROLEA	0	0	0	16	0	0	16	0	32
RUBIALES	8	9	10	3	0	0	0	0	30
BONANZA	8	0	12	8	0	0	0	0	28
TAMBOR	10	5	7	5	0	0	0	0	27
LA CRECIENTE	0	0	0	2	5	0	7	7	21
QUIRIYANA	10	0	2	9	0	0	0	0	21
CAGUI	7	0	0	2	4	0	2	4	19
CEMENTOS HALLIBURTON	3	0	12	3	0	0	0	0	18
MIRADOR	4	8	4	2	0	0	0	0	18
MONSERRATE	8	0	2	8	0	0	0	0	18
PAJA	10	0	8	0	0	0	0	0	18
LECHADA 14.5 WELL LIFE	3	0	3	8	0	0	0	0	14
LECHADA SAN ANTONIO_2	3	0	3	8	0	0	0	0	14
CAIRO	5	4	0	1	3	0	0	0	13
CARBONERA	0	0	13	0	0	0	0	0	13
YOPAL 14.5 PPG ELASTICEM	2	0	3	8	0	0	0	0	13
TIBU	7	0	4	0	0	0	0	1	12
APIAY	3	0	3	1	2	0	1	1	11
CHIPAQUE	7	0	4	0	0	0	0	0	11
JAZMIN	0	0	0	4	0	0	4	0	8
LA PAZ	7	0	0	0	0	0	0	0	7
LECHADA 14.5 CONVENCIONAL	1	0	1	5	0	0	0	0	7
AYHOMBE-1	0	0	3	3	0	0	0	0	6
LIRIA	1	2	2	0	0	0	1	0	6
LOS CUERVOS	4	0	0	0	1	0	0	1	6
SURIA	1	1	0	2	0	0	1	0	5
GUADALUPE	2	0	0	0	0	0	2	0	4
MERCEDEZ	0	0	0	4	0	0	0	0	4
LLANITO	3	0	0	0	0	0	0	0	3
SUCUMBOS	0	0	2	0	0	0	0	0	2
BEREA	1	0	0	0	0	0	0	0	1
SIMITÍ	0	0	1	0	0	0	0	0	1
VOLCANERA	1	0	0	0	0	0	0	0	1

*Formaciones de estudio

Gráfico 1 Histograma de frecuencias (unidades) de las diferentes pruebas realizadas en las formaciones de estudio.



Se puede analizar en las gráficas 1.a y b de las formaciones La Luna y Gacheta tienen todas sus muestras validadas con su respectivo informe. En las gráficas 1. c y d se puede observar para las formaciones Mirador y Mugrosa que hay pruebas sin validar de las cuales algunas fueron analizadas y validadas con orientación del profesional a cargo del LMR del ICP.

4.1.2 Breve descripción de las formaciones de estudio. Es necesario resaltar brevemente las formaciones seleccionadas para el estudio.

- **FORMACIÓN LA LUNA**

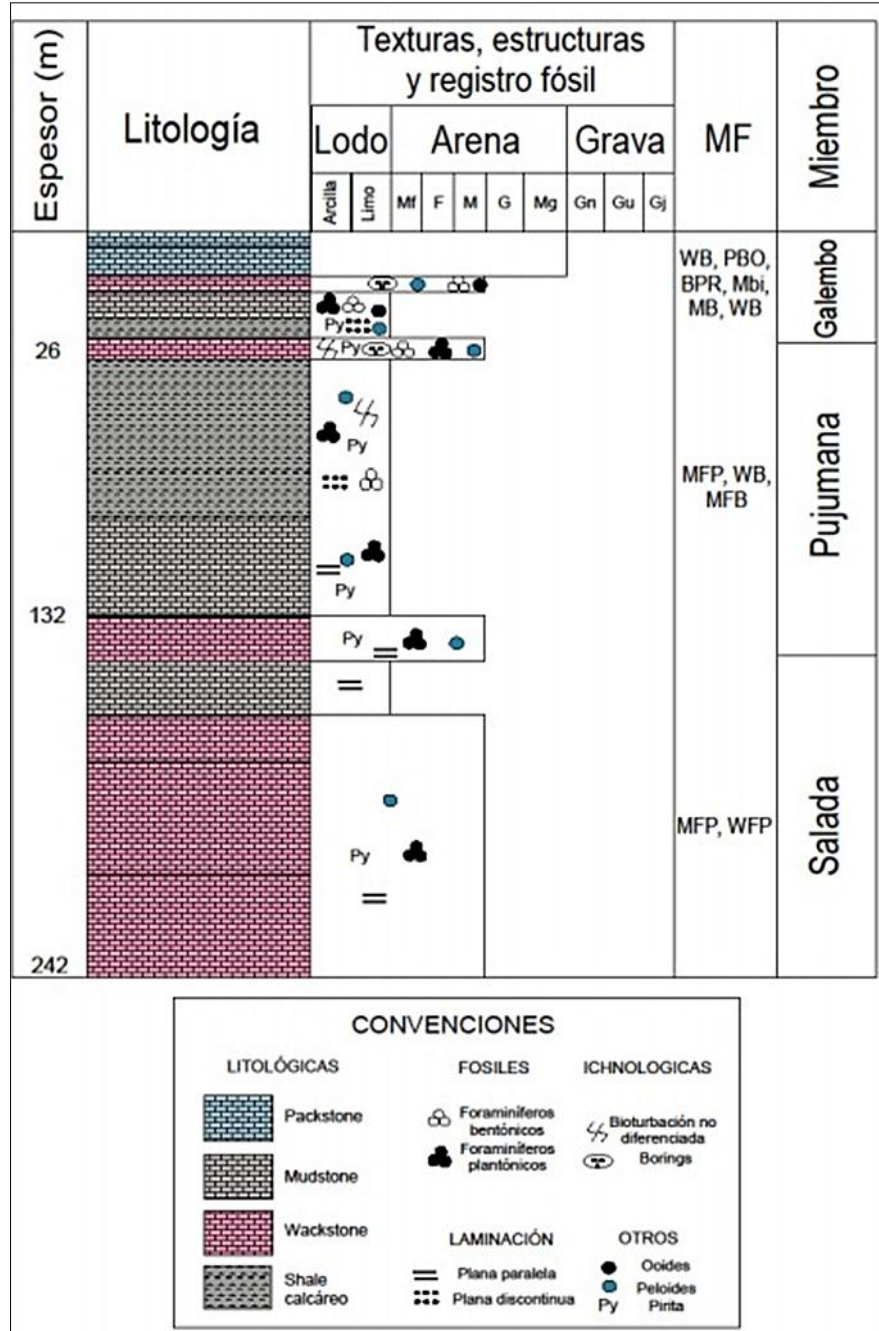
La Formación La Luna de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena es una unidad calcárea fina constituida por biomicritas, con variaciones graduales a lo largo de la sucesión. Estas variaciones proporcionan las características que permiten definir adecuadamente cada uno de los Miembros (Salada, Pujamana y Galembo). Los sedimentos basales de la unidad se desarrollaron sobre la superficie transgresiva que coincide con la inundación regional a inicios del Turoniano.

Las intercalaciones de capas enriquecidas en terrígenos en las biomicritas o son cenizas volcánicas o provienen de áreas continentales lejanas y se constituyen en los aportes secundarios que definen los cambios que sustentan los miembros. El Miembro Salada está compuesto por biomicritas de foraminíferos plantónicos, con capas intercaladas afectadas por procesos diagenéticos particulares, asociados al aporte terrígeno extracuenca, al parecer derivadas de episodios de cenizas. El Miembro Pujamana son biomicritas de foraminíferos plantónicos y bentónicos que contienen material fino terrígeno, aspecto que singenéticamente disminuye la porosidad.

El Miembro Galembo es el conjunto calcáreo de biomicritas donde predominan los foraminíferos bentónicos del género *Siphogenerinoides*, típicos del Campaniano. Estas biomicritas se mezclan, con material fosfático fino, singenético o en forma de bioclastos, pelets y oolitos de origen primario o por reemplazamiento. El material terrígeno se presenta como limo de cuarzo y todo el conjunto de elementos del armazón se van formando en sucesiones granocrecientes, somerizantes separadas por superficies de inundación. El contacto superior con la Formación Umir es una superficie de somerización y de cambio de la configuración costera. (Carlos Andres Ballesteros Camaro, 2012)

Esta formación comprende 3 miembros: Salada, Pujamana y Galembo, tal como se puede ver en la Figura 19.

Figura 19 Columna Estratigráfica de la Formación La Luna.

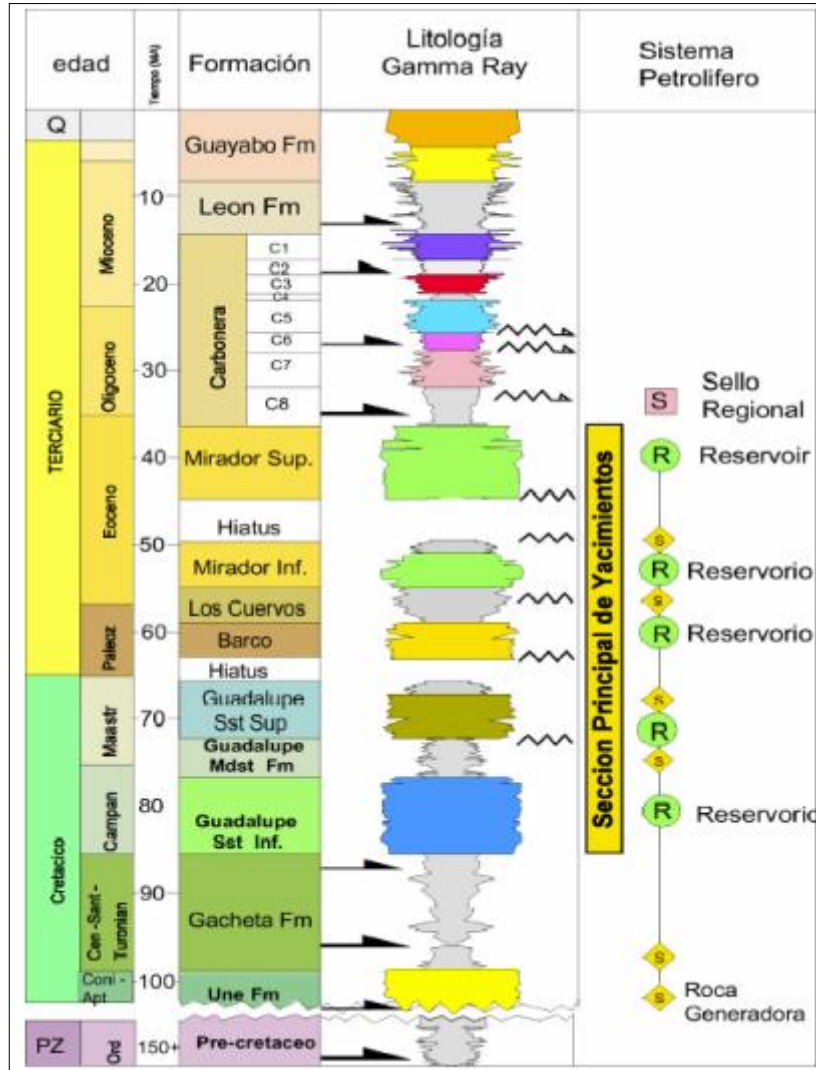


Los miembros poseen características mineralógicas diferentes:

- **Galemo:** Shale calcáreo de estratificación delgada, negro, duro, con delgadas intercalaciones de caliza arcillosa. Se hallan concreciones de caliza discoidal con amonitas y capas delgadas de chert estratificado azul-negro. Capas fosfáticas cerca del tope contienen abundantes fósiles. (10% de la Formación)
 - **Pujumana:** Shale calcáreo de estratificación delgada, gris a negro. (50% de la Formación)
 - **Salada:** Shales calcáreos de estratificación delgada, negros, duros. Unas pocas capas delgadas de caliza negra y textura fina presentes con cintas y concreciones de pirita. Concreciones de caliza de forma elíptica son características de esta unidad. (40% de la Formación) (cretáceo, 2015)
-
- **FORMACIÓN MIRADOR**

La Formación Mirador, ubicada en la cuenca de los Llanos orientales, descansa discordantemente sobre la Formación Los Cuervos y en la parte superior está en contacto concordante con la Formación Carbonera, se puede ver en la Figura 20. Su límite basal coincide con una de las principales discordancias regionales de la cuenca, que corresponde a un segmento faltante de secuencia, mientras que el contacto superior con la Formación Carbonera es concordante en la mayor parte de los Llanos excepto en el campo Caño Limón. (Jenny Martinez, 2006)

Figura 20 Columna Estratigráfica Generalizada del Piedemonte Llanero.



Fuente: Tomada de (Julieta Sanchez, 2005).

La formación Mirador es de edad Eoceno tardío. Se encuentra dividida en dos miembros, denominados Inferior y Superior. Tiene un espesor promedio de 400 fts, su porosidad es relativamente baja contrastándose con su alta permeabilidad y se aproxima al modelo ideal de esferas

empaquetadas no cementadas. Su litología comprende un conjunto de areniscas masivas con diferentes granulometrías, generalmente granodecrecientes de base a techo compuesta por cuarzo, algunas veces feldespatos, materia orgánica leñosa y glauconita hacia la parte superior de la secuencia (Ortiz, 2005).

- **FORMACIÓN GACHETA**

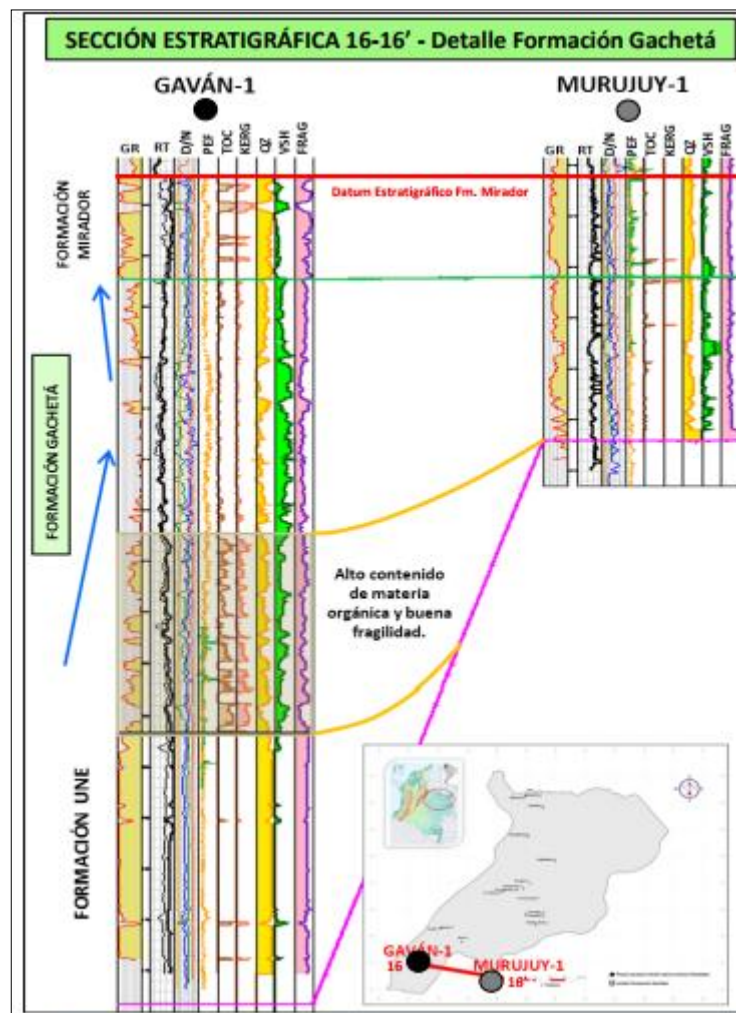
Representa la máxima transgresión del Cretáceo hacia el Oriente y Sureste, sobre el Escudo de Guyana. Esto implica que el límite de erosión o deposición oriental se localiza siempre más al este que los límites sedimentarios de las formaciones Une y Guadalupe. Está constituida por una secuencia de lutitas, de color gris a gris oscuro, con desarrollos menores de areniscas, con contenido variable de glauconita; presenta a veces pequeños niveles calcáreos. Esta formación se acuña o no está presente por erosión en el oriente y suroriente de la cuenca. El espesor aumenta hacia el noroccidente, y el valor máximo encontrado en el sector suroccidental de la cuenca, en las proximidades Chichimene-1, Vanguardia-1, Cumaral-1 y Medina-1, es superior a 600 pies. Hacia el noreste el espesor máximo se encuentra en el pozo Chigüiro-1. Esta formación es productora en varios campos de la cuenca.

Esta formación se depositó durante el intervalo de tiempo Turoniano temprano Coniaciano, mientras se originaba un proceso tectónico que generó la mayor subsidencia en la cuenca. Durante la sedimentación de esta formación el avance del nivel del mar alcanzó su máximo nivel, controlando el aporte de clásticos gruesos, permitiendo la sedimentación de intervalos lutíticos ricos en materia orgánica. Considerando un enfoque hacia la investigación de yacimientos no convencionales en la cuenca de Llanos Orientales, la Formación Gachetá reuniría los parámetros mínimos para ser considerada con potencial para ser caracterizada desde este punto de vista.

La Formación Gachetá conforma una secuencia estratigráfica como se

observa en la Figura 21. Cambios litológicos muy marcados se desarrollaron debido a los diferentes procesos de sedimentación durante los eventos transgresivos y regresivos ocurridos durante este período. Los diferentes ambientes de sedimentación generados en diferentes paleobatimetrías, incidieron en la composición del kerógeno, que pudo haberse desarrollado desde paleobatimetrías muy someras, con una mezcla de materia orgánica continental y marina, a condiciones de materia orgánica estrictamente marinas, cuando la sedimentación ocurrió en paleobatimetrías de mayores profundidades.

Figura 21 Sección estratigráfica al sur de la cuenca Llanos Orientales ubicación pozo Gaván 1.



Fuente: Tomado de (Hidrocarburos, 2012).

4.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA FORMACIÓN LA LUNA

La formación la Luna está conformada por tres miembros (Galembó, Pujamana y Salada) que en este caso fueron muestreados para dar una caracterización de dicha formación se hace necesario realizar un análisis de varianza de un factor (ANOVA) con soporte en el software estadístico IBM SPSS Statistics® (Versión de prueba). Donde se plantean las hipótesis de estudio.




Hipótesis nula.

H₀: Las medias de las muestras de los diferentes miembros son iguales

Hipótesis alternativa

H₁: Las medias de las muestras de los diferentes miembros son significativamente diferentes

Tabla 14 Base de datos para resistencia a la tensión (incompleta).

	 BT	 Prof	 Miembro
1	153,15	9385,63	1
2	845,03	9418,00	1
3	606,62	9426,00	1
4	846,67	9445,67	1
5	899,57	9508,00	1
6	511,69	9555,00	1
7	902,97	9562,00	1
8	961,63	9573,63	1
9	767,58	9587,00	1
10	878,94	9616,00	1
11	447,16	9616,29	1
12	889,08	9644,00	1
13	300,54	9671,58	1
14	1245,20	9671,67	1
15	619,10	9688,75	1
16	1864,13	9801,71	1

4.2.1 Resistencia a la tensión (To), formación la luna. La To es ingresada al software con su respectiva profundidad y factor (miembro).

Los factores establecidos para cada miembro están dados de la siguiente forma

1: Para miembro Galembo

2: Para miembro Pujamana

3: Para miembro Salada

Así la base de datos para Resistencia a la Tensión de la formación la Luna en el software IBM SPSS Statistics® (Versión de prueba) quedaría como en la Tabla 14.

La primera propiedad para analizar es la de la resistencia a la tensión, evaluada mediante la prueba del Brazilian test (método directo).

Para ello es necesario validar los supuestos

- **Supuesto de Normalidad:** que es validado mediante un análisis de distribución probabilística de las muestras o pruebas de Kolmogorov-Smirnov (para más de 50 datos por muestra) o Shapiro-Wilks. (para menos de 50 datos por muestra). En la Tabla 15 se observan los dos métodos confrontados. Para el caso de estudio la cantidad de muestras es inferior a las 50 muestras por grupo de datos, es decir la prueba más potente será Shapiro-Wilk en donde:

Tabla 15 Pruebas de normalidad para To en la Luna.

Pruebas de normalidad							
	Miembro	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a la Tensión (psi)	Galembo	,116	46	,139	,947	46	,035
	Pujamana	,184	9	,200*	,948	9	,665
	Salada	,147	14	,200*	,960	14	,720

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

Galembo tiene una significación inferior al 5% lo que rechaza la hipótesis nula de Normalidad, caso contrario sucede en Pujamana y Salada en donde su significancia es mayor al 5% cuyos casos aceptan la hipótesis

nula de distribución normal, sin embargo el número de datos se aproxima a los 50 en el miembro galembo, la hipótesis nula sería aceptada por la prueba de Kolmorov-Smirnov, donde su significancia es mayor al 5%, para sustentar este supuesto se analiza el histograma de frecuencias Grafico 2. Y los descriptivos estadísticos Tabla 16. de la formación Galembo. Se aprecia que a pesar de que el miembro tiene una medida de tendencia central se recuesta hacia su izquierda esto se comprueba en el coeficiente de asimetría ($g_1 > 0$: Curva asimétricamente positiva) y curtosis ($g_2 > 0$: Leptocúrtica “un alto grado de concentración poblacional”) Tabla 15. De lo que se asume por métodos gráficos que la distribución es de tipo log-normal

Gráfico 2 Histograma de frecuencias en la formación la luna para miembro Galembo.

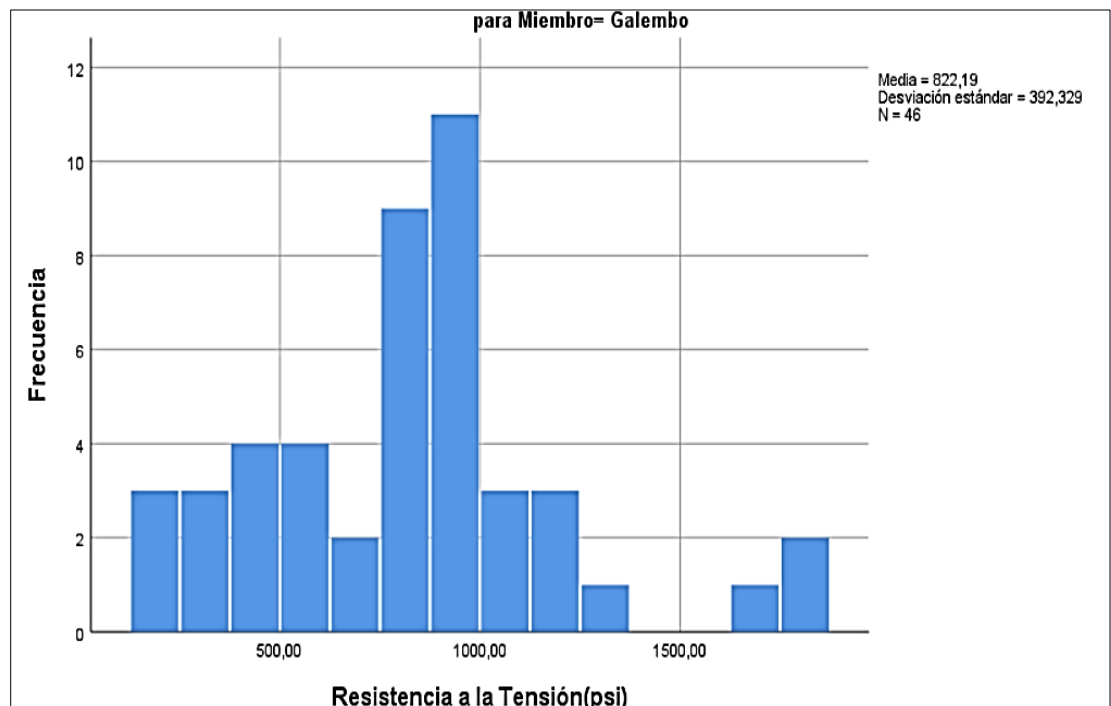


Tabla 16 Descriptivos estadísticos en la formación la luna para miembro Galembo.

Descriptivos						
Miembro				Estadístico	Desv. Error	
Resistencia a la Tensión (psi)	Galembo	Media		822,1913	57,84576	
		95% de intervalo de confianza para la media		Límite inferior	705,6840	
				Límite superior	938,6986	
		Media recortada al 5%		803,2442		
		Mediana		845,8500		
		Varianza		153922,081		
		Desv. Desviación		392,32905		
		Mínimo		153,15		
		Máximo		1864,13		
		Rango		1710,98		
		Rango intercuartil		468,63		
		Asimetría		,596	,350	
		Curtosis		,843	,688	

- Supuesto de homogeneidad de varianzas (homocedasticidad): Que dice que la varianza de una muestra debe ser similar a la varianza de la otra muestra, se comprueba con test de Levene Tabla 17.

Tabla 17 Prueba de homogeneidad de varianzas de la resistencia a la tensión para la formación la Luna para el modelo de los tres miembros

Prueba de homogeneidad de varianzas					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la Tensión (psi)	Se basa en la media	,409	2	66	,666
	Se basa en la mediana	,454	2	66	,637
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	,454	2	63,458	,637
	Se basa en la media recortada	,459	2	66	,634

La significancia para el caso de las medias es mayor al 5% es decir el modelo acepta la hipótesis nula en donde la media de los modelos es igual y podemos analizar la formación la Luna como un mismo paquete de datos estadísticos sin excluir alguna formación.

- Supuesto de independencia. Este supuesto se cumple al existir una

diferencia mineralógica y de algunas propiedades a diferentes profundidades de muestreo es decir a pesar de que la población proviene de una misma formación, ninguna muestra o condición se repite entre ellas.

Luego del análisis de supuestos se concluye que la formación la luna en las pruebas de To tiene una media igual entre miembros lo que permite analizar todo el paquete de datos como un solo modelo estadístico y en la Tabla 18. se aprecian los resultados totales para la formación.

Tabla 18 Estadísticos descriptivos de To para la formación La Luna

Descriptivos								
Resistencia a la Tensión(psi)								
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Galembó	46	822,1913	392,32905	57,84576	705,6840	938,6986	153,15	1864,13
Pujamana	9	861,2911	264,12097	88,04032	658,2698	1064,3125	345,45	1199,50
Salada	14	830,6400	351,75959	94,01171	627,5401	1033,7399	180,98	1536,06
Total	69	829,0055	365,91304	44,05075	741,1036	916,9074	153,15	1864,13

Para analizar la cantidad de varianza generada entre pares de grupos y su relación entre medias se usan pruebas Post-Hoc las cuales nos dicen entre cuales grupos existen diferencias estadísticamente significativas en el caso de estudio se usa la prueba de Gabriel Tabla 19 que se aplica en grupos con distinto número de sujetos entre sí y con el supuesto de normalidad cumplido.

Tabla 19 Pruebas de comparaciones múltiples de la To por el método de Gabriel para Formación la Luna

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Resistencia a la Tensión(psi)						
Gabriel						
(I) Miembro	(J) Miembro	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Galembo	Pujamana	-39,09981	135,29003	,985	-347,9391	269,7395
	Salada	-8,44870	113,29671	1,000	-274,8447	257,9474
Pujamana	Galembo	39,09981	135,29003	,985	-269,7395	347,9391
	Salada	30,65111	158,58542	,996	-355,1574	416,4596
Salada	Galembo	8,44870	113,29671	1,000	-257,9474	274,8447
	Pujamana	-30,65111	158,58542	,996	-416,4596	355,1574

De la Tabla 19 se obtiene el valor del estadístico que resulta de la relación entre la diferencia de medias y la Desv. Error que sirve para realizar el reporte de los datos.

$$\text{Estadístico} = \text{Diferencia de medias} / \text{Desv Error} \dots \dots \dots (25)$$

Finalmente es necesario calcular el tamaño del efecto (η^2) es decir que porcentaje de la varianza se explica por el modelo y no por los factores extraños presentes en los residuos o muestras.

$$\eta^2 = \frac{SS_M}{SS_T} \quad (26)$$

Donde:

SS_M=Suma de cuadrados del modelo o entre-grupos

SS_T=Suma de cuadrados totales

$$\eta^2 = 0,12\% \text{ (se obtiene de la Tabla 20)}$$

De la Tabla 20 se tienen los valores de suma de cuadrados y grados de libertad para los análisis de Modelo o Inter-grupos o entre miembros de la formación y de los residuos o intra-grupos o entre las diferentes muestras de la formación.

Además del Ratio F que resulta de la relación entre las medias cuadráticas de los miembros y de las muestras. La significancia para este valor es superior al 5% esto nos indica que no existen diferencias estadísticamente

significativas en la media de los tres grupos aceptando la hipótesis nula.

Tabla 20 ANOVA de un Factor de To para un modelo de miembros de la formación la Luna

ANOVA					
Resistencia a la Tensión(psi)					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	11554,578	2	5777,289	,042	,959
Dentro de grupos	9093125,311	66	137774,626		
Total	9104679,889	68			

Informe de resultados para la To Formación la Luna

- No existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna.
 $F(2,66) = 0.042, p > 0.05, \eta^2 = 0.12\%$
- Las comparaciones múltiples indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos muestreados de Galembo y Pujamana $t(66) = -0.289, p > 0.05$; de Galembo y salada $t(66) = -0.075, p > 0.05$; y Pujamana y Salada $t(66) = 0.193, p > 0.05$.

4.2.2 Resistencia a la Compresión no confinada (UCS), formación la Luna. De la prueba UCS se obtienen valores de Modulo de Young, Relación de Poisson y UCS que serán analizados de forma independiente con su respectivo miembro.

En el UCS, al igual que en el BT se hace necesario realizar la validación de supuestos e hipótesis de las pruebas para los diferentes miembros, dado el caso las hipótesis planteadas son:

- Hipótesis nula.

H_0 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son iguales

- Hipótesis alternativa

H₁: Las medias de las muestras de los diferentes miembros son significativamente diferentes

Tabla 21 Descriptivos para UCS en la formación La Luna.

Descriptivos								
Resistencia a la compresión uniaxial(psi)								
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Galembo	32	4579,1953	3318,57988	586,64758	3382,7197	5775,6710	1100,00	15945,29
Pujamana	4	1975,0000	1757,60253	878,80127	-821,7378	4771,7378	900,00	4600,00
Salada	8	4425,0000	3689,27016	1304,35397	1340,6930	7509,3070	1500,00	13000,00
Total	44	4314,4148	3306,71411	498,50591	3309,0818	5319,7478	900,00	15945,29

Y los supuestos validados de igual forma que los realizados en el BT.

- Supuesto de Normalidad:

Tabla 22 Pruebas de normalidad para UCS en la formación La Luna.

Pruebas de normalidad							
	Miembro	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a la compresión uniaxial(psi)	Galembo	,166	32	,025	,850	32	,000
	Pujamana	,400	4	.	,716	4	,018
	Salada	,274	8	,077	,738	8	,006

a. Corrección de significación de Lilliefors

Debido a que la cantidad de muestras es menor a 50 para todos los miembros, el método de Shapiro Wilk es el que se recomienda y en el cual se observa para todos los casos una significancia menor al 5% Tabla 22. rechazando la hipótesis nula que dice que las muestras tienen una distribución de tipo normal y se acepta la hipótesis alternativa. Este enunciado se puede comprobar en los histogramas de frecuencia de cada uno de los miembros. Donde se aprecia que los datos tienen una distribución de datos F de Fisher. Grafico 3.

Los siguientes supuestos son evaluados mediante el análisis ANOVA de un solo factor corrido en el software IBM SPSS Statistics® (Versión de prueba) en donde se obtiene la Tabla 23 de homogeneidad de varianzas allí se concluye que la hipótesis nula es aceptada debido a la significación en la media mayor al 5%

El resto de estadísticos se reportan en las Tablas 24 y 25 para la formación la Luna en donde cabe resaltar que la prueba post-hoc usada es la de Gabriel debido a la diferencia de muestras entre grupos y el supuesto de homocedasticidad cumplido.

Los valores del estadístico para cada relación modelo según la Tabla 23 serían. Ecuación 25.

Galembo-Pujamana=1.489

Galembo-Salada=0.118

Pujamana-Salada=-1.213

En la Tabla 23 se puede calcular el valor del efecto η^2 Ecuación 26.

$\eta^2=0.0515$

Tabla 23 Prueba de homogeneidad de varianzas de UCS de la formación la Luna para el modelo de los tres miembros

Prueba de homogeneidad de varianzas					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Resistencia a la compresión uniaxial(psi)	Se basa en la media	,673	2	41	,516
	Se basa en la mediana	,574	2	41	,568
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	,574	2	38,409	,568
	Se basa en la media recortada	,564	2	41	,573

Tabla 24 Prueba post-hoc de Gabriel para el UCS de la formación la Luna

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Resistencia a la compresión uniaxial(psi)						
Gabriel						
(I) Miembro	(J) Miembro	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Galeambo	Pujamana	2604,19534	1749,02015	,283	-1317,9274	6526,3181
	Salada	154,19534	1303,64265	,999	-2919,2257	3227,6163
Pujamana	Galeambo	-2604,19534	1749,02015	,283	-6526,3181	1317,9274
	Salada	-2450,00000	2019,59451	,529	-7396,5964	2496,5964
Salada	Galeambo	-154,19534	1303,64265	,999	-3227,6163	2919,2257
	Pujamana	2450,00000	2019,59451	,529	-2496,5964	7396,5964

Gráfico 3 Histograma de frecuencias de UCS para la formación la Luna

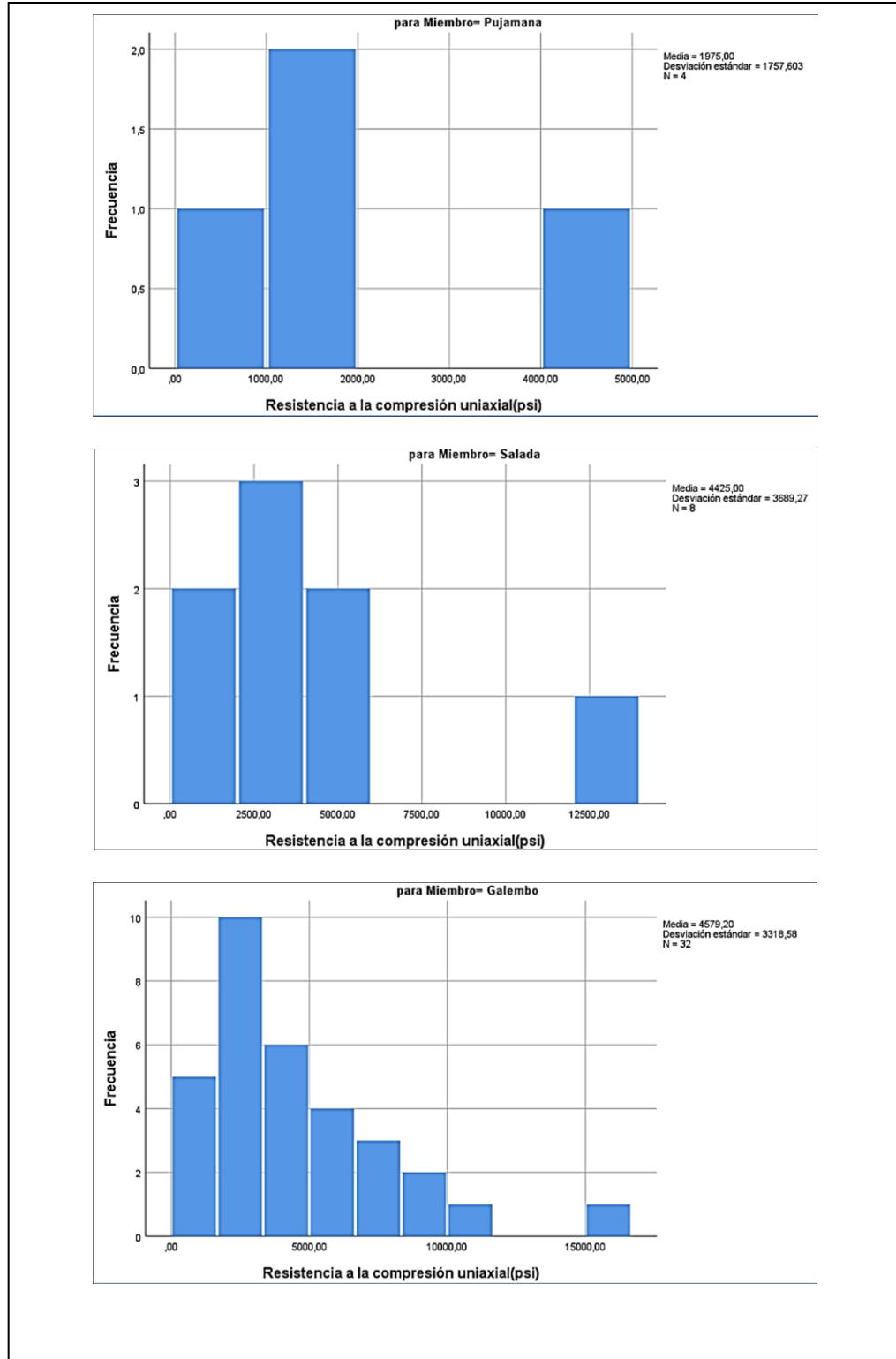


Tabla 25 Prueba ANOVA para el UCS de la formación la Luna

ANOVA					
Resistencia a la compresión uniaxial(psi)					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	24232758,68	2	12116379,34	1,114	,338
Dentro de grupos	445944644,8	41	10876698,65		
Total	470177403,5	43			

Informe de resultados para el UCS Formación la Luna

- No existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna.
 $F(2,41) = 1.114, p > 0.05, \eta^2 = 5.15\%$
- Las comparaciones múltiples indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos muestreados de Galembo y Pujamana $t(41) = 1.489, p > 0.05$; de Galembo y Salada $t(41) = 0.118, p > 0.05$; y Pujamana y Salada $t(41) = -1.213, p > 0.05$.

4.2.3 Angulo de fricción interna (AFI), formación la Luna. Para el caso las hipótesis planteadas son:

- Hipótesis nula.

H_0 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son iguales

- Hipótesis alternativa

H_1 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son significativamente diferentes

Tabla 26 Descriptivos para el AFI de la formación la Luna

Descriptivos								
Ángulo de Fricción Interna (°)								
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Galembó	23	25,674	9,1808	1,9143	21,704	29,644	9,5	43,0
Pujamana	4	22,500	7,7675	3,8837	10,140	34,860	13,0	32,0
Salada	8	25,875	9,5833	3,3882	17,863	33,887	11,0	40,0
Total	35	25,357	8,9365	1,5105	22,287	28,427	9,5	43,0

El supuesto de normalidad es positivo para el AFI de los diferentes miembros cómo se observa en la Tabla 27 en las pruebas de Shapiro-Wilk.

Tabla 27 Pruebas de normalidad para el AFI de la formación la Luna

Pruebas de normalidad							
	Miembro	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Ángulo de Fricción Interna (°)	Galembó	,123	23	,200*	,964	23	,555
	Pujamana	,224	4	.	,966	4	,818
	Salada	,172	8	,200*	,962	8	,832

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

El supuesto de Homocedasticidad en el AFI de la formación la Luna acepta la hipótesis nula de igualdad de medias debido a la significancia en la media Tabla 28 mayor a 0.05.

Tabla 28 Prueba de homocedasticidad para el AFI de la formación la Luna

		Prueba de homogeneidad de varianzas			
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Ángulo de Fricción Interna (°)	Se basa en la media	,311	2	32	,735
	Se basa en la mediana	,268	2	32	,767
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	,268	2	31,705	,767
	Se basa en la media recortada	,310	2	32	,736

En este caso debido al cumplimiento de homocedasticidad y a la no igualdad de cantidad de muestras en cada miembro Tabla 26, se aplica la prueba post-hoc de Gabriel para analizar la posible existencia de diferencias entre pares de grupos.

Tabla 29 Prueba Post-hoc de Gabriel para el AFI de la formación la Luna

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Ángulo de Fricción Interna (°)						
Gabriel						
(I) Miembro	(J) Miembro	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Galembo	Pujamana	3,1739	4,9560	,866	-8,347	14,694
	Salada	-,2011	3,7551	1,000	-9,340	8,938
Pujamana	Galembo	-3,1739	4,9560	,866	-14,694	8,347
	Salada	-3,3750	5,6022	,903	-17,254	10,504
Salada	Galembo	,2011	3,7551	1,000	-8,938	9,340
	Pujamana	3,3750	5,6022	,903	-10,504	17,254

Los valores del estadístico para cada relación modelo según la Tabla 29 serían. Ecuación 25.

Galembo-Pujamana=0.640

Galembo-Salada=-0.053

Pujamana-Salada=-0.602

En la Tabla 30 se puede calcular el valor del efecto η^2 Ecuación 26.

$\eta^2=0.0137$

Tabla 30 Prueba ANOVA para el AFI de la formación la Luna

ANOVA					
Ángulo de Fricción Interna (°)					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	37,106	2	18,553	,222	,802
Dentro de grupos	2678,179	32	83,693		
Total	2715,286	34			

Informe de resultados para el AFI Formación la Luna

- No existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna.
 $F(2,32) = 0.222, p > 0.05, \eta^2 = 1.37\%$
- Las comparaciones múltiples indican que no existen diferencias

estadísticamente significativas entre los grupos de datos muestreados de Galembó y Pujamana $t(32) = 0.640$, $p > 0.05$; de Galembó y Salada $t(32) = -0.053$, $p > 0.05$; y Pujamana y Salada $t(32) = -0.602$, $p > 0.05$.

4.2.4 Relación de Poisson (v), formación la Luna. Para el caso las hipótesis planteadas son:

- Hipótesis nula.

H_0 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son iguales

- Hipótesis alternativa

H_1 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son significativamente diferentes.

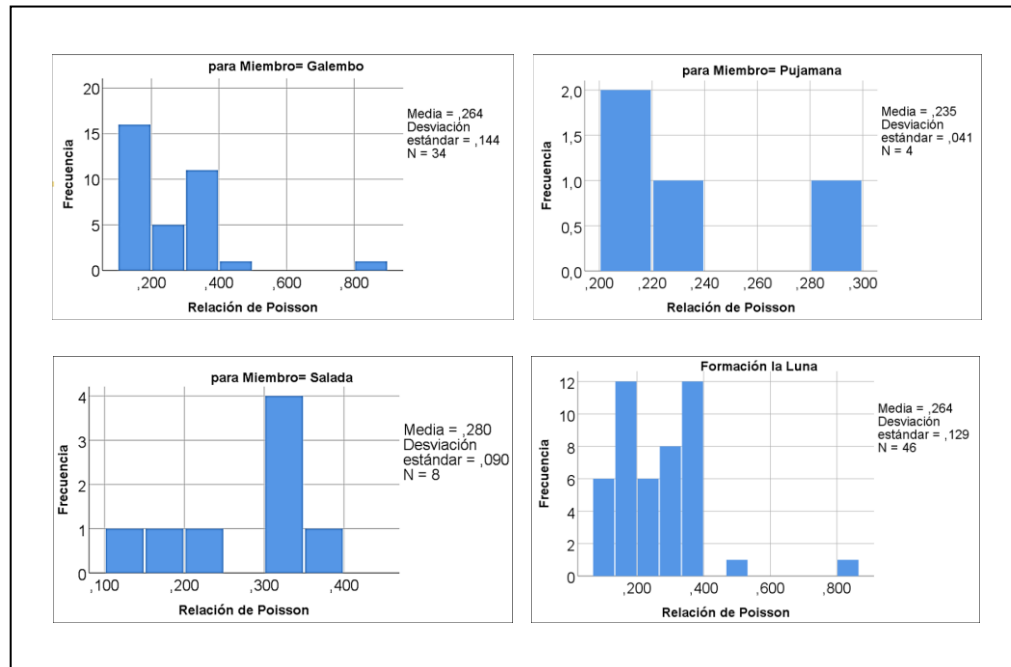
Para verificar el primer supuesto de normalidad se realiza el test de Shapiro-Wilk Tabla 31. Donde se comprueba que la distribución de probabilidades no es de tipo normal debido a que la formación Galembó que posee una mayor cantidad de muestras, tiene una significancia menor a 0.05 a pesar de que las otras dos formaciones aceptan la hipótesis nula es necesario analizar la distribución de probabilidades gráficas de los tres miembros y de la formación como un solo modelo Gráfico 4.

Tabla 31 Pruebas de normalidad para la (v) de la formación la Luna

Pruebas de normalidad							
Relación de Poisson	Miembro	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
	Galembó	,147	34	,060	,839	34	,000
	Pujamana	,394	4	.	,764	4	,052
	Salada	,224	8	,200*	,938	8	,591

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

Gráfico 4 Histograma de frecuencias (v) para la formación la Luna



Es evidente en el gráfico 4 que la tendencia de los datos no es de tipo normal ya que los datos se concentran hacia 0.2 y 0.4 hacia la izquierda del gráfico, una distribución de probabilidades de tipo log-normal sería la adecuada para este modelo.

Tabla 32 Descriptivos para la (v) de la formación la Luna

Descriptivos								
Relación de Poisson	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Galembo	34	,26391	,143996	,024695	,21367	,31415	,102	,813
Pujamana	4	,23500	,040505	,020253	,17055	,29945	,206	,295
Salada	8	,28038	,090046	,031836	,20509	,35566	,127	,399
Total	46	,26426	,129223	,019053	,22589	,30264	,102	,813

El supuesto de homocedasticidad en la (v) de la formación la luna acepta la hipótesis nula de igualdad de medias debido a la significancia en la media Tabla 33 mayor a 0.05.

Tabla 33 Prueba de homocedasticidad para la (v) de la formación la Luna

		Prueba de homogeneidad de varianzas			
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Relación de Poisson	Se basa en la media	2,230	2	43	,120
	Se basa en la mediana	2,249	2	43	,118
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	2,249	2	38,822	,119
	Se basa en la media recortada	2,118	2	43	,133

En este caso debido al cumplimiento de homocedasticidad y a la no igualdad de cantidad de muestras en cada miembro Tabla 33, se aplica la prueba post-hoc de Gabriel para analizar la posible existencia de diferencias entre pares de grupos.

Tabla 34 Prueba Post-hoc de Gabriel para la (v) de la formación la Luna

Comparaciones múltiples							
Variable dependiente: Relación de Poisson							
	(I) Miembro	(J) Miembro	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Gabriel	Galembo	Pujamana	,028912	,069621	,954	-,12621	,18403
		Salada	-,016463	,051755	,981	-,13775	,10483
	Pujamana	Galembo	-,028912	,069621	,954	-,18403	,12621
		Salada	-,045375	,080655	,919	-,24255	,15180
	Salada	Galembo	,016463	,051755	,981	-,10483	,13775
		Pujamana	,045375	,080655	,919	-,15180	,24255

Los valores del estadístico para cada relación de modelos según la Tabla 34 serían. Ecuación 25.

Galembo-Pujamana=0.416

Galembo-Salada=-0.322

Pujamana-Salada=-0.563

En la Tabla 31 se puede calcular el valor del efecto η^2 Ecuación 26.

$\eta^2=0.00798$

Tabla 35 Prueba ANOVA para la (v) de la formación la Luna

ANOVA					
Relación de Poisson					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,006	2	,003	,159	,854
Dentro de grupos	,746	43	,017		
Total	,751	45			

Informe de resultados para (V) Formación la Luna

- No existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener

diferentes miembros en la formación la Luna.

$$F(2,43) = 0.159, p > 0.05, \eta^2 = 0.798\%$$

- Las comparaciones múltiples indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos muestreados de Galembo y Pujamana $t(43) = 0.416, p > 0.05$; de Galembo y salada $t(43) = -0.322, p > 0.05$; y Pujamana y Salada $t(43) = -0.563, p > 0.05$.

4.2.5 Módulo de Young (E), formación la Luna. Para el caso las hipótesis planteadas son:

- Hipótesis nula.

H_0 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son iguales

- Hipótesis alternativa

H_1 : Las medias de las muestras de los diferentes miembros son significativamente diferentes

El supuesto de normalidad es negado por el análisis de Shapiro wilks Tabla 36 en la formación Galembo donde la significancia de las pruebas es inferior al 0.05 sin embargo las formaciones Pujamana y salada aceptan este supuesto por su significancia mayor al 0.05 y anuncia que tiene una distribución probabilística de tipo normal. A la formación Galembo se le realiza un histograma Grafico 5 donde se observa una distribución poblacional de tipo Log-normal debido a que los datos se recuestan a la izquierda de la media.

Tabla 36 Pruebas de normalidad para el (E) de la formación la Luna

Pruebas de normalidad							
Módulo de Young (psi)	Miembro	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
	Galembó	,105	37	,200*	,939	37	,044
	Pujamana	,309	4	.	,915	4	,511
	Salada	,191	8	,200*	,955	8	,763

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

Gráfico 5 Histograma de frecuencias para (E) en la formación la Luna en el miembro Galembó.

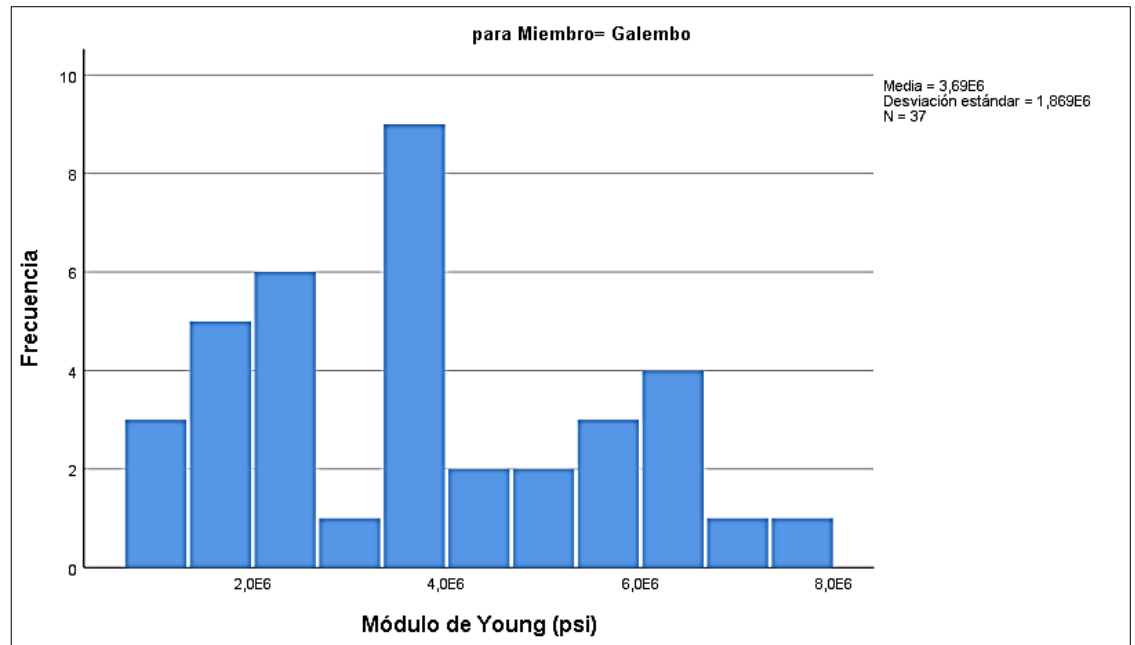


Tabla 37 Descriptivos para el (E) de la formación la Luna

Descriptivos								
Módulo de Young (psi)								
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media			
					Límite inferior	Límite superior	Mínimo	Máximo
Galembo	37	3,686432E+6	1,869269E+6	3,073060E+5	3,063187E+6	4,309678E+6	9,3800E+005	7,3500E+006
Pujamana	4	3,191750E+6	2,484163E+6	1,242081E+6	-7,61108E+5	7,144608E+6	6,3700E+005	6,6000E+006
Salada	8	5,143750E+6	2,052106E+6	7,255292E+5	3,428146E+6	6,859354E+6	1,5100E+006	8,6500E+006
Total	49	3,883980E+6	1,988708E+6	2,841011E+5	3,312756E+6	4,455203E+6	6,3700E+005	8,6500E+006

El supuesto de Homocedasticidad en la (E) de la formación la Luna acepta la hipótesis nula de igualdad de medias debido a la significancia en la

media Tabla 37 mayor a 0.05.

Tabla 38 Prueba de homocedasticidad para el (E) de la formación la Luna

Prueba de homogeneidad de varianzas					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Módulo de Young (psi)	Se basa en la media	,111	2	46	,895
	Se basa en la mediana	,076	2	46	,927
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	,076	2	38,559	,927
	Se basa en la media recortada	,091	2	46	,913

En este caso debido al cumplimiento de homocedasticidad y a la no igualdad de cantidad de muestras en cada miembro Tabla 38, se aplica la prueba post-hoc de Gabriel para analizar la posible existencia de diferencias entre pares de grupos

Tabla 39 Prueba Post-hoc de Gabriel para el (E) de la formación la Luna

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Módulo de Young (psi)						
Gabriel						
(I) Miembro	(J) Miembro	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Galembo	Pujamana	4,946824E+5	1,023019E+6	,930	-1,76461E+6	2,753977E+6
	Salada	-1,45732E+6	7,578494E+5	,131	-3,21862E+6	3,039837E+5
Pujamana	Galembo	-4,94682E+5	1,023019E+6	,930	-2,75398E+6	1,764612E+6
	Salada	-1,95200E+6	1,190250E+6	,275	-4,85452E+6	9,505153E+5
Salada	Galembo	1,457318E+6	7,578494E+5	,131	-3,03984E+5	3,218619E+6
	Pujamana	1,95200E+6	1,190250E+6	,275	-9,50515E+5	4,854515E+6

Los valores del estadístico para cada relación de modelos según la Tabla 39 serían. Ecuación 25.

Galembo-Pujamana=0.484

Galembo-Salada=-1.923

Pujamana-Salada=-1.640

En la Tabla 40 se puede calcular el valor del efecto η^2 Ecuación 26.

$\eta^2=0.0846$

Tabla 40. Prueba ANOVA para el E de la formación la Luna

ANOVA					
Módulo de Young (psi)	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1,606E+13	2	8,028E+12	2,125	,131
Dentro de grupos	1,738E+14	46	3,778E+12		
Total	1,898E+14	48			

Informe de resultados para (E) Formación la Luna

- No existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna.
 $F(2,46) = 2.125, p > 0.05, \eta^2 = 8.46\%$
- Las comparaciones múltiples indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos muestreados de Galembo y Pujamana $t(46) = 0.484, p > 0.05$; de Galembo y Salada $t(46) = -1.923, p > 0.05$; y Pujamana y Salada $t(46) = -1.640, p > 0.05$.

4.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA FORMACIÓN GACHETA

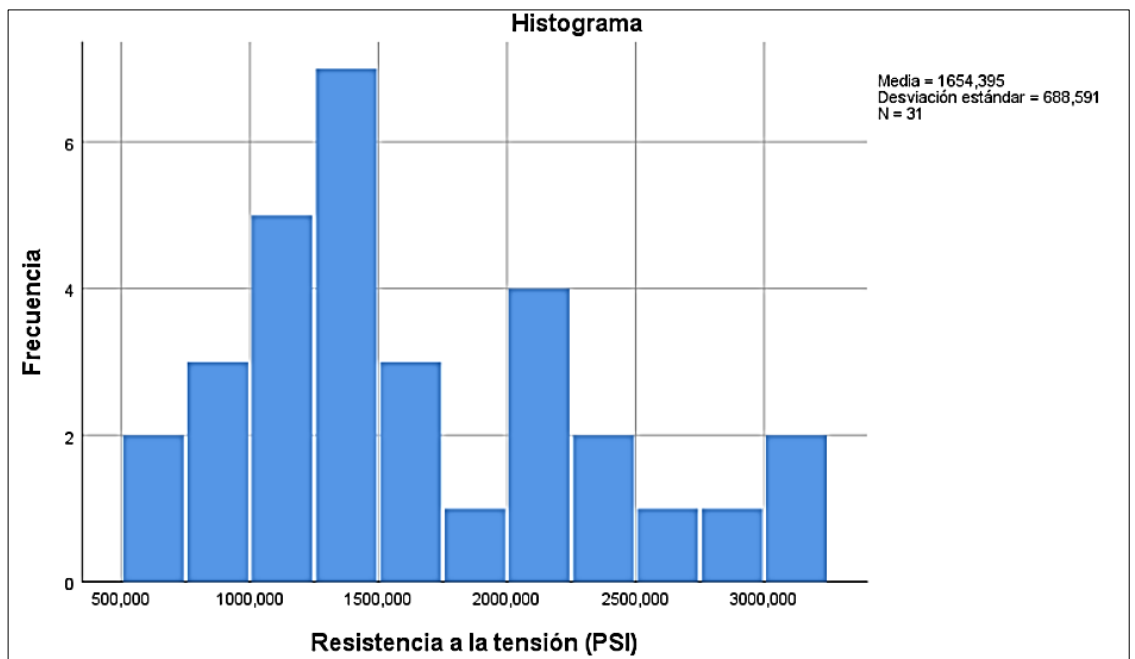
De la formación Gacheta se tienen datos muestreados de un solo pozo, estos datos no están sectorizados por algún otro criterio adicional o factor por lo cual no se aplica el análisis estadístico ANOVA, sino que más bien se usa estadística descriptiva para generar una caracterización mecánica que describa el comportamiento muestral de dicha formación.

4.3.1 Resistencia a la tensión T_o , formación Gacheta. En el caso de la formación Gacheta los valores generados y analizados mediante el software IBM SPSS Statistics® (Versión de prueba), serán las pruebas de normalidad, los valores descriptivos y el histograma de frecuencias de la prueba.

Tabla 41 Estadísticos descriptivos para la T_o de la formación Gacheta.

Descriptivos				
		Estadístico	Desv. Error	
Resistencia a la tensión (PSI)	Media	1654,39548	123,674584	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	1401,81829	
		Límite superior	1906,97268	
	Media recortada al 5%	1631,87360		
	Mediana	1439,26000		
	Varianza	474157,486		
	Desv. Desviación	688,590942		
	Mínimo	616,440		
	Máximo	3081,220		
	Rango	2464,780		
	Rango intercuartil	1061,750		
	Asimetría	,599	,421	
	Curtosis	-,500	,821	

Gráfico 6 Histograma de frecuencias para la To en la formación Gacheta



De la Tabla 41 tenemos que el coeficiente de asimetría de 0.599 es de tipo positiva y un coeficiente de curtosis de -0.500 de tipo platicúrtica ambos

valores validados mediante el Gráfico 6 una distribución de datos recostados a la izquierda de la media de tipo positiva y achatada o platicúrtica.

El tipo de distribución de probabilidades se analiza mediante las pruebas de normalidad Tabla 42, en este caso de estudio la cantidad de muestras es inferior a 50, por ende, la prueba indicada será el test de Shapiro-Wilks, donde la significancia es mayor al 5% esto como en los casos anteriores acepta la hipótesis nula que dice que la muestra posee una distribución de probabilidades de tipo normal.

Tabla 42 Pruebas de normalidad para la To de la formación Gacheta.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a la tensión (PSI)	,157	31	,049	,940	31	,082
a. Corrección de significación de Lilliefors						

4.3.2. Cohesión Co, formación Gacheta. Los valores estadísticos de la cohesión se presentan en la Tabla 43 cuyas medidas de dispersión expresan una tendencia central recostada levemente hacia la derecha es decir asimétrica negativa y distribución Leptocúrtica según Curtosis.

En la Tabla 44 se puede verificar matemáticamente mediante el test de Shapiro-Wilks una distribución probabilística de tipo normal debido a la significancia mayor al 5%.

Tabla 43 Estadísticos descriptivos Co en la formación Gacheta.

Descriptivos				
		Estadístico	Desv. Error	
Cohesión (psi)	Media		1351,3571	154,95631
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	1016,5944	
		Límite superior	1686,1199	
	Media recortada al 5%		1347,9524	
	Mediana		1441,5000	
	Varianza		336160,401	
	Desv. Desviación		579,79341	
	Mínimo		199,00	
	Máximo		2565,00	
	Rango		2366,00	
	Rango intercuartil		584,50	
	Asimetría		-,090	,597
	Curtosis		1,041	1,154

Tabla 44 Pruebas de normalidad Co en la formación Gacheta.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Cohesión (psi)	,156	14	,200 [*]	,962	14	,761
* . Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

4.3.3. AFI, formación Gacheta. Los valores estadísticos del AFI se presentan en la Tabla 45 cuyas medidas de dispersión expresan una tendencia central recostada levemente hacia la derecha es decir asimétrica negativa y distribución Platicúrtica según Curtosis.

En la Tabla 46 se puede verificar matemáticamente mediante el test de Shapiro-Wilks una distribución probabilística de tipo normal debido a la significancia mayor al 5%.

Tabla 45 Estadísticos descriptivos del AFI en la formación Gacheta.

Descriptivos			Estadístico	Desv. Error
Ángulo de fricción interna	Media		52,86	3,533
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	45,22	
		Límite superior	60,49	
	Media recortada al 5%		52,95	
	Mediana		55,50	
	Varianza		174,747	
	Desv. Desviación		13,219	
	Mínimo		30	
	Máximo		74	
	Rango		44	
	Rango intercuartil		20	
	Asimetría		-,463	,597
	Curtosis		-,481	1,154

Tabla 46 Pruebas de normalidad del AFI en la formación Gacheta.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Ángulo de fricción interna	,136	14	,200 [*]	,946	14	,503
<p>*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. a. Corrección de significación de Lilliefors</p>						

4.3.4 (v), formación Gacheta. Los valores estadísticos de la v se presentan en la Tabla 47 cuyas medidas de dispersión expresan una tendencia central recostada levemente hacia la izquierda es decir asimétrica positiva y distribución Platicúrtica según Curtosis.

En la Tabla 48 se puede verificar matemáticamente mediante el test de

Shapiro-Wilks una distribución probabilística de tipo normal debido a la significancia mayor al 5%.

Tabla 47 Estadísticos descriptivos de la (v) en la formación Gacheta.

Descriptivos			Estadístico	Desv. Error
Relación de Poisson	Media		,07000	,010356
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	,04763	
		Límite superior	,09237	
	Media recortada al 5%		,07000	
	Mediana		,06300	
	Varianza		,002	
	Desv. Desviación		,038750	
	Mínimo		,014	
	Máximo		,126	
	Rango		,112	
	Rango intercuartil		,066	
	Asimetría		,157	,597
	Curtosis		-1,284	1,154

Tabla 48 Pruebas de normalidad de la (v) en la formación Gacheta.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Relación de Poisson	,160	14	,200 [*]	,924	14	,252
[*] . Esto es un límite inferior de la significación verdadera. a. Corrección de significación de Lilliefors						

4.3.5 UCS extrapolados de EFM, formación Gacheta. Los valores

estadísticos de la UCS se presentan en la Tabla 49 cuyas medidas de dispersión expresan una tendencia central recostada levemente hacia la derecha es decir asimétrica negativa y distribución Leptocúrtica según Curtosis.

En la Tabla 50 se puede verificar matemáticamente mediante el test de Shapiro-Wilks una distribución probabilística de tipo normal debido a la significancia mayor al 5%.

Tabla 49 Estadísticos descriptivos de la UCS en la formación Gacheta.

Descriptivos				
		Estadístico	Desv. Error	
Resistencia a la compresión uniaxial (psi)	Media	7965,7143	644,53265	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	6573,2862	
		Límite superior	9358,1424	
	Media recortada al 5%	8087,6825		
	Mediana	7781,5000		
	Varianza	5815912,681		
	Desv. Desviación	2411,62034		
	Mínimo	1774,00		
	Máximo	11962,00		
	Rango	10188,00		
	Rango intercuartil	2366,25		
	Asimetría	-1,099	,597	
	Curtosis	2,745	1,154	

Tabla 50 Pruebas de normalidad de la UCS en la formación Gacheta.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a la compresión uniaxial (psi)	,233	14	,038	,911	14	,163

a. Corrección de significación de Lilliefors

4.3.6 (E), formación Gacheta. Los valores estadísticos del (E) se presentan en la Tabla 51. Las medidas estadísticas de distribución dan una primera impresión de la no distribución normal de los datos, un avistamiento gráfico del tipo de distribución “J” invertida se aprecia mejor en el Gráfico 7 es decir la moda se encuentra al extremo izquierdo de la gráfica, el modelo de distribución de probabilidades que más se ajusta es el de tipo log-normal.

En la Tabla 52 se puede verificar matemáticamente mediante el test de Shapiro-Wilks que la distribución probabilística no es de tipo normal debido a la significancia menor al 5%.

Tabla 51 Estadísticos descriptivos del (E) en la formación Gacheta.

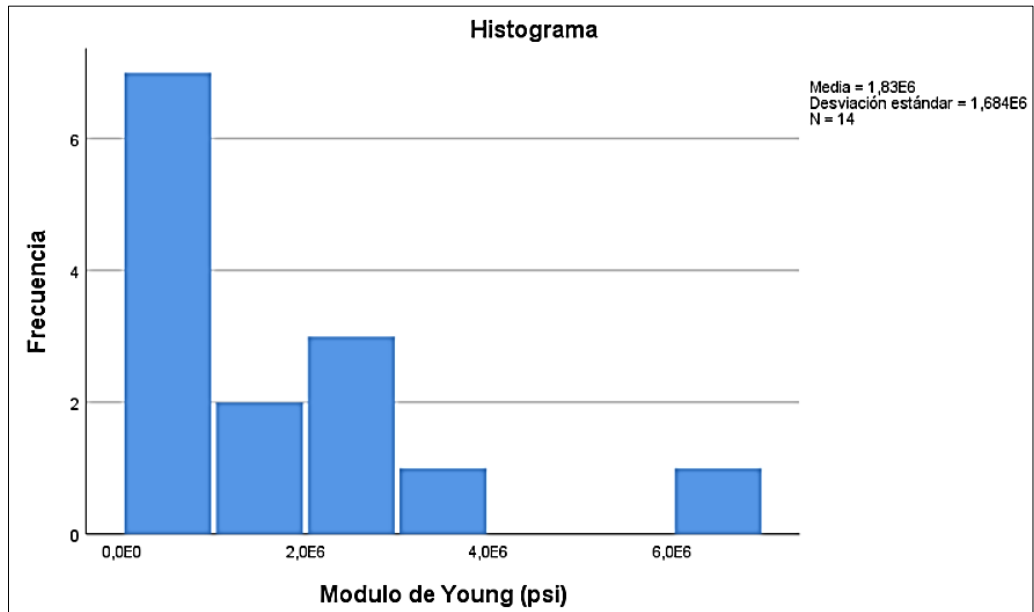
Descriptivos			Estadístico	Desv. Error
Modulo de Young (psi)	Media		1,83407E+6	4,501176E+5
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	8,61651E+5	
		Límite superior	2,80649E+6	
	Media recortada al 5%		1,63269E+6	
	Mediana		1,03850E+6	
	Varianza		2,836E+12	
	Desv. Desviación		1,684186E+6	
	Mínimo		5,960E+005	
	Máximo		6,697E+006	
	Rango		6,101E+006	
	Rango intercuartil		1,711E+006	
	Asimetría		2,130	,597
	Curtosis		5,030	1,154

}

Tabla 52 Pruebas de normalidad del (E) en la formación Gacheta.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Modulo de Young (psi)	,240	14	,028	,736	14	,001
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Gráfico 7 Histograma de frecuencias para el (E) en la formación Gacheta



4.4 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA FORMACIÓN MIRADOR

Los valores de las diferentes propiedades mecánicas de la formación mirador pertenecen a muestras provenientes de los pozos Cupiagua A1, H11 Y Q6, Pauto sur C2F, Volcanera C2 y Gibraltar 2.

4.4.1 Cs, formación Mirador. Las pruebas de compresibilidad de la roca aportan miles de datos, cuando dicho valor se estabiliza se calcula un valor

promedio de la muestra y dicho valor se reporta, para el caso de estudio el factor a analizar es el de las muestras, se consideran las siguientes hipótesis en el análisis estadístico ANOVA. IBM SPSS Statistics® (Versión de prueba).

Hipótesis nula.

H₀: Las medias de las muestras de los diferentes miembros son iguales

Hipótesis alternativa

H₁: Las medias de las muestras de los diferentes miembros son significativamente diferentes

Para el ingreso en la base de datos del software para el análisis estadístico se sigue la asignación de la Tabla 53

Tabla 53 Valores asignados a las diferentes muestras para el ingreso al software

Valor	Nombre Asignado
1	Mirador 1
2	Mirador 2
3	Mirador 3
4	Mirador 4
5	Mirador 5
6	Mirador 6
7	Mirador 7
8	Mirador 8
9	Mirador 9
10	Mirador 10

Los valores en azul representan datos provenientes de informes.

Inicialmente se analiza el supuesto de normalidad en las muestras, el cual no se cumple según el test de Kolmorov-Smirnov (más de 50 datos) Tabla 54 ya que la significancia en todas las muestras inferior al 5%.

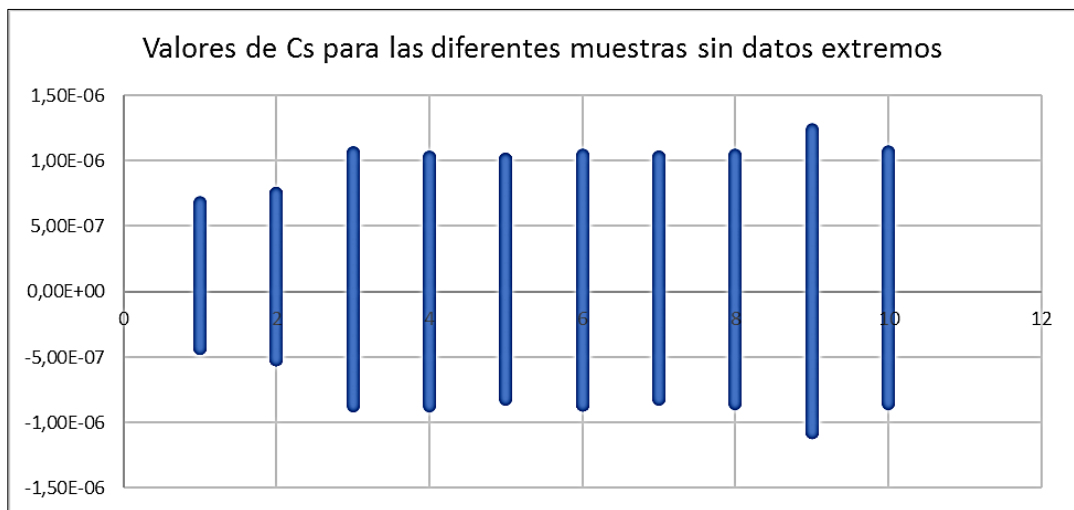
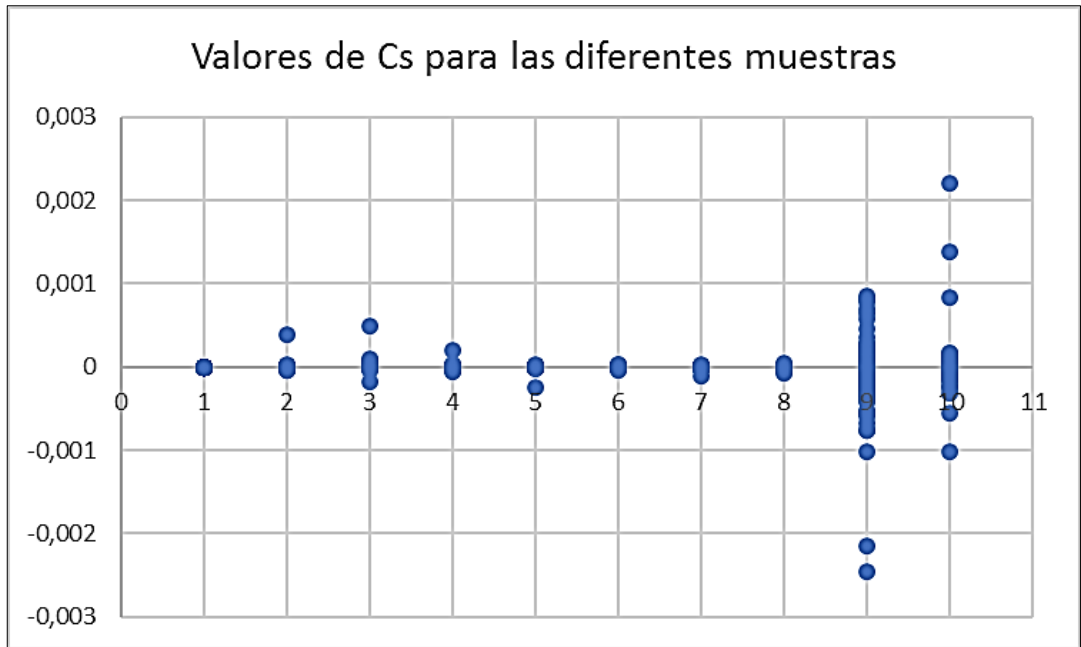
Tabla 54 Prueba de normalidad para Cs en la formación mirador.

Pruebas de normalidad				
	SampleID	Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
Compresibilidad del sólido(1/psi)	Mirador 1	,012	9478	,005
	Mirador 2	,403	10407	,000
	Mirador 3	,433	9239	,000
	Mirador 4	,359	9687	,000
	Mirador 5	,371	9663	,000
	Mirador 6	,193	9672	,000
	Mirador 7	,273	9899	,000
	Mirador 8	,266	9886	,000
	Mirador 9	,457	13653	,000
	Mirador 10	,436	8086	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Debido a la alta densidad poblacional los datos presentan datos anómalos o extremos que se deben a condiciones del laboratorio o a respuestas de la roca a bajas presiones de confinamiento para el caso de estudio se analiza únicamente la zona de compresibilidad estables y dichos datos anómalos son excluidos del análisis por medio del análisis del diagrama de caja de cada muestra, en el Grafico 8 se hace más evidente el ajuste de los factores luego de excluir los valores extremos.

Gráfico 8 Rango de valores de Cs (1/psi) en las diferentes muestras



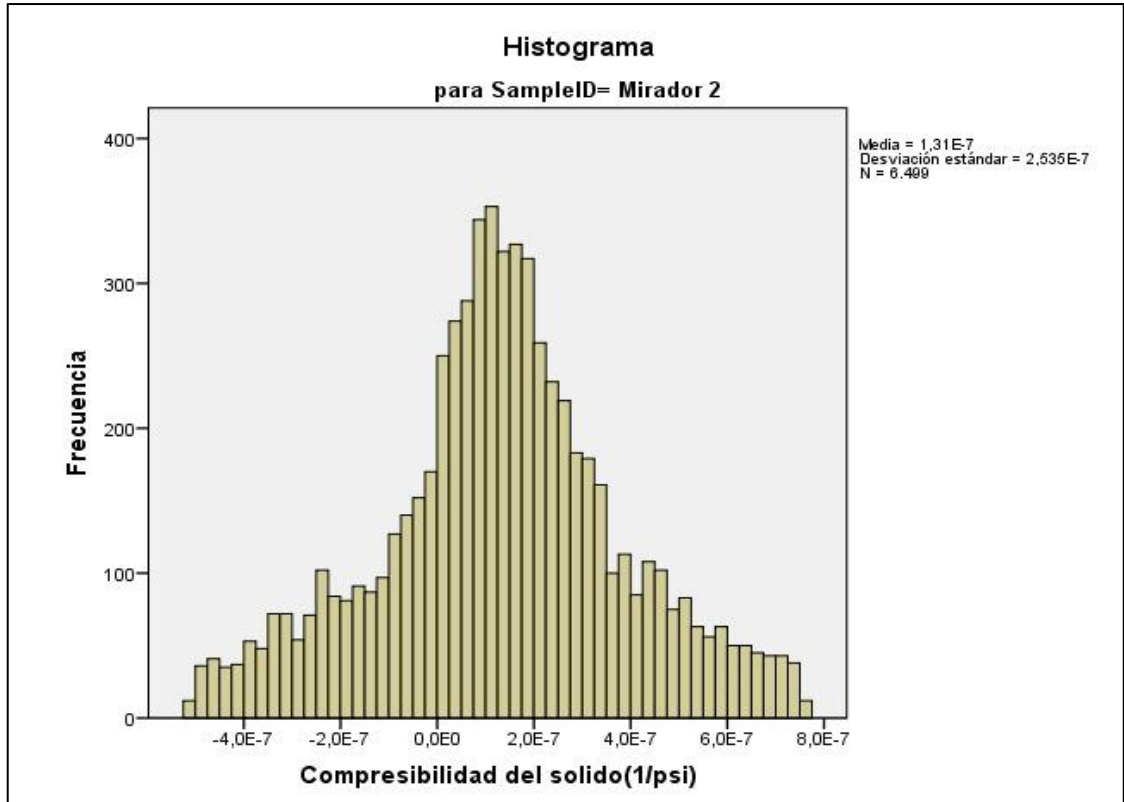
Luego de los ajustes realizados se procede a validar el supuesto de normalidad Tabla 55, como resultado al ajuste la única prueba que no cumple el supuesto es la numero 2 para ella se analiza el histograma de frecuencias Grafico 9 de la que se concluye que la distribución que se ajusta a sus valores es la de tipo normal con un alto grado de apuntamiento.

Tabla 55 Pruebas de normalidad formación mirador.

Pruebas de normalidad				
Nombre de la muestra		Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
Compresibilidad del sólido(1/psi)	Mirador 1	,008	9401	,133
	Mirador 2	,047	6499	,000
	Mirador 3	,009	9583	,070
	Mirador 4	,008	9558	,122
	Mirador 5	,006	9537	,200*
	Mirador 6	,008	9801	,110
	Mirador 7	,008	10159	,113
	Mirador 8	,008	9793	,126
	Mirador 9	,005	10851	,200*
	Mirador 10	,009	9130	,075

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

Gráfico 9 Histograma de frecuencias Cs



Luego del cumplimiento del primer supuesto se analiza el supuesto de homocedasticidad según test de Levene Tabla 55. El modelo rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas y acepta la hipótesis alternativa lo que nos informa que si existen diferencias significativas entre los grupos de datos de muestras.

Tabla 56 Prueba de homocedasticidad para Cs formación Mirador.

Prueba de homogeneidad de varianzas					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Compresibilidad del solido(1/psi)	Se basa en la media	519,660	9	94302	,000
	Se basa en la mediana	519,599	9	94302	,000
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	519,599	9	86889,778	,000
	Se basa en la media recortada	519,651	9	94302	,000

Debido al no cumplimiento de homocedasticidad se analizan las pruebas post-hoc Tabla 56 para determinar las diferencias entre pares de grupos la prueba usada es la prueba de Games-Howell que se usa cuando no se cumple el supuesto de homocedasticidad y cuando existen diferencias entre los grados de libertad de las muestras.

Tabla 57 Pruebas Post-hoc para Cs formación Mirador.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente Compresibilidad del solido(1/psi)						
Prueba Games-Howell						
(I) Nombre de la muestra	(J) Nombre de la muestra	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Mirador 1	Mirador 2	2,58262E-9	3,75536E-9	1,000	-9,3005E-009	1,4466E-008
	Mirador 3	3,14421E-8*	4,01283E-9	,000	1,8745E-008	4,4139E-008
	Mirador 4	3,03174E-8*	4,01798E-9	,000	1,7604E-008	4,3031E-008
	Mirador 5	2,78389E-8*	3,96953E-9	,000	1,5279E-008	4,0399E-008
	Mirador 6	2,56685E-8*	3,99669E-9	,000	1,3022E-008	3,8315E-008
	Mirador 7	2,58298E-8*	3,92950E-9	,000	1,3396E-008	3,8263E-008
	Mirador 8	3,05684E-8*	3,98668E-9	,000	1,7954E-008	4,3183E-008
	Mirador 9	2,75638E-8*	4,45198E-9	,000	1,3477E-008	4,1650E-008
	Mirador 10	2,82414E-8*	4,12123E-9	,000	1,5201E-008	4,1282E-008
	Mirador 2	Mirador 1	-2,58262E-9	3,75536E-9	1,000	-1,4466E-008
Mirador 3		2,88594E-8*	4,66585E-9	,000	1,4096E-008	4,3623E-008
Mirador 4		2,77348E-8*	4,67028E-9	,000	1,2957E-008	4,2512E-008
Mirador 5		2,52562E-8*	4,62866E-9	,000	1,0611E-008	3,9902E-008
Mirador 6		2,30858E-8*	4,65198E-9	,000	8,3664E-009	3,7805E-008
Mirador 7		2,32472E-8*	4,59437E-9	,000	8,7100E-009	3,7784E-008
Mirador 8		2,79858E-8*	4,64338E-9	,000	1,3293E-008	4,2678E-008
Mirador 9		2,49812E-8*	5,04851E-9	,000	9,0072E-009	4,0955E-008
Mirador 10		2,56588E-8*	4,75940E-9	,000	1,0599E-008	4,0718E-008
Mirador 3		Mirador 1	-3,14421E-8*	4,01283E-9	,000	-4,4139E-008
	Mirador 2	-2,88594E-8*	4,66585E-9	,000	-4,3623E-008	-1,4096E-008
	Mirador 4	-1,12465E-9	4,87971E-9	1,000	-1,6564E-008	1,4315E-008
	Mirador 5	-3,60318E-9	4,83990E-9	,999	-1,8917E-008	1,1711E-008
	Mirador 6	-5,77360E-9	4,86220E-9	,974	-2,1158E-008	9,6107E-009
	Mirador 7	-5,61222E-9	4,80712E-9	,977	-2,0822E-008	9,5977E-009
	Mirador 8	-8,73674E-10	4,85397E-9	1,000	-1,6232E-008	1,4485E-008
	Mirador 9	-3,87822E-9	5,24285E-9	,999	-2,0467E-008	1,2710E-008
	Mirador 10	-3,20063E-9	4,96507E-9	1,000	-1,8910E-008	1,2509E-008

Mirador 4	Mirador 1	-3,03174E-8*	4,01798E-9	,000	-4,3031E-008	-1,7604E-008
	Mirador 2	-2,77348E-8*	4,67028E-9	,000	-4,2512E-008	-1,2957E-008
	Mirador 3	1,12465E-9	4,87971E-9	1,000	-1,4315E-008	1,6564E-008
	Mirador 5	-2,47854E-9	4,84416E-9	1,000	-1,7806E-008	1,2849E-008
	Mirador 6	-4,64895E-9	4,86644E-9	,995	-2,0047E-008	1,0749E-008
	Mirador 7	-4,48758E-9	4,81141E-9	,995	-1,9711E-008	1,0736E-008
	Mirador 8	2,50972E-10	4,85823E-9	1,000	-1,5121E-008	1,5623E-008
	Mirador 9	-2,75357E-9	5,24679E-9	1,000	-1,9355E-008	1,3847E-008
	Mirador 10	-2,07599E-9	4,96923E-9	1,000	-1,7799E-008	1,3647E-008
	Mirador 5	Mirador 1	-2,78389E-8*	3,96953E-9	,000	-4,0399E-008
Mirador 2		-2,52562E-8*	4,62866E-9	,000	-3,9902E-008	-1,0611E-008
Mirador 3		3,60318E-9	4,83990E-9	,999	-1,1711E-008	1,8917E-008
Mirador 4		2,47854E-9	4,84416E-9	1,000	-1,2849E-008	1,7806E-008
Mirador 6		-2,17041E-9	4,82652E-9	1,000	-1,7442E-008	1,3101E-008
Mirador 7		-2,00904E-9	4,77103E-9	1,000	-1,7105E-008	1,3087E-008
Mirador 8		2,72951E-9	4,81824E-9	1,000	-1,2516E-008	1,7975E-008
Mirador 9		-2,75031E-10	5,20978E-9	1,000	-1,6759E-008	1,6209E-008
Mirador 10		4,02552E-10	4,93014E-9	1,000	-1,5197E-008	1,6002E-008
Mirador 6		Mirador 1	-2,56685E-8*	3,99669E-9	,000	-3,8315E-008
	Mirador 2	-2,30858E-8*	4,65198E-9	,000	-3,7805E-008	-8,3664E-009
	Mirador 3	5,77360E-9	4,86220E-9	,974	-9,6107E-009	2,1158E-008
	Mirador 4	4,64895E-9	4,86644E-9	,995	-1,0749E-008	2,0047E-008
	Mirador 5	2,17041E-9	4,82652E-9	1,000	-1,3101E-008	1,7442E-008
	Mirador 7	1,61370E-10	4,79365E-9	1,000	-1,5006E-008	1,5329E-008
	Mirador 8	4,89992E-9	4,84064E-9	,992	-1,0416E-008	2,0216E-008
	Mirador 9	1,89538E-9	5,23051E-9	1,000	-1,4654E-008	1,8445E-008
	Mirador 10	2,57296E-9	4,95203E-9	1,000	-1,3096E-008	1,8242E-008

Mirador 7	Mirador 1	-2,58298E-8*	3,92950E-9	,000	-3,8263E-008	-1,3396E-008
	Mirador 2	-2,32472E-8*	4,59437E-9	,000	-3,7784E-008	-8,7100E-009
	Mirador 3	5,61222E-9	4,80712E-9	,977	-9,5977E-009	2,0822E-008
	Mirador 4	4,48758E-9	4,81141E-9	,995	-1,0736E-008	1,9711E-008
	Mirador 5	2,00904E-9	4,77103E-9	1,000	-1,3087E-008	1,7105E-008
	Mirador 6	-1,61370E-10	4,79365E-9	1,000	-1,5329E-008	1,5006E-008
	Mirador 8	4,73855E-9	4,78531E-9	,993	-1,0402E-008	1,9879E-008
	Mirador 9	1,73401E-9	5,17934E-9	1,000	-1,4654E-008	1,8122E-008
	Mirador 10	2,41159E-9	4,89796E-9	1,000	-1,3086E-008	1,7909E-008
	Mirador 8	Mirador 1	-3,05684E-8*	3,98668E-9	,000	-4,3183E-008
Mirador 2		-2,79858E-8*	4,64338E-9	,000	-4,2678E-008	-1,3293E-008
Mirador 3		8,73674E-10	4,85397E-9	1,000	-1,4485E-008	1,6232E-008
Mirador 4		-2,50972E-10	4,85823E-9	1,000	-1,5623E-008	1,5121E-008
Mirador 5		-2,72951E-9	4,81824E-9	1,000	-1,7975E-008	1,2516E-008
Mirador 6		-4,89992E-9	4,84064E-9	,992	-2,0216E-008	1,0416E-008
Mirador 7		-4,73855E-9	4,78531E-9	,993	-1,9879E-008	1,0402E-008
Mirador 9		-3,00454E-9	5,22286E-9	1,000	-1,9530E-008	1,3521E-008
Mirador 10		-2,32696E-9	4,94396E-9	1,000	-1,7970E-008	1,3316E-008
Mirador 9		Mirador 1	-2,75638E-8*	4,45198E-9	,000	-4,1650E-008
	Mirador 2	-2,49812E-8*	5,04851E-9	,000	-4,0955E-008	-9,0072E-009
	Mirador 3	3,87822E-9	5,24285E-9	,999	-1,2710E-008	2,0467E-008
	Mirador 4	2,75357E-9	5,24679E-9	1,000	-1,3847E-008	1,9355E-008
	Mirador 5	2,75031E-10	5,20978E-9	1,000	-1,6209E-008	1,6759E-008
	Mirador 6	-1,89538E-9	5,23051E-9	1,000	-1,8445E-008	1,4654E-008
	Mirador 7	-1,73401E-9	5,17934E-9	1,000	-1,8122E-008	1,4654E-008
	Mirador 8	3,00454E-9	5,22286E-9	1,000	-1,3521E-008	1,9530E-008
	Mirador 10	6,77583E-10	5,32627E-9	1,000	-1,6175E-008	1,7530E-008
	Mirador 10	Mirador 1	-2,82414E-8*	4,12123E-9	,000	-4,1282E-008
Mirador 2		-2,56588E-8*	4,75940E-9	,000	-4,0718E-008	-1,0599E-008
Mirador 3		3,20063E-9	4,96507E-9	1,000	-1,2509E-008	1,8910E-008
Mirador 4		2,07599E-9	4,96923E-9	1,000	-1,3647E-008	1,7799E-008
Mirador 5		-4,02552E-10	4,93014E-9	1,000	-1,6002E-008	1,5197E-008
Mirador 6		-2,57296E-9	4,95203E-9	1,000	-1,8242E-008	1,3096E-008
Mirador 7		-2,41159E-9	4,89796E-9	1,000	-1,7909E-008	1,3086E-008
Mirador 8		2,32696E-9	4,94396E-9	1,000	-1,3316E-008	1,7970E-008
Mirador 9		-6,77583E-10	5,32627E-9	1,000	-1,7530E-008	1,6175E-008

De las pruebas post-hoc se concluye que las muestras que tienen una variación estadísticamente significativa son las del pozo Mirador 1 ambas muestras cumplen la hipótesis nula entre sí pero su relación con las otras muestras es de cumplimiento de la hipótesis alternativa, los valores

estadísticos descriptivos Tabla 58 reflejan dichos supuestos en los valores de medias observados entre grupos.

Tabla 58 Valores estadísticos descriptivos para Cs formación Mirador.

Descriptivos								
Compresibilidad del solido(1/psi)								
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Mirador 1	9401	1.3397E-07	1.99125E-07	2.05371E-09	1.2995E-07	1.3800E-07	-4.23E-07	6.88E-07
Mirador 2	6499	1.3139E-07	2.53462E-07	3.14405E-09	1.2523E-07	1.3755E-07	-5.09E-07	7.56E-07
Mirador 3	9583	1.0253E-07	3.37484E-07	3.44748E-09	9.5774E-08	1.0929E-07	-8.60E-07	1.07E-06
Mirador 4	9558	1.0366E-07	3.37628E-07	3.45347E-09	9.6887E-08	1.1044E-07	-8.61E-07	1.04E-06
Mirador 5	9537	1.0613E-07	3.31741E-07	3.39698E-09	9.9476E-08	1.1279E-07	-8.13E-07	1.02E-06
Mirador 6	9801	1.0831E-07	3.39439E-07	3.42868E-09	1.0158E-07	1.1503E-07	-8.58E-07	1.05E-06
Mirador 7	10159	1.0814E-07	3.37664E-07	3.35011E-09	1.0158E-07	1.1471E-07	-8.13E-07	1.03E-06
Mirador 8	9793	1.0341E-07	3.38146E-07	3.41701E-09	9.6707E-08	1.1010E-07	-8.46E-07	1.05E-06
Mirador 9	10851	1.0641E-07	4.11462E-07	3.94998E-09	9.8667E-08	1.1415E-07	-1.07E-06	1.25E-06
Mirador 10	9130	1.0573E-07	3.41410E-07	3.57307E-09	9.8728E-08	1.1274E-07	-8.49E-07	1.07E-06
Total	94312	1.1018E-07	3.31093E-07	1.07812E-09	1.0807E-07	1.1230E-07	-1.07E-06	1.25E-06

4.5 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA FORMACIONES DE ESTUDIO

Tabla 59 Tipo de distribución de probabilidad de diferentes parámetros mecánicos de las formaciones de estudio.

FORMACIÓN	PARÁMETRO	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	OBSERVACIONES
La Luna	To	Normal	No existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna. se analizó como un

			solo conjunto de población de datos
La Luna	UCS	F de Fisher	Debido a que la cantidad de muestras es menor a 50 para todos los miembros, el método de Shapiro Wilk es el que se recomienda y en el cual se observa para todos los casos una significancia menor al 5% rechazando la hipótesis nula que dice que las muestras tienen una distribución de tipo normal
La Luna	AFI	Normal	No existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna. se analizó como un solo conjunto de población de datos
La Luna	V	Log Normal	Se realizó el test de Shapiro-Wilk. Donde se comprueba que la distribución de probabilidades no es de tipo normal debido a que la formación galembó que posee una mayor cantidad de muestras, tiene una significancia menor a 0.05 a

			pesar de que las otras dos formaciones aceptan la hipótesis nula
La Luna	E	Normal	El supuesto de distribución de probabilidad normal es negado por el análisis de Shapiro wilks en la formación Galemba donde la significancia de las pruebas es inferior al 0.05 sin embargo las formaciones Pujamana y salada aceptan este supuesto por su significancia mayor al 0.05 y anuncia que tiene una distribución probabilística de tipo normal.
Gacheta	To	Normal	El tipo de distribución de probabilidades se analiza mediante las pruebas de normalidad, en este caso de estudio se realizó la el test de Shapiro-Wilks, donde la significancia es mayor al 5% esto como en los casos anteriores acepta la hipótesis nula que dice que la

			muestra posee una distribución de probabilidades de tipo normal.
Gacheta	Co	Normal	Los datos expresan una tendencia central recostada levemente hacia la derecha es decir asimétrica negativa y distribución Leptocúrtica según Curtosis
Gacheta	AFI	Normal	Los datos expresan una tendencia central recostada levemente hacia la derecha es decir asimétrica negativa y distribución Platicúrtica según Curtosis.
Gacheta	V	Normal	Los valores estadísticos expresan medidas de dispersión indican una tendencia central recostada levemente hacia la izquierda es decir asimétrica positiva y distribución Platicúrtica según Curtosis.
Gacheta	E	Log-normal	Las medidas estadísticas de distribución dan una primera impresión de la no distribución normal de los datos, un

			avistamiento grafico del tipo de distribución "J" invertida se aprecia mejor en el Graficos
Mirador	Cs	Normal	Los datos de compresibilidad, se analizó el supuesto de homocedasticidad según test de Levene. El modelo rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas y acepta la hipótesis alternativa lo que nos informa que si existen diferencias significativas entre los grupos de datos de muestras.

Además, la Tabla 60 representa el consolidado de las medias para cada propiedad mecánica de las formaciones de estudio con sus respectivos miembros, por ultimo las media de pares de grupos para cada formación.

Tabla 60 Consolidado de medias de las formaciones de estudio.

Formación	Propiedad	Factor	Media	
La luna	To (psi)	Galembo	822.19	829.01
		Pujamana	861.29	
		Salada	830.64	
	UCS(psi)	Galembo	4579.20	4314.41
		Pujamana	1975.00	
		Salada	4425.00	
	AFI	Galembo	25.67	25.36
		Pujamana	22.50	
		Salada	25.88	
	Relación de Poisson (v)	Galembo	0.26	0.26
		Pujamana	0.24	
		Salada	0.28	
	Módulo de Young (E)	Galembo	3.68E+06	3.88E+06
		Pujamana	3.19E+06	
		Salada	5.14E+06	
Gachetá	To (psi)	N/E	1654.39	1654.39
	Co(psi)	N/E	1351.35	1351.35
	AFI	N/E	5.28E+01	52.83
	Relación de Poisson (v)	N/E	7.00E-02	0.07
	UCS(psi)	N/E	7965.71	7965.71
	Módulo de Young (E)	N/E	1.83E+06	1.83E+06
Mirador	Cs(1/psi)	Mirador 1	1.34E-07	1.3268E-07
		Mirador 2	1.31E-07	
		Mirador 3	1.03E-07	1.0554E-07
		Mirador 4	1.04E-07	
		Mirador 5	1.06E-07	
		Mirador 6	1.08E-07	
		Mirador 7	1.08E-07	
		Mirador 8	1.03E-07	
		Mirador 9	1.06E-07	
		Mirador 10	1.06E-07	

5. CONCLUSIONES

El tratamiento eficiente de datos con parámetros estadísticos y geográficos, forjan una base de datos estructurada la cual representa una fuente de información importante para el análisis geomecánico de las formaciones colombianas, dichos datos pertenecen a ECOPETROL S.A. y se encuentran bajo supervisión del LMR del ICP.

Para la resistencia a la tensión (T_0), no existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna. Por lo cual las muestras tienen una distribución de tipo normal, se analizó como un solo conjunto de población de datos las comparaciones múltiples indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos muestreados de Galembó-Pujamana, Galembó-salada y Pujama-Salada

Para la resistencia a la compresión no confinada (UCS), debido a que la cantidad de muestras es menor a 50 para todos los miembros, el método de Shapiro Wilk es el que se recomienda y en el cual se observa para todos los casos una significancia menor al 5% rechazando la hipótesis nula que dice que las muestras tienen una distribución de tipo normal y se acepta la hipótesis alternativa. Donde se observó que los datos tienen una distribución de datos F de Fisher.

Para la relación de poisson (ν), el primer supuesto de normalidad se realizó el test de Shapiro-Wilk. Donde se comprueba que la distribución de probabilidades no es de tipo normal debido a que la formación galembó que posee una mayor cantidad de muestras, tiene una significancia menor a 0.05 a pesar de que las otras dos formaciones aceptan la hipótesis nula es necesario analizar la distribución de probabilidades gráficas de los tres miembros y de la formación como un solo modelo. Es evidente en el gráfico que la tendencia de los datos no es de tipo normal ya que los datos se concentran hacia 0.2 y 0.4 hacia la izquierda del gráfico, una distribución de probabilidades de tipo log-normal sería la adecuada para este modelo.

Para el ángulo de fricción interna (AFI), no existe un efecto estadísticamente significativo del hecho de tener diferentes miembros en la formación la Luna. Por lo cual las muestras tienen una distribución de tipo

normal, se analizó como un solo conjunto de población de datos las comparaciones múltiples indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos muestreados de Galembo-Pujamana, Galembo- salada y Pujama-Salada.

Para el módulo de young (E), el supuesto de distribución de probabilidad normal es negado por el análisis de Shapiro wilks en la formación Galembo donde la significancia de las pruebas es inferior al 0.05 sin embargo las formaciones Pujamana y salada aceptan este supuesto por su significancia mayor al 0.05 y anuncia que tiene una distribución probabilística de tipo normal. A la formación Galembo se observó una distribución poblacional de tipo Log-normal debido a que los datos se recuestan a la izquierda de la media

La formación Gacheta se tienen datos muestreados de un solo pozo (Gaván 1), estos datos no están sectorizados por algún otro criterio adicional o factor por lo cual no se aplica el análisis estadístico ANOVA, sino que más bien se usa estadística descriptiva para generar una caracterización mecánica que describa el comportamiento muestral de dicha formación.

Los valores estadísticos de la cohesión de la formación Gacheta expresan una tendencia central recostada levemente hacia la derecha es decir asimétrica negativa y distribución Leptocúrtica según Curtosis. Se verifico matemáticamente mediante el test de Shapiro-Wilks una distribución probabilística de tipo normal debido a la significancia mayor al 5%.

Los valores estadísticos del AFI de la formación Gacheta expresan una tendencia central recostada levemente hacia la derecha es decir asimétrica negativa y distribución Platicúrtica según Curtosis. Se verifico matemáticamente mediante el test de Shapiro-Wilks una distribución probabilística de tipo normal debido a la significancia mayor al 5%.

Debido a la alta densidad poblacional de compresibilidades de la formación mirador los datos presentan datos anómalos o extremos que se deben a condiciones del laboratorio o a respuestas de la roca a bajas presiones de confinamiento para el caso de estudio se analiza únicamente la zona de compresibilidad estables y dichos datos anómalos son excluidos del análisis por medio del análisis del diagrama de caja y bigotes.

Para los datos de compresibilidad de la formación mirador, se analizó el supuesto de homocedasticidad según test de Levene. El modelo rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas y acepta la hipótesis alternativa lo que nos informa que si existen diferencias significativas entre los grupos de datos de muestras. De las pruebas post-hoc se concluye que las muestras que tienen una variación estadísticamente significativa son las del pozo Cupiagua A1.

6. RECOMENDACIONES

Implementar un modelo geomecánico basado en los parámetros de entrada de las propiedades mecánicas de la roca para la formación la luna.

Implementar en el software de la base de datos del laboratorio de mecánica de rocas del ICP las variables estadísticas de cada lectura de las formaciones de estudio.

Realizar un estudio comparativo entre modelos geomecánicos de respuesta de pozo reales con los valores de escenarios generados a partir de procesos estadísticos.

Realizar un estudio estadístico de tipo t-student para una formación que posea datos de laboratorio de propiedades mecánicas obtenidas de muestras de pozo y afloramientos

BIBLIOGRAFÍA

- Anwar Ali, T. B. (2003). Observación del cambio de las rocas: modelado mecánico del subsuelo. Oilfield Review, 20.
- Badii, M. H. (2009). Distribuciones probabilísticas de uso común. Daena: International Journal of Good Conscience, 30.
- Barla, G. (2012). Rock Mechanics and Rock Engineering (6 ed., Vol. 42). Turín, Italy.
- Barriales, S. (2015). Ensayos de Laboratorio y Explicación de la Variable de Caracterización en Rocas. Diplomado de Mecánica de Rocas - Alumno Guía.
- Barrios, E. (1 de junio de 2015). blogspot. Obtenido de blogspot: <http://emelycruzadobarrios.blogspot.com.co/>
- Carlos Andres Ballesteros Camaro, J. M. (2012). ESTUDIO ESTRATIGRAFICO SECUENCIAL PARA LA FORMACION LA LUNA EN EL COSTADO ORIENTAL DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO MAGDALENA : UNA VISION EXPLORATORIA DE HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES. Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. ESCUELA DE GEOLOGIA.
- Carrillo, Z. C. (s.f.). ESTABILIDAD DE POZOS (WELLBORE STABILITY).Apuntes de clase
- Cazau, P. (2006). Fundamentos de estadística. Buenos Aires: UBA.
- Cook, J. (2008). La geomecánica. Schlumberger, 3.
- cretáceo, A. d. (2015). Fernando antonio plazas niño. Bucaramanga: Universidad industrial de santander- Escuela de ingeniería de petróleos.
- David Velázquez Cruz, G. E. (2014). NUEVO MÉTODO PARA EL ANÁLISIS DE LA PRESIÓN DE PORO BASADO EN REGISTROS DE POZO. VIII INGEPET 2014 (GEO-DE-DV-08-E), 9.

- Delgado Carreño, O. R., & Manrique Guio, V. (2016). Metodología para diseñar el modelo geomecánico 1D de estabilidad de pozos. Bucaramanga: UIS.
- Eduard Pabón, Yussed Méndez. (2004). **ÁNALISIS DE LA GEOMECÁNICA APLICADA A LA ESTABILIDAD DE POZOS EN LOS CAMPOS CUSIANA Y CUPIAGUA MEDIANTE ANALOGÍAS CON YACIMIENTOS SENSIBLES A ESFUERZOS. BUCARAMANGA.**
- Emery, X. (2013). Geoestadística. Facultad de ciencias físicas y matemáticas Universidad de Chile.
- Fjaer, E., Holt, R., Horsrud, P., Raaen, A., & Risnes, R. (2008). Petroleum related rock mechanics (second ed.). Netherlands: Elsevier.
- Gómez Galvis, O. J., & Ramírez Silva, L. f. (2011). Herramienta software para automatizar la interpretación de pruebas en el laboratorio de mecánica de rocas del instituto Colombiano del Petróleo. Bucaramanga: UIS.
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, c., & Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. Pearson Educación, S.A.
- Gustavo Sarmiento Pérez, E. J. (2015). Estratigrafía y Petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena. Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, 21.
- Hidrocarburos, A. N. (2012). Cuenca Llanos Orientales. Bucaramanga: Ingrain Digital Rock Physics Lab.
- Jenny Martinez, H. P. (2006). Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisotropos: aplicación a la formación mirador del campo cupiagua, piedemonte llanero . Bucaramanga : Universidad industrial de santander-Escuela de Geología.
- John Cook, R. A. (2007/2008). Las rocas importan: Realidades de la geomecánica. Oilfield Review, 22.
- Julieta Sanchez, S. C. (2005). Análisis de zonas fracturadas mediante el uso de registros electricos, para la formación mirador, en un campo del piedemonte

llanero colombiano. Bucaramanga: Universidad industrial de santander-
Escuela de Geología.

Laura Viviana Galvis Carreño, C. A. (2011). Estimación de propiedades mecánicas de roca utilizando inteligencia artificial. *Ingeniería y Ciencia*, ISSN 1794–9165, 21.

M. Z. Yusoff, W. P. (2013). Mud Weight Prediction for Deviated Drilling. Department of Petroleum Engineering, 7.

Meza, J. M., & Chaves, C. A. (2005). Técnicas de indentación: Medición de propiedades mecánicas en cerámicas. Grupo ciencia y Tecnología de materiales. Universidad Nacional de Colombia-Medellín.

Niño, A. (2011). Análisis estadístico multivariado de las propiedades fisicoquímicas de tres aceites esenciales colombianos para el establecimiento de criterios de calidad. Bucaramanga: Universidad industrial de santander Escuela de Química.

Ortíz, M. D. (2009). Aplicación de la geomecánica en la estabilidad del agujero de un pozo de la región sur. México.: Universidad nacional autónoma.

PANEZ, C. C. (2010). ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA LA PREDICCIÓN DE PRESIÓN DE POROS APLICADO A LA ESTABILIDAD DE POZOS DE PERFORACIÓN PETROLERA. LIMA : UNIVERSIDAD RICARDO PALMA.

Pascal, A. G. (2013). Estimación de parámetros geomecánicos a partir de sísmica 3D en el campo Moporo ubicado al sureste del lago Maracaibo, estado Zulia. Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

Pedro Ramírez Oyanguren, L. A. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid.

Plumb, R., Edwards, S., Pidcock, G., Lee, D., & Stacey, B. (2000). The mechanical earth model concept and its application to high-risk well construction projects. (59128).

Rodríguez, L. (2017). Análisis estadístico y de confiabilidad para la predicción de fallas y costos para una facilidad de la industrial del petróleo. Bucaramanga : Universidad industrial de santander Físico-Mecánicas.

- Ronald E. Walpole, R. H. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias . Mexico: Pearson.
- Ros ávila, J. (2008). Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos.
- Suárez Burgoa, L. O. (2014). Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea (2nd ed.). Medellín.
- Suárez Burgoa, L. O. (2016). Mecánica del macizo rocoso (Primera ed.). Medellín.
- Suarez Diaz, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Ingenieria de suelos Ltda.
- TARAZONA, I. C. (2004). EVALUACIÓN DE LOS MECANISMOS DE FALLA QUE CONDUCEN A LA INESTABILIDAD DE POZO . BUCARAMANGA : UIS.
- Veenhoff, P. (09 de febrero de 2016). linkedin. Obtenido de linkedin: <https://www.linkedin.com/pulse/who-do-you-develop-your-b2b-sales-academy-patrick-veenhoff>
- Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. New York: Cambridge University Press.

z