

Metodología para estimar propiedades elásticas en muestras de rocas a través del uso de Física
de Roca Digital (DRP). Caso de estudio: Arenisca

Carlos Sebastián Correa Díaz

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Rocio del Pilar Bernal Olaya

Ph.D Geología

Codirector

Darwin Mateus Tarazona

Geólogo Msc

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios por las oportunidades brindadas durante mi camino. La gloria sea siempre para él.

A mis papás y hermanos, dueños de mis triunfos.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación Estabilidad de Pozo, por la oportunidad de realizar mi proyecto de grado, grupo al que le tengo gran cariño y al que guardo gran sentido de pertenencia. A la profesora Rocío por su motivación y recomendaciones a la hora de realizar el proyecto, a los profesionales del grupo de geomecánica del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) por el seguimiento durante el mismo.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por el conocimiento brindado durante este proceso.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Generalidades de la Geomecánica.....	17
2.1 Elasticidad Lineal	17
2.1.1 Esfuerzo	18
2.1.2 Tensor de Esfuerzo.	19
2.1.3 Deformación.	22
2.2 Definición de los Módulos Elásticos Estáticos.....	23
2.2.1 Módulo de Young (E).....	24
2.2.2 Relación de Poisson (V)	26
2.3 Valores Tipicos en Rocas Sedimentarias.....	28
3. Fisica de Roca Digital.....	31
4. Metodologia.....	33
4.1 Etapa 1: Recopilación de Información..	33
4.2 Etapa 2: Adquisición, Segmentación, Generación de la malla tetraedrica	34
4.2.1 Adquisición de la Imagen..	34
4.2.2 Segmentación Y Análisis de Imagen.....	36
4.2.2.1 Identificación de Ruido en la Tomografía.....	37
4.2.2.2 Procesamiento de la Imagen..	38

4.2.2.3 Binarización.....	40
4.2.2.4 Análisis de Fractura	42
4.2.2.5 Generación de la Malla Tetraédrica.....	43
4.2.2.6 Selección de Subvolúmenes.. ..	45
4.2.2.7 Generación de una Superficie Triangular.....	45
4.2.2.8 Simplificación de la Superficie Triangular.....	46
4.2.2.9 Reparación de los Triángulos De Forma Manual.....	47
4.2.2.10 Reenmallado de la Superficie, Generación de la Malla Tetraedrica y Exportación.....	48
4.3 Etapa 3: Cálculo de Modulos Elasticos y Validación de Resultados.. ..	48
4.3.1 Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones.....	48
4.3.1.1 Simulación de los Procesos Fisicos.. ..	48
4.3.1.2 Elementos Finitos por Elasticidad Estática.. ..	49
4.4.1.3 Definición de un Modelo en Abaqus	50
4.4.1.3.1 Módulo Part	50
4.4.1.3.2 Módulo Mesh	51
4.4.1.3.3 Módulo Property	52
4.4.1.3.4 Módulo Step	54
4.4.1.3.5 Módulo Load	55
4.4.1.3.6 Módulo Visualization	56
4.3.2 Cálculo de los Módulos Elásticos.....	57
4.3.2.1 Cálculo del Módulo de Young (E).. ..	58
4.3.2.2 Cálculo de la Relación de Poisson (V)	58
4.3.3 Validación de Resultados	59

5. Conclusiones	64
6. Recomendaciones..	65
Referencias Bibliográficas.....	68

Lista de Tablas

Tabla 1. Módulos elásticos de ttípicos minerales formadores de roca.	28
Tabla 2. Rangos de módulos de Young obtenidos en pruebas de laboratorio	29
Tabla 3. Rangos de relación de Poisson obtenidos en pruebas de laboratorio	30
Tabla 4. Caracterización de la fractura rellena obtenida por análisis cuantitativo.	43
Tabla 5. Parámetros de calidad de acuerdo a las características de los triángulos que componen la malla	47
Tabla 6. Comparación entre los resultados obtenidos por el uso de la física de roca digital y ensayos de laboratorio	61

Lista de Figuras

Figura 1. Concepto de esfuerzo y deformación	21
Figura 2. Concepto del módulo de Young y relación de Poisson.....	27
Figura 3. Gráfica con las diferentes tendencias de módulo de Young para cada uno de los tipos de roca.....	30
Figura 4. Gráfica con las diferentes tendencias de relación de Poisson para cada uno de los tipos de roca.....	31
Figura 5. Flujo de trabajo DRP	33
Figura 6. Generación del modelo tridimensional de roca.....	35
Figura 7. Tipo más común en tomografías	37
Figura 8. Aplicación de un filtro mediano.....	39
Figura 9. Análisis de imagen y segmentación	42
Figura 10. Selección de un subvolumen representativo de la muestra original para la realización de la malla tetraédrica.....	44
Figura 11. Generación de la malla tetraédrica.....	46
Figura 12. Verificación de la calidad malla en el software Abaqus.....	51
Figura 13. Creación de dos secciones.....	53
Figura 14. Definición de una carga de presión perpendicular a la cara superior del subvolumen y las condiciones de contorno.....	56
Figura 15. Visualización de resultados después de la simulación	57
Figura 16. Visualización de resultados después de la simulación	60

Lista de Apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la
Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Geometría del modelo	50
Apéndice B. Cálculo de valores de esfuerzo y deformación par cada nodo	59

RESUMEN

TITULO: METODOLOGÍA PARA ESTIMAR PROPIEDADES ELÁSTICAS EN MUESTRAS DE ROCAS A TRAVÉS DEL USO DE FÍSICA DE ROCA DIGITAL (DRP). CASO DE ESTUDIO: ARENISCA**

AUTOR: CARLOS SEBASTIÁN CORREA DIAZ*

PALABRAS CLAVE: Física de Roca digital, coeficientes elásticos, elementos finitos, estructura de la roca.

DESCRIPCIÓN: La cuantificación de las propiedades elásticas en una muestra de arenisca de grano fino de una formación geológica de interés de un campo colombiano por medio de la técnica de física de roca digital (DRP), que involucra el uso de imágenes de alta resolución para realizar una caracterización de la estructura de la roca y una posterior simulación numérica con elementos finitos (FEM) basada en el modelo de elasticidad lineal, arrojó resultados consistentes con los datos del laboratorio preexistentes, donde se identificó como la porosidad y la mineralogía de la roca juega un papel fundamental en la variación del módulo de Young y la relación de Poisson.

En este documento se muestra resumido un flujo de trabajo que incluye la adquisición de las imágenes de alta resolución, su procesamiento y segmentación, la generación de una malla tetraédrica que describe la estructura de la roca usando el software AVIZO (Software de visualización y cálculos en conjuntos de datos tridimensionales), la configuración de un modelo numérico para determinar la deformación a partir de una carga asignada y la malla tetraédrica exportada por medio del software ABAQUS (Software de simulación para cálculos estáticos lineales y no-lineales), y su posterior comparación con ensayos en muestras físicas.

** Trabajo de grado

* Facultad de Ingenieras Fisico-Quimicas. Escuela de Geologia. Director: Phd. Rocio del Pilar Bernal Olaya. Phd Geologia

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY TO ESTIMATE ELASTIC PROPERTIES IN ROCK SAMPLES THROUGH THE USE OF DIGITAL ROCK PHYSICS (DRP). CASE STUDY: SANDSTONE**

AUTHOR: CARLOS SEBASTIÁN CORREA DIAZ *

KEY WORDS: Digital Rock Physics, elastic coefficients, finite elements, rock structure.

DESCRIPTION: The quantification of elastic properties in a sample of fine-grained sandstone from a geological formation of interest in a Colombian field by means of the digital rock physics technique (DRP), which involves the use of high resolution images for perform a characterization of the structure of the rock and a subsequent numerical simulation with finite elements (FEM) based on the linear elasticity model, showed consistent results with the pre-existing laboratory data. Additionally, it allowed us to identify how the porosity and the mineralogy of the rock play a fundamental role in the variation of the Young's modulus and the Poisson's ratio.

This document shows a workflow that includes the acquisition of the images, their processing and segmentation, the generation of a tetrahedral mesh that describes the microstructure of the rock, using the software AVIZO (visualization software and calculations in three-dimensional data sets). Furthermore, the configuration of a numerical model that calculates stress and strained on the tetrahedral mesh using ABAQUS software (simulation software for linear and non-linear static calculations), and the comparison of the modeled solution with the physical test samples.

** Bachelor Thesis

* Faculty of Physico Chemical Engineers. School of Geology. Directed: Phd. Rocio del Pilar Bernal Olaya. Phd Geology

Introducción

Las constantes elásticas permiten entender el comportamiento mecánico de las rocas y clasificarlas de acuerdo a sus aptitudes ingenieriles a nivel de pozo y de yacimiento. Su importancia radica en que son variables de entrada fundamentales para la realización de modelos geomecánicos 1D y 3D que buscan evaluar los problemas de estabilidad de pozo y optimizar la perforación en campos petroleros. Su cuantificación usualmente se hace a partir de pruebas de laboratorio aplicadas a muestras en condiciones de superficie, estas pruebas de laboratorio son de tipo destructivo, es decir, que no se pueden obtener grandes cantidades de datos a partir de una sola muestra de roca, ni los experimentos son replicables.

Por tanto, surge una nueva tecnología denominada Física de Roca Digital (DPR por sus siglas en inglés) que plantea una metodología de trabajo que complementa la caracterización de roca hecha en el laboratorio y permite conocer las propiedades elásticas de las rocas en un menor tiempo y sin realizar ensayos destructivos costosos, ya que el flujo de trabajo DRP incorpora la simulación de procesos físicos en el espacio poroso y matriz mineral de la roca a través de algoritmos que utilizan el método de elementos finitos, para obtener estimaciones de parámetros geomecánicos a micro-escala, que posteriormente se extrapolan para caracterizar la roca a nivel macro.

La importancia de este estudio reside en que con el uso de la tecnología DRP, se puede determinar el módulo elástico de las rocas, coeficientes de Young y Poisson de una muestra de roca de arenisca, a partir de tomografías de rayos X (tomadas por el Instituto Colombiano del

Petróleo). Los resultados obtenidos serán validados comparándolos con valores de coeficientes elásticos medidos en el laboratorio.

A partir de este estudio se espera comprender el efecto de la estructura de la roca, su comportamiento elástico y a su vez, caracterizar la capacidad de fracturamiento de la muestra.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estimar las propiedades elásticas de una muestra de arenisca usando la metodología propuesta por la tecnología Física de Roca Digital (DRP), a partir de tomografías computarizadas de rayos X (CT) tomadas en el Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) usando el software AVIZO y posteriormente compararlos con datos preexistentes de ensayos de laboratorio.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir la fase mineral de la roca a partir del proceso de segmentación
- Caracterizar fracturas observadas sobre las muestras de roca cuantificando su apertura, relleno, volumen, área, y longitud.
- Interconectar los voxels de la muestra a partir de la generación de una malla tetraédrica.
- Asignar las condiciones de contorno al modelo en tres dimensiones de roca para resolver las ecuaciones de los respectivos módulos.
- Extrapolar linealmente el esfuerzo a través de la simulación de un gradiente de presión usando un método de elementos finitos.
- Calcular el esfuerzo y la deformación del modelo en tres dimensiones de la roca, variables necesarias para el cálculo de los módulos elásticos.
- Comparar los valores obtenidos con datos de laboratorio.

2. Generalidades de la Mecánica de Rocas

Thiercelin y Roegiers (2000) refieren que “la academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, definió a la mecánica de rocas como una ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de las rocas; es una rama de la mecánica que se ocupa del estudio de las respuestas de las rocas a los campos de fuerzas que actúan en su entorno” (p.31).

Esta ciencia en la industria del petróleo presenta una serie de aplicaciones que pueden ser resumidas en:

- Predicción en la estabilidad de pozos
- Optimización de la perforación
- Manejo en la producción de arena
- Fracturamiento Hidráulico
- Estimulación de yacimientos

2.1 Elasticidad Lineal

Tal como lo refiere Fjaer, et al., (1992) la mayoría de los materiales tienen la capacidad de resistir y recuperarse de las deformaciones producidas debido a esfuerzos. Esta habilidad es denominada elasticidad. Cuando un cuerpo se deforma al ser sometido a cierto sistema de fuerzas y éste se recupera totalmente a su forma inicial luego de remover las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, se dice que un cuerpo es perfectamente elástico, y si se conserva una relación lineal entre los esfuerzos y las deformaciones correspondientes se dice que el cuerpo es elástico

lineal. Por otra parte, si el cuerpo sobrepasa el límite superior de elasticidad se tiene un comportamiento plástico y si el esfuerzo continúa aumentando alcanzará su punto de fractura.

Esta teoría de elasticidad ha sido utilizada en la mecánica de rocas enfocada a la industria del petróleo ya que se consideran las propiedades físicas de cada unidad de roca constantes, de esta manera la deformación de la roca puede ser analizada mediante ecuaciones físicas sencillas (Calderón, 2012).

La teoría de la elasticidad se basa en dos conceptos básicos el esfuerzo y la deformación.

2.1.1 Esfuerzo. Se define como una fuerza (F) que actúa sobre un área (A) determinada. Teóricamente un esfuerzo (σ) se puede calcular mediante la ecuación (1). Según Zoback (2007) “El esfuerzo es un tensor que describe la densidad de fuerzas que actúan sobre todas las superficies que pasan por un punto dado” (p.20)

(1)

$$\frac{F}{A} = \sigma$$

Con el objetivo de estandarizar las unidades, en la industria del petróleo y gas en todo el mundo se usa el Sistema Internacional de medidas (SI) que define el esfuerzo como Newtons sobre metro cuadrado (N/mm^2) o Pascales, de igual forma se usan unidades en inglés (psi) que guardan esta equivalencia $1 \text{ MPa} = 145 \text{ psi}$.

Los esfuerzos presentan varias clasificaciones dependiendo de la dirección de las fuerzas externas en tensiles, compresivas, de cizallamiento, de flexión, de torsión o de varias combinaciones.

2.1.2 Tensor de Esfuerzos. Cuando una fuerza actúa en un punto de una superficie puede expresarse como un vector con componentes en tres direcciones (x,y,z). Esta fuerza está acompañada por una fuerza de reacción de la misma magnitud pero diferente sentido. La definición de estos vectores define el estado de esfuerzos en un punto (Fjaer, et al., 1992). Las componentes del vector fuerza en la dirección perpendicular y paralela al plano considerado se han denominado esfuerzos normales (σ) y de cizalla (τ) en un sistema cartesiano, respectivamente. Cuando un esfuerzo es aplicado en un punto, sus componentes van a depender del ángulo de inclinación del plano evaluado en ese punto con respecto al eje de coordenadas establecido, por lo que, para definir las fuerzas internas de un medio, se ha establecido el concepto de tensor de esfuerzos que provee la definición de los esfuerzos en las caras de tetraedros asumidos (*Cauchy*) en el punto de esfuerzo. Un cubo, por ejemplo, es un hexaedro de Cauchy que varios autores han usado para establecer los esfuerzos que actúan en un punto (Calderón, 2012, p.80). En el cubo, una fuerza tendrá componentes normales alineados a los ejes del sistema de coordenadas seleccionado, y perpendiculares a la cara evaluada, mientras que los esfuerzos de corte o cizalla, son los componentes paralelos a cada cara del cubo.

Por tanto, el esfuerzo sobre un plano tendrá tres componentes, si se toma como ejemplo el plano X (cuya posición en X es constante) se tendrá que sobre este plano actúa el componente de esfuerzo normal al plano σ_{xx} , y las dos componentes resultantes del esfuerzo de cizalla que serán τ_{xy} y τ_{xz} , donde el primer subíndice indica el plano sobre el que actúa la componente, y el segundo la dirección de actuación de la componente de esfuerzo. A su vez, sobre el plano Y

actuarán las componentes σ_{yy} , τ_{yx} , τ_{yz} , y en el plano Z actuarán las componentes σ_{zz} , τ_{zx} , τ_{zy} respectivamente.

De este modo se definen nueve componentes de esfuerzos para un punto representados en una matriz o tensor de esfuerzos (T) como se muestra a continuación en la expresión (2):

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Los esfuerzos normales que inciden en un plano perpendicularmente pueden obtenerse en por lo menos tres superficies del cubo, en la misma dirección de los ejes del sistema cartesiano, estos esfuerzos y planos se denominan superficies principales o planos principales (Davis y Selvadurai, 2002).

Si sólo se evalúan los esfuerzos normales a los planos principales, el tensor esfuerzo tiene una forma particularmente simple, el cual corresponde a los esfuerzos principales, donde los esfuerzos de cizalla son 0, tal como se observa en la expresión (3) (Figura 1a):

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Esta suposición se da cuando el vector de tracción T es paralelo al vector normal como se muestra en la siguiente expresión (4)

$$(4) \quad T = \sigma^n = 0$$

Donde el vector de tracción T debe ser paralelo a la unidad vector normal (n), de manera que las direcciones de las coordenadas sean paralelas a las direcciones principales de esfuerzo (o perpendiculares a las superficies principales).

De acuerdo a esto, en cualquier estado de esfuerzo tridimensional existen tres esfuerzos principales que son perpendiculares entre sí, donde se cumple que:

$$\sigma_x \geq \sigma_y \geq \sigma_z$$

Donde por notación suele usarse:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

Esfuerzo principal mayor (σ_1), Esfuerzo principal intermedio (σ_2), Esfuerzo principal menor (σ_3).

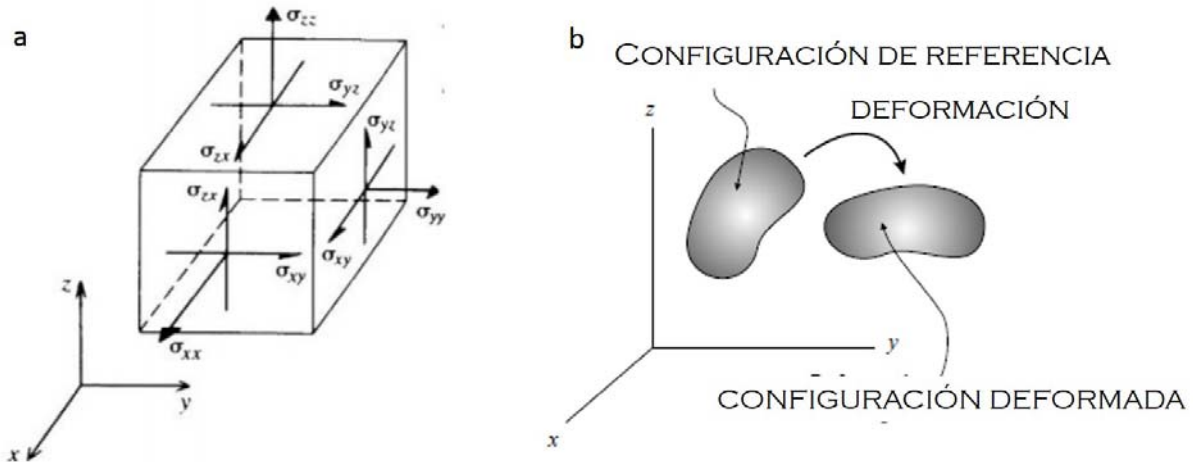


Figura 1. Conceptos de esfuerzo y deformación **a)** Componentes normales y de cizalla, que actúan sobre los planos de un cubo infinitesimal. Tomada y modificada de: Brady, R y Brown, E (2005). **b)** Deformación de un cuerpo observado en su cambio de posición y orientación. Tomada y modificada de: Davis y Selvadurai, (2002)

2.1.3 Deformación. Los esfuerzos no son observables, la única forma de estudiarlos es por medio de la respuesta del material a esa fuerza externa. Esta respuesta es llamada deformación, la cual “es una medida de la respuesta de un cuerpo cuando es sometido a la aplicación de fuerzas externas” (Calderón, 2012, p.121), o como respuesta a cambios de temperatura.

“La deformación de un sistema rocoso se da por un cambio de posición, orientación, forma y volumen con relación a una condición inicial y a un sistema de referencia” (Acebedo, 2009, p.12). En la Figura 1b, se puede observar una imagen esquemática de la deformación, donde se tiene un cuerpo con una configuración inicial de referencia ubicada en un sistema coordenado junto a un estado de deformación del mismo cuerpo luego de haber aplicado un esfuerzo.

Un cuerpo es un conjunto de partículas, donde la deformación se puede evaluar a través del cambio de posición de estas. Por tanto, durante la deformación en cada partícula se produce un vector de desplazamiento. Al igual que cuando se habla de esfuerzos, existen deformaciones de cizalla y normales. El ejemplo más básico de deformación es el normal ya que el desplazamiento ocurre en la dirección de un solo eje, es decir, existe una variación longitudinal en el cuerpo que se está estudiando. La deformación unitaria o por unidad de longitud será adimensional y puede describirse por medio de la siguiente ecuación (4):

(4)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Donde ΔL será la diferencia entre la longitud inicial del cuerpo (L) y la longitud final luego de ser sometida a un esfuerzo.

2.2 Definición de los Módulos Elásticos Estáticos

Para estudiar el comportamiento mecánico de las rocas existen ecuaciones matemáticas que representan comportamientos ideales de los materiales para describir las relaciones entre esfuerzo y deformación. Estas ecuaciones son llamadas ecuaciones constitutivas, porque su naturaleza depende de la constitución del material (Calderón, 2012). Estas ecuaciones constitutivas que describen el comportamiento elástico de la roca, incluyen entre sus variables los módulos elásticos, que son propiedades físicas de la roca inherentes a ella. Para el caso de las rocas, se asume que estas son materiales elásticos lineales, homogéneos e isotrópicos basado en la ley de elasticidad de Hooke.

La cuantificación de los módulos elásticos de las rocas objeto de estudio en este trabajo, es de gran importancia ya que estos se requieren como parámetro de entrada (junto con la presión de poro y la determinación del estado de esfuerzos) para la creación de modelos geomecánicos cuya finalidad es controlar la estabilidad del pozo, evaluar la permeabilidad de fracturas para evitar la pérdida de lodo, identificar el peso de lodo idóneo para evitar colapso del pozo, mantener la integridad del sello de fallas, predecir la producción arena y reducir los costos de perforación y en la pérdida de la producción.

Esta cuantificación de los módulos se logra a partir de ensayos de laboratorio, para lo que se requiere una muestra de roca, usualmente de las formaciones de interés de diferentes profundidades, lo que representa un costo elevado de los ensayos. Los costos pueden reducirse usando relaciones empíricas que permiten tener una estimación teórica de ellos.

Cabe resaltar que existen módulos elásticos estáticos y dinámicos, los estáticos son aquellos obtenidos a partir de la aplicación de una carga estática, suelen ser ensayos de tipo destructivo, mientras los dinámicos por su parte, se obtienen a partir de la medición de la velocidad de ondas P y S mediante pruebas de resonancia o pulso ultrasónico a nivel de laboratorio o usando la propagación de ondas sísmicas en campo.

Este trabajo se centra en el estudio de los módulos elásticos estáticos, especialmente de Young y la relación de Poisson.

2.2.1 Módulo De Young (E). Se denomina módulo de Young o de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación por unidad de longitud.

También es conocido como la constante de proporcionalidad o gradiente de la curva en una gráfica de esfuerzo vs deformación axial y corresponde a una propiedad constante para un material elástico-lineal (Calderón, 2012) como se observa en la Figura 2a, donde la curva obedece a una ecuación lineal.

Un módulo de Young alto significa que la roca tiene una alta resistencia y que no se deforma con facilidad.

La Ley de Hooke para el estado elástico, relaciona la deformación ϵ_y de un cuerpo sometido a esfuerzo axial, con la tensión normal generada por dicho esfuerzo σ_y , mediante la constante E que se denomina módulo de elasticidad lineal o módulo de Young (E), como se muestra en la ecuación (5), que asume que el material es isotrópico, es decir, que sus propiedades mecánicas son las mismas en todas sus direcciones.

$$(5) \quad \sigma_y = E \varepsilon_y$$

Existen ciertos materiales que no responden a una relación de esfuerzo y deformación directamente proporcional, es decir, que no cumplen una relación lineal, por tal motivo se calcula como se muestra en la ecuación (6) el módulo de elasticidad secante medio (E_{sec}), donde se establece una relación entre el incremento de esfuerzo aplicado ($\Delta\sigma$) y el cambio correspondiente a la deformación unitaria ($\Delta\varepsilon$) que experimenta en la dirección de aplicación del esfuerzo.

$$(6) \quad E_{sec} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Por su parte, el módulo elástico tangente es la pendiente del diagrama carga-deformación en cualquier punto, como se expresa en la ecuación (7)

$$(7) \quad E_{tan} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Además, materiales con comportamientos anisotrópicos, el módulo de Young varía de acuerdo a la dirección, por tanto, existen tres constantes elásticas E_x , E_y y E_z de acuerdo a la dirección de los ejes coordenados y se calculará siguiendo la ecuación (8), donde I_x , I_y , I_z , corresponden a los cosenos directores en la dirección en que se mide el módulo de Young respecto a las tres direcciones ortogonales.

$$(8) \quad E = I_x E_x + I_y E_y + I_z E_z$$

Para el caso de estudio basado en el método de elasticidad lineal propuesta en la ecuación (5), que asume que la muestra de trabajo es homogénea e isotrópica.

2.2.2 Relación De Poisson (V). La relación de Poisson es un parámetro adimensional y se define como la relación entre la deformación transversal (ϵ_x) (deformación perpendicular al esfuerzo aplicado) sobre la deformación longitudinal (deformación paralela al esfuerzo aplicado) en una muestra sometida a un esfuerzo uniaxial (Calderón, 2012), ya que todo elemento sometido a carga axial experimenta una deformación no solo en el sentido del esfuerzo, sino también en dirección perpendicular. En la Figura 2b se observa el comportamiento lineal de la curva que muestra la constante de proporcionalidad que es la relación de Poisson.

El coeficiente de Poisson es la relación entre deformación transversal (ϵ_x) y la deformación axial (ϵ_y) como se muestra la ecuación (9).

$$(9) \quad V = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

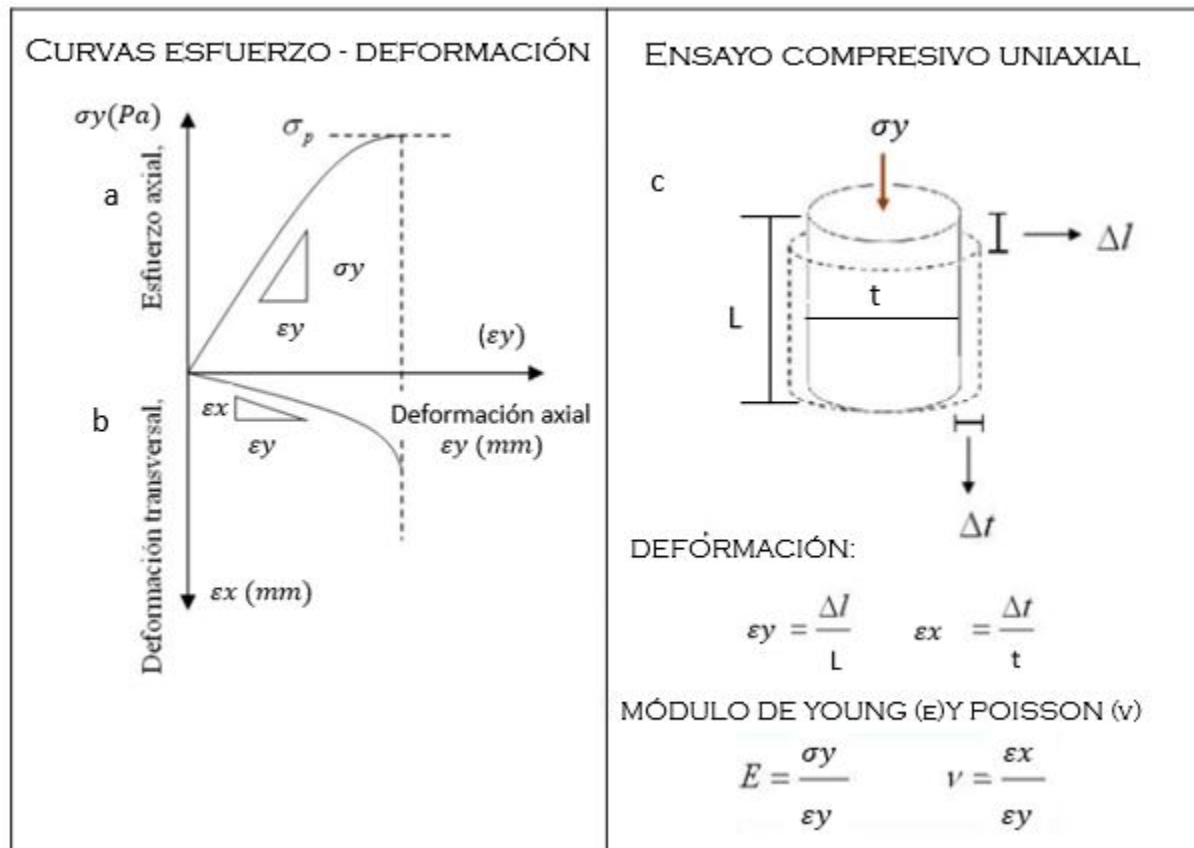


Figura 2. Conceptos del módulo de Young y relación de Poisson **a)** Curva de Esfuerzo axial-Deformación axial obtenidas de un ensayo de compresión uniaxial **b)** Curva de deformación axial vs deformación transversal **c)** Esquema de ensayo compresivo uniaxial. Tomado y modificado: Acebedo, D. (2009).

La prueba de laboratorio que se usa para determinar el módulo de Young y la relación de Poisson es la prueba de compresión uniaxial, que consiste en aplicar un esfuerzo en el eje longitudinal como se observa en la Figura 2c, donde hay una deformación longitudinal y transversal. Esta prueba no contempla la presión de confinamiento, es decir, que no tiene en cuenta la presión litostática e ignora la presión de los fluidos dentro de la roca.

2.3 Valores Típicos en Rocas Sedimentarias

Aunque se tienen unos valores típicos establecidos de módulos elásticos para los diferentes tipos de roca, existen una serie de factores que influyen en su estimación, como la mineralogía, litología, porosidad, geometría de los granos y de los poros, presencia de fluidos y volumen de Kerogeno. En este trabajo se hace énfasis en la porosidad y litología, que resultan ser los dos factores más incidentes.

Tabla 1. Módulos elásticos de típicos minerales formadores de roca. Adaptado de Sánchez, M., et., (2015)

Mineral	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson
Cuarzo	80 GPa	0.17
Calcita	55 GPa	0.21
Líticos	60 GPa	0.20
Feldespato	70 GPa	0.29

Autores como Lama y Vutukuri (1978) han documentado una compilación de valores de módulo de Young y valores de relación de Poisson obtenidos en pruebas de laboratorio por medio de una carga estática para muestras de diferentes litologías (areniscas, calizas y shales) con diferentes porosidades, donde la porosidad, a partir de mediciones empíricas se ha establecido que en algunos casos, es el principal mecanismo que controla los módulos elásticos ya que interviene en la integridad estructural y la rigidez de la roca.

Para entender el efecto de estos dos factores, en la tabla 2 se muestran algunos rangos de módulos de Young (Gpa) con mayor frecuencia en las pruebas, en función de tres rangos de porosidad obtenidos por los autores en mención, donde se observa que, para las Areniscas, rocas

de interés en este proyecto de grado, los módulos de Young más altos, ocurren en las muestras que poseen una porosidad menor a 8% y las areniscas de porosidad relativamente alta ($> 16\%$) tienen módulos de significativamente más bajos de Young, como se observa en la tendencia de la curva verde (Figura 3). Donde la variación obedece a una porosidad óptima que se observa entre 8-16%.

Tabla 2. Rangos de módulos de Young obtenidos en pruebas de laboratorio. Adaptado de Lama y Vutukuri (1978)

Litología	Porosidad ($<8\%$)	Porosidad (8-16%)	Porosidad ($>16\%$)
Areniscas	40-70 Gpa	15-30 Gpa	10-30 Gpa
Calizas	60-85 Gpa	10-30 Gpa	30-40 Gpa
Shales	35-40 Gpa	10-15 Gpa	30-35 Gpa

La Tabla 3, muestra valores de relación de Poisson obtenidos en la ejecución de los mismos ensayos de laboratorio, en donde se muestra que para las areniscas con porosidad óptima, relativamente alta (8- 16%), presentan relaciones de Poisson más altas, representada en la curva verde de la Figura 4.

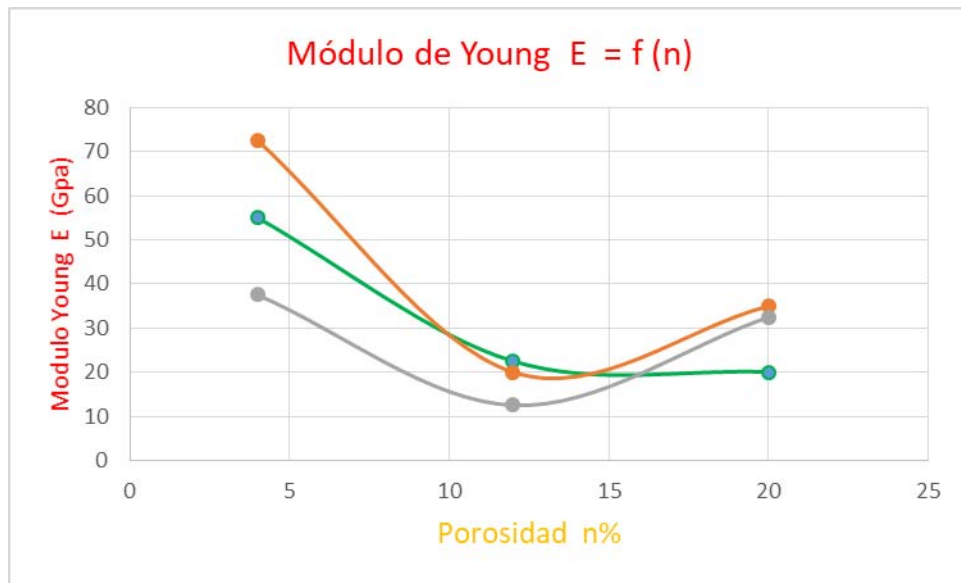


Figura 3. Gráfica con las diferentes tendencias de módulo de Young cada uno de los tipos de roca. La curva verde denota las Areniscas, las calizas la curva naranja y los shales la curva gris.

Tabla 3. Rangos de relación de Poisson obtenidos en pruebas de laboratorio. Adaptado de Lama y Vutukuri (1978)

Litología	Porosidad (<8%)	Porosidad (8-16%)	Porosidad (>16%)
Areniscas	0.1-0.15	0,25-3	0.15-0.20
Calizas	0.2-0.3	0.22-0.25	0.25-0.27
Shales	0.12-0.15	0.1-0.12	0.22-0.25

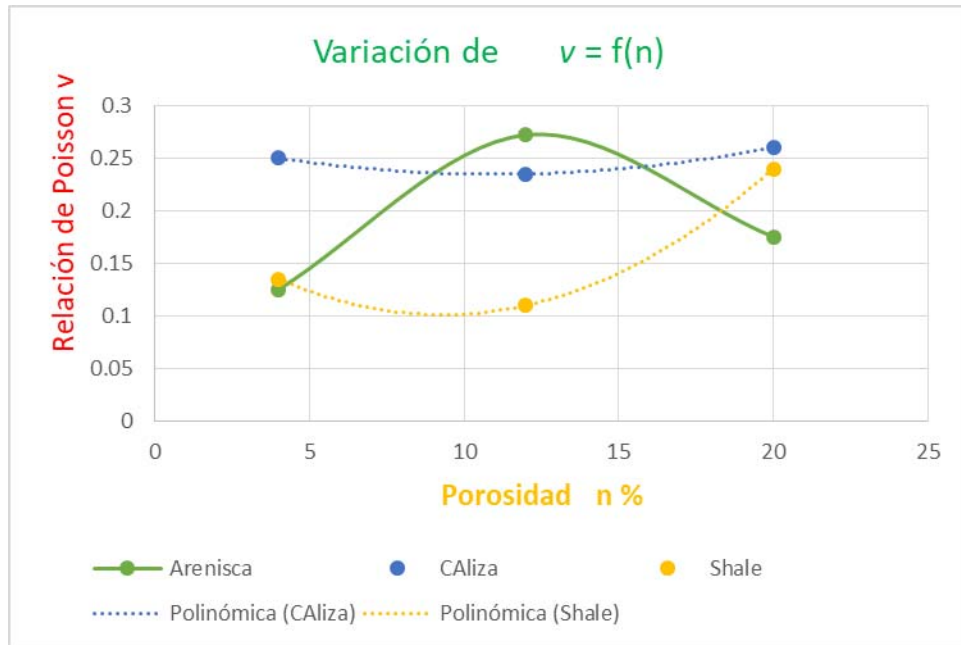


Figura 4. Gráfica con las diferentes tendencias de relación de Poisson de cada uno de los tipos de roca. La curva verde denota las Areniscas, las calizas la curva azul y los shales la curva amarilla.

3. Física de Roca Digital

Para la caracterización de un yacimiento se requiere de la extracción de núcleos de perforación para obtener información directamente de la roca que permita validar los modelos geológicos propuestos. Usualmente adquirirlos resulta costoso y se requiere de gran cantidad de muestras para realizar las mediciones, por tal motivo las compañías de petróleo y gas han apostado por el desarrollo de técnicas digitales como la física de roca digital que empiezan a tomar relevancia, con el objetivo de complementar la caracterización hecha en laboratorio.

La física de roca digital (DRP) por sus siglas en inglés, es una técnica no destructiva que incorpora imágenes de alta resolución de muestras de roca, obtenidas de núcleos o plugs de perforación o material atípico como ripios, mediante el uso de un escáner de tomografía

computarizada (CT), tomografía micro-computarizada (micro-CT) y microscopía electrónica de haz de rayos (FIB-SEM), con el objetivo de obtener un modelo tridimensional de la estructura compleja de la roca, proporcionando una comprensión más profunda de las geometrías de los poros y otras características tales como propiedades elásticas y eléctricas (James, 2015).

La física de roca digital (DRP) implica la obtención de imágenes que permitan visualizar el espacio poroso y la matriz mineral de la roca para luego simular numéricamente diversos procesos físicos en esta estructura digital, para obtener propiedades de las rocas a escala microscópica (Andra et al. 2013b), en este caso el estudio está enfocado en el cálculo de módulos elásticos.

Una de las principales ventajas de este enfoque computacional es la rapidez para obtener información a partir de las muestras de roca, ya que permite calcular propiedades elásticas y simular procesos a escala micrométrica rápidamente, sin la limitación actual de requerir un sinnúmero de muestras físicas o de tener que esperar por las mediciones hechas en los laboratorios. El análisis digital de física de rocas genera abundantes datos a partir de una muestra en diferentes campos (Knackstedt et al., 2009).

Existe un flujo de trabajo previo a la obtención de los módulos elásticos de la roca, pasos que comprenden la adquisición de imágenes, procesamiento de imágenes (reducción de ruido y segmentación); la configuración del experimento numérico (tamaño y las condiciones de los límites); para posteriormente simular los procesos físicos, lo que lleva a plantear la siguiente metodología dividida en 3 etapas, para la realización de este proyecto de grado, que se muestra en la Figura 5.

4) Metodología

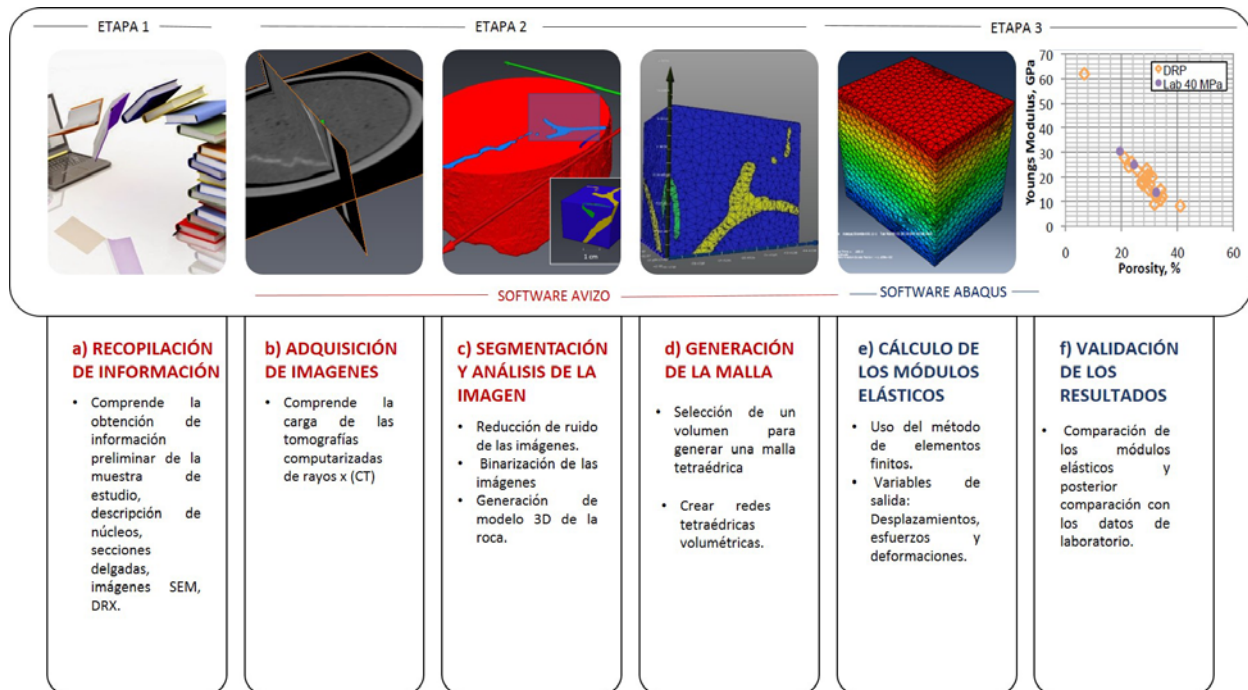


Figura 5. Flujo de trabajo DRP, **Etapa 1:** a) Recopilación de información. **Etapa 2:** b) Adquisición de imágenes c) segmentación y análisis de la imagen (definición de la fase porosa y la fase mineral c) Generación de la malla tetraédrica. **Etapa 3:** d) Simulación de los procesos físicos para el cálculo de los módulos elásticos e) Conclusiones después de comparar los resultados DRP con los ensayos de laboratorios.

4.1 Etapa 1: Recopilación de Información

Comprende la recopilación de información preliminar como estudios sedimentológicos en secciones delgadas, descripción de núcleos, imágenes SEM o DRX, con el fin de tener clara la caracterización mineralógica de la muestra, información que será de gran ayuda a la hora de realizar el proceso de segmentación.

4.2 Etapa 2: Adquisición, Segmentación y Generación de la Malla Tetraédrica

4.2.1 Adquisición de la imagen. El flujo de trabajo inicia con la carga de las imágenes de cortes en dos dimensiones de un núcleo de arenisca de grano fino, (muestra de estudio) obtenido previamente en el Instituto Colombiano del Petróleo (Figura 6) que presenta fracturas rellenas de un material de mayor densidad y fracturas abiertas (que se encuentra recubierto en su respectiva manga), obtenidas a partir de la tomografía computarizada (CT-scan) en formato .Dcom, por medio del software Avizo Fire 8.0.

Las imágenes fueron obtenidas a partir de un método moderno para adquirir diferentes imágenes de cortes o *slices* de una roca en cada una de las direcciones coordenadas (Figura 6a), por medio de la emisión de rayos-X desde diferentes ubicaciones y ángulos, fenómeno sustentado físicamente por el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, todo esto con el objetivo de obtener una reconstrucción de la muestra, de manera digital, en la que se puede apreciar su estructura interna. Las imágenes muestran contrastes gracias a la diferencia de coeficientes de atenuación, cuyos valores corresponden a la respuesta de cada constituyente de la roca luego de que los rayos X los atraviesan, la magnitud de la atenuación va a depender de la composición química (el número atómico efectivo) y la densidad física del material (Iassonov, et al., 2009).

El número atómico efectivo describe la interacción de un haz de fotones con materiales compuestos e implica la suposición que los átomos constituyentes de las moléculas del material pueden ser representados por un conjunto de átomos idénticos, cada uno con un número efectivo de electrones Z_{eff} (Custidiano y Valenzuela, 2013)

Por tanto, una imagen tomográfica es una representación gráfica de los diferentes coeficientes de atenuación, compuesta por pequeñas unidades con un único valor de atenuación que reciben el nombre de voxels, cuyo valor estará en unidades de número CT.

El tamaño de un vóxel determina la resolución del tomógrafo, es decir, cuanto más pequeñas sean las dimensiones de los voxels mayor será la resolución del equipo y por ende mayor será su capacidad para describir estructuras pequeñas de la roca (Ortiz, Plata, Otero y Santos, 2015). Para la muestra de estudio se cuenta con un píxel de 244.411 micras de lado y un grosor de *slice* de 330 micras.

Las imágenes aparecen en tonos de gris. El brillo de un vóxel se ve directamente afectado por el número atómico efectivo del material (su densidad). Por ejemplo, la pirita parece más brillante que la calcita, que es más brillante que el cuarzo, y este a su vez, es más brillante que la arcilla porosa (Dvorkin, Derzhi, Diaz y Fang, 2011). Posterior a la adquisición de las tomografías se tendrá una pila de imágenes que también pueden tener diferentes formatos, como BMP, TIF o PNG. Al cargarlas al software se convierten píxeles 2D de las imágenes, en píxeles 3D con el objetivo de generar una imagen de la roca en tres dimensiones, como se puede observar en la Figura 6a.

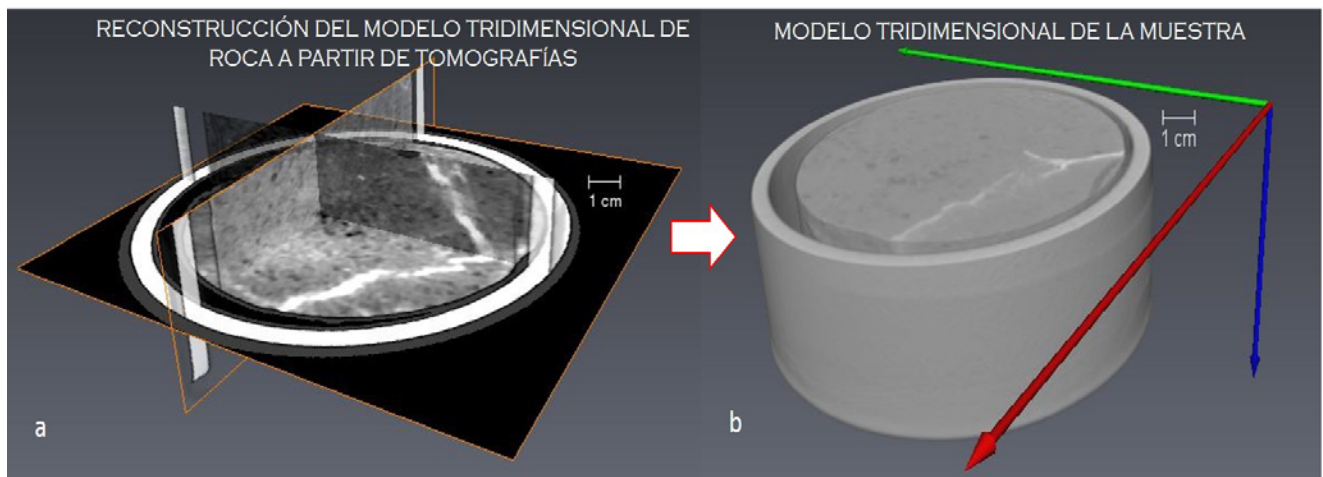


Figura 6. Generación del modelo tridimensional de la muestra **a)** Carga de las imágenes en escala de grises **b)** Apilamiento de las tomografías para generar el modelo tridimensional de la muestra. La escala del núcleo corresponde al tamaño real de la muestra.

En la Figura 6b, se pueden identificar dos valores de densidad predominantes, píxeles de mayor densidad (el color blanco) identificados visualmente como pertenecientes a una fractura rellena y píxeles de menor densidad que se identificaron como la matriz mineral. La variación en la escala de grises no suele ser un factor de discriminación exacto para la caracterización mineralógica de una muestra, sin embargo, puede dar nociones de aspectos clave como estructuras sedimentarias e identificación de fracturas. Donde el color en la escala de grises es el criterio principal y se puede llegar a distinguir entre una fractura rellena (color gris) y una abierta (color negro), debido a que es un espacio abierto. Por tal razón, es importante corroborar la interpretación hecha en la imagen de grises con información previamente obtenida del núcleo en mención en la etapa 1. Con esta observación preliminar se procede a realizar el proceso de segmentación.

4.2.2 Segmentación y Análisis De Imagen. En el siguiente paso se aplica una segmentación, segundo paso de la Etapa 2 en la metodología de trabajo, que se refiere a la identificación y etiquetado de las fases de poro y minerales dentro de la imagen en escala de grises (Andra, 2013a). Para este caso de estudio, por la resolución de la imagen tomográfica, no se puede identificar la fase porosa de la muestra, por tanto, se segmentó la imagen de acuerdo a la mineralogía y fracturas presentes.

Una segmentación asigna una etiqueta para cada píxel, la cual describe el material asociado. La segmentación es un prerrequisito para la generación de un modelo de superficie y es necesaria para hacer medidas de cálculo de volúmenes, de áreas y longitud.

Antes de realizar este proceso se debe establecer si es necesario realizar un procesamiento o acondicionamiento de la imagen con el objetivo de eliminar ruido generado en la adquisición de imágenes (tales como sombras concéntricas en la imagen tomográfica y para delinear poros y

minerales). Para la muestra que en análisis no se identificó ruido luego de comparar la imagen con los tipos de ruido más comunes expuestos a continuación:

4.2.2.1 Identificación De Ruido En Las Tomografías. Uno de los ruidos más comunes que se encuentran con más frecuencia en la tomografía computarizada es el endurecimiento del haz o *beam hardening* (Figura 7a), que se evidencia por la aparición de sombras concéntricas en la imagen tomográfica, donde los bordes del objeto se encuentran más brillantes que el centro, incluso si el material es el mismo (Ketcham y Carlson, 2001).

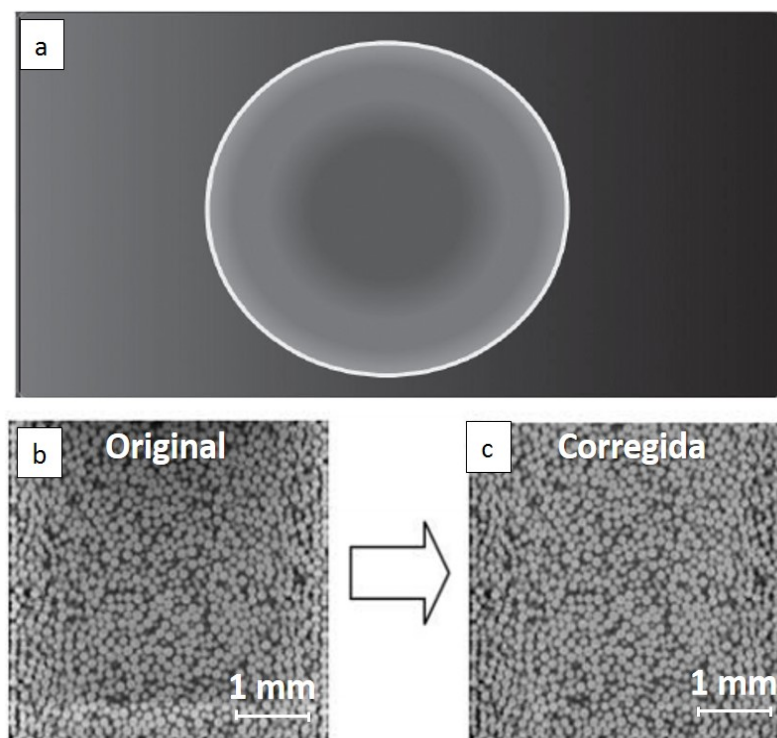


Figura 7. Tipo de ruido más común en tomografías **a)** Sombras concéntricas como indicador de ruido en la imagen tomográfica (beam hardening) **b)** Variación en la intensidad en la imagen hacia los bordes **c)** Corrección por la aplicación de un filtro mediano. Tomado y modificado de: (Iassonov et al., 2009) y (Ortiz et al., 2015)

Este fenómeno se da debido a que el cálculo del coeficiente de atenuación lineal es dependiente de la energía, usualmente la fuente de rayos X emite un haz policromático, compuesto por rayos X de baja y alta energía, los rayos X de baja energía se atenúan más fácilmente, el resultado final es un haz con una disminución en la intensidad global, pero con una energía promedio más alta que el haz incidente que se manifiesta con el oscurecimiento artificial en el centro y el brillo hacía los bordes (Ketcham y Carlson, 2001).

El material mostrado visualmente es en teoría homogéneo, por lo tanto, debería tener un mismo valor en el coeficiente de atenuación, es decir, una misma tonalidad de gris, pero como se puede apreciar existen una variación de tonalidades en la escala de grises, si se compara el centro y los bordes (Figura 7b), la corrección a esta distorsión de los coeficientes de atenuación, (Figura 7c) se realiza mediante la aplicación de un filtro mediano de imagen.

4.2.2.2 Procesamiento De La Imagen. Como se mencionaba anteriormente, el procesamiento de imagen hace referencia a un conjunto de técnicas que busca reducir el ruido de la imagen, y mejorar las características de interés antes de la segmentación, para ello se usan filtros de imagen.

Existe una serie de filtros de imagen los más comunes son: suavizado, nitidez y de detección de bordes. Thermo Fisher Scientific (2017) expone las características de estos filtros:

- **Suavizado:** Reduce la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos y elimina aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos.
- **Nitidez:** Destaca los bordes que se localizan en una imagen.

- **Detección de bordes:** detecta los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

Como se mencionó anteriormente, no se identifica algún tipo de ruido en la muestra de estudio, sin embargo, se usó un filtro mediano (*median filter*) que hace referencia a un filtro de suavizado básico que a su vez preserva los bordes y es ideal para corregir la dispersión de la imagen. Este filtro permite hacer un control de calidad de la información, forzando a los puntos con valores de intensidad muy distintos a sus vecinos a tener valores más próximos (González y Wintz, 1995) y dispersar los valores por pixel, de forma que correspondan al valor promedio de valores por pixel aledaños.

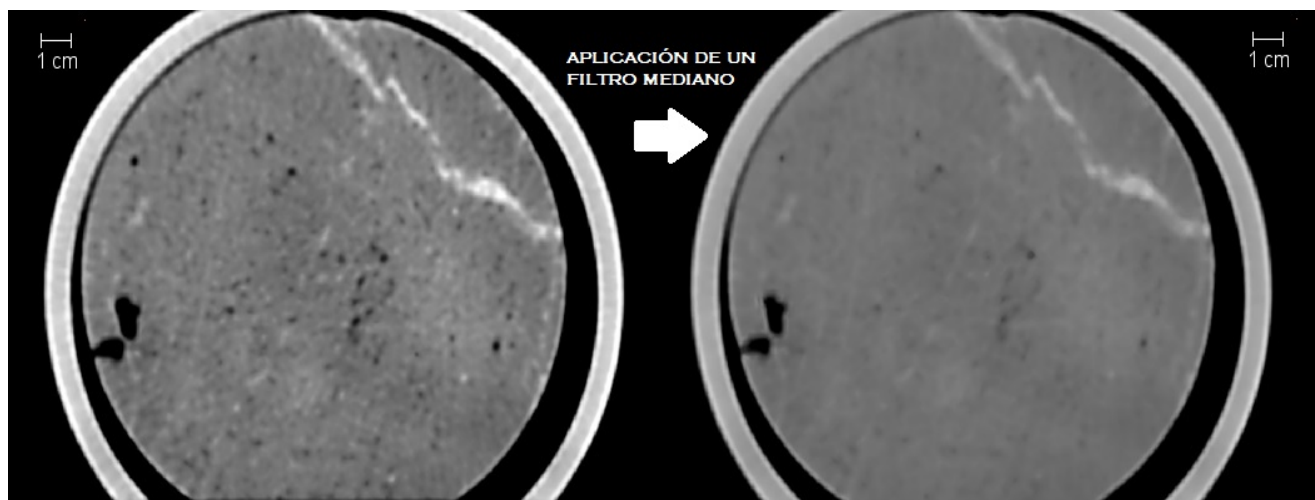


Figura 8. Aplicación de un filtro mediano **a)** Visualización de densidades altas en la muestra que no se pueden caracterizar por la resolución de la muestra (puntos negros) **b)** Imagen luego de la aplicación de un filtro de suavizado (filtro mediano).

Para la roca objeto de estudio se muestra la imagen en bruto o sin procesamiento (Figura 8a), y la final luego de aplicar un filtro mediano (Figura 8b) que suaviza píxeles con coeficientes de atenuación altos que representan constituyentes de la roca de alta densidad (puntos negros), ya

que por la resolución de la imagen estas señales no pueden caracterizarse por lo que se asume una matriz homogénea, por facilidad de interpretación (Figura 8b).

4.2.2.3 Binarización. La binarización significa transformar una imagen en escala de grises en una imagen binaria (una imagen binaria es una imagen digital que tiene únicamente dos valores posibles para cada voxel) (Thermo Fisher Scientific,2017)

La binarización puede ser un proceso automático, semi-automático o manual que se lleva a cabo en el editor de segmentación que presenta el Software Avizo. El software presenta una serie de módulos para llevarla a cabo, entre ellos:

- Auto Thresholding (Umbral automático)
- Interactive Top-Hat (Sombrero de copa interactivo)
- Hysteresis Thresholding (Umbral de histéresis)

La aplicación de cada uno de ellos, depende del tipo de muestra y se debe buscar cual se ajusta y distingue los materiales correctamente.

El proceso de binarización basado en técnicas de umbral global que consisten en el análisis del histograma de la intensidad de nivel de gris determinada de los voxels de la imagen (en unidades son el número CT) (Iassonov, et al., 2009) consta de la definición de un solo valor –umbral, que represente cada tendencia de escala de grises para separar las regiones de interés. Uno de los métodos para el análisis del histograma, Zack, Rogers y Latp, (1977) utiliza el análisis geométrico de la forma del histograma a partir de una triangulación, que consiste en generar un triángulo rectángulo, cuyos vértices serán valores de los pixeles normalizados de la escala de

grises, el vértice que tiene el ángulo de 90 corresponderá al umbral. También usan consideraciones de pico, valle y curvatura máxima para determinar el valor de umbral óptimo.

Un pico del histograma muestra un valor de frecuencia alto y un valle simboliza un valor de frecuencia bajo, por eso, para el caso de estudio, se va a tener que la definición del umbral segmentará la imagen en una fase mineral y en una fase de fracturas. Como la fractura en el caso de estudio está rellena, la mayoría de los vóxels poseen valores de número CT de fase mineral roca.

Para la muestra de trabajo (Figura 9a) se partió de la imagen en escala de grises y se aplicaron procesos de binarización automáticos y manuales. Inicialmente se aplicó el *auto thresholding*, que es la herramienta más común, donde se definió el umbral buscando la curvatura máxima que se da entre un pico y un valle en el histograma replicando lo sugerido por Iassonov et al., (2009) en la Figura 9b.

Posteriormente, se aplica un módulo de segmentación manual, que permitió digitalmente remover la manga del núcleo de perforación y hacer un seguimiento de la fractura en los diferentes cortes o *slices* de la roca, donde se puede decidir a criterio del intérprete que valores de número CT corresponderán a diferentes minerales presentes, el resultado de ello es una imagen binaria (Figura 9c) con una fase mineral homogénea definida como cuarzo y una fractura rellena caracterizada como calcita, establecidas por la variación en la escala de grises, donde el material más brillante se definió como calcita y el menos brillante como cuarzo y a su vez validada por información sedimentológica preexistente para el núcleo de estudio. De esta manera, se va a tener el volumen de la roca en tres dimensiones segmentado (Figura 9d).

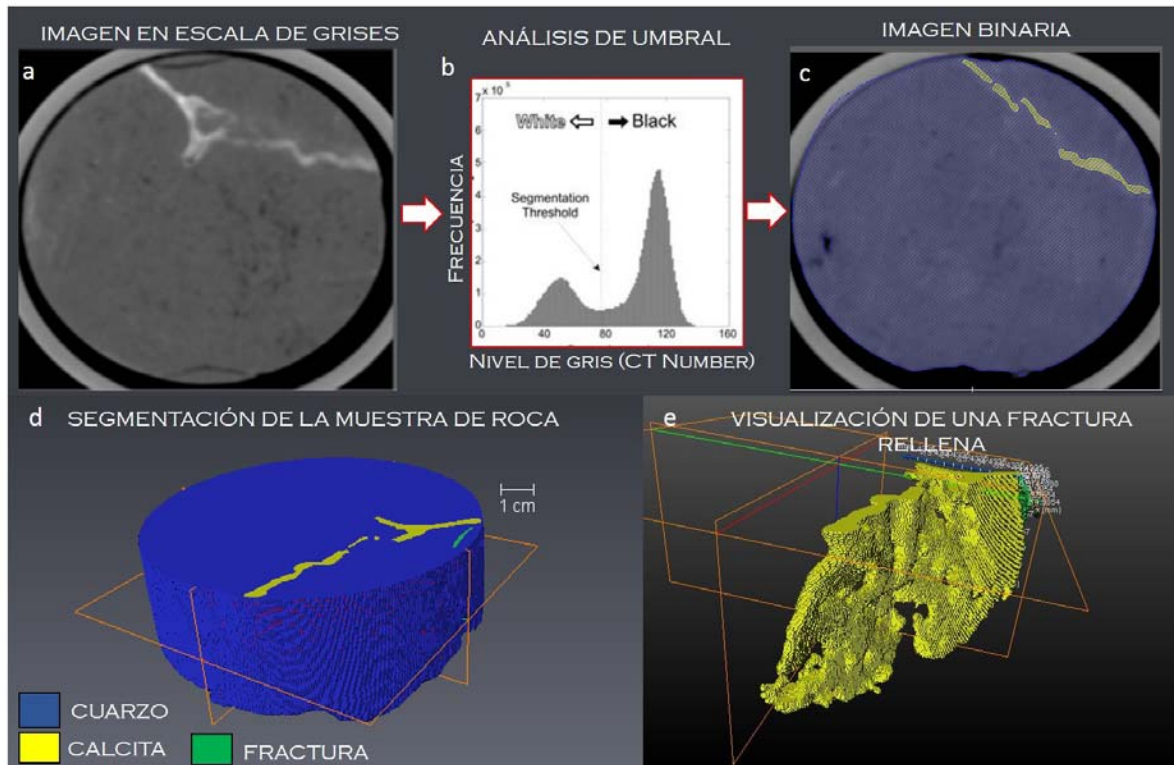


Figura 9. Análisis de imagen y Segmentación **a)** Imagen en escala de grises **b)** Binarización a partir de análisis de umbral **c)** Imagen binaria **d)** Visualización de la Segmentación **e)** Visualización de una fractura rellena

4.2.2.4 Análisis de Fracturas. El software Avizo Fire 8.0 presenta un módulo de análisis cuantitativo para obtener el volumen, el área de superficie, el diámetro de las partículas, el número de vóxeles, el valor medio que hace referencia al tamaño de grano promedio etc., de forma individual para cada material. Un análisis estadístico y numérico se lleva a cabo utilizando el módulo de análisis de etiquetas (*label Analysis*).

Con esta herramienta se ha calculado la longitud, ancho, volumen, área, porosidad de fractura de la fractura rellena que se identificó (Figura 7e) y los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4. Caracterización de la fractura rellena obtenida por análisis cuantitativo

CARACTERIZACIÓN	MEDICIÓN
PROFUNDIDAD DEL NÚCLEO	3230-3323 FT
NOMBRE DE LA FRACTURA	Fractura R
TIPO DE FRACTURA	Natural
No. DE FRACTURAS	1
No. DE FRACTURAS NATURALES	1
TIPO DE ESFUERZO	ND
APERTURA Y RELLENO	RELLENA
LONGITUD	47.55 (mm)
ANCHO	31,9 (mm)
VOLUMEN	2030.46 (mm)
AREA	1970.3 (mm)
POROSIDAD DE FRACTURA	0,136

4.2.2.5 Generación de la Malla Tetraédrica. Para llevar a cabo una simulación avanzada es necesario crear una malla tetraédrica volumétrica, que interconecte los voxels definidos luego de la segmentación hecha de las imágenes de la muestra de roca y permita generar una vista 3D del objeto que pueda usarse para simulaciones numéricas (Thermo Fisher, 2017)

Para ello se debe llevar a cabo los siguientes pasos:

- Selección de subvolúmenes
- Generación de superficie triangular
- Simplificación de la superficie triangular
- Reparación de los triángulos de forma manual

- Re-enmallado, generación de la malla tetraédrica y exportación de la malla.

4.2.2.6 Selección de Subvolúmenes. Para reducir los costos computacionales es necesario llevar a cabo el proceso de generación de la malla tetraédrica en subvolúmenes de la muestra original (Figura 10). Este subvolumen tiene unas dimensiones de 28x30x25 (mm). Cabe resaltar que las escalas mostradas en la imagen corresponden a la escala real de la muestra.

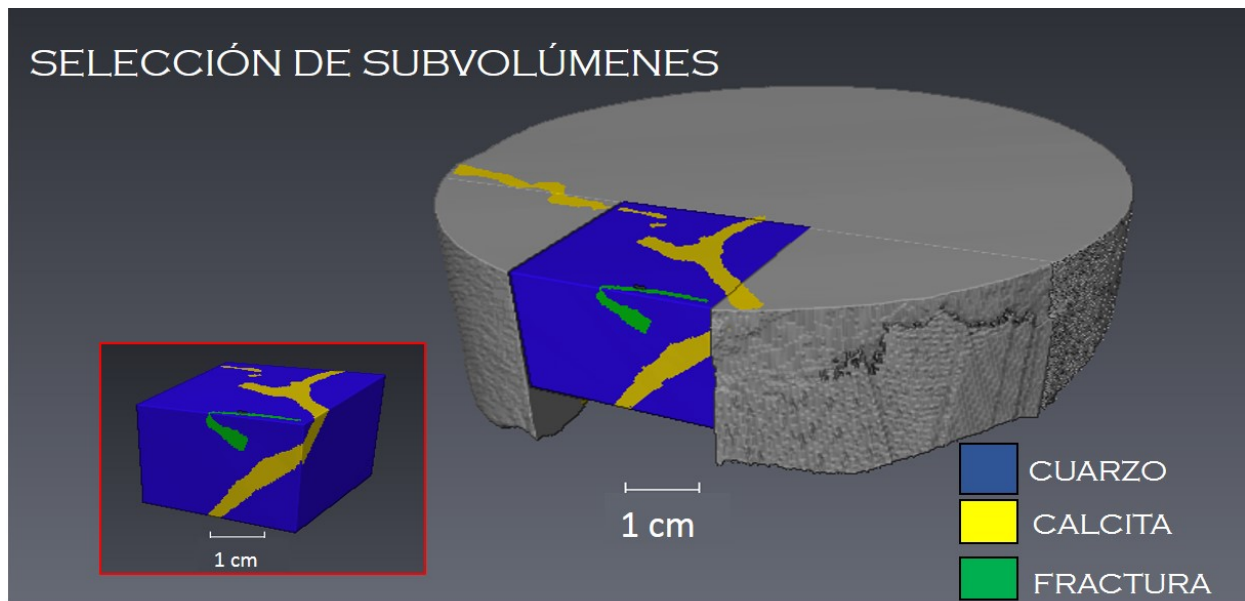


Figura 10. Selección de subvolumen representativo de la muestra original para la realización de la malla tetraédrica

4.2.2.7 Generación de una Superficie Triangular. El módulo “*Generate Surface*” en Avizo crea una superficie 3D que muestra los límites de cada material o fase. La superficie consiste en una malla triangular (Figura 11a). Thermo Fisher (2017) plantea que la cara de un triángulo sería idealmente el 1% de la dimensión del volumen cúbico de la roca, a partir de esto generó una malla con 18.000 caras. La malla triangular generada por este módulo, es una malla que no tiene

un control de calidad, es decir contiene un gran número de triángulos heterogéneos, por tal razón no se recomienda que sea el archivo a exportar al software Abaqus.

4.2.2.8 Simplificación de la Superficie Triangular. Para fines de simulación, la simplificación de la superficie es ideal ya que se necesita una reducción del número de triángulos, es decir, un archivo de exportación más liviano, además de la generación de triángulos más homogéneos. El proceso de simplificación genera triángulos grandes en áreas planas y pequeños en áreas de curvatura, conservando los detalles.

A la hora de realizar la simplificación el número de triángulos se reducirá a la mitad, es decir se crean 9000 caras (Figura 11b). Usualmente luego de la simplificación de la superficie, los triángulos presentan una serie de errores comunes, entre ellos se encuentran que los triángulos no estén cerrados totalmente, se corten entre sí, estén desorientados, contengan ángulos abruptos, con una mala relación de aspecto. El módulo “*Generate Tetra Grid*” es un módulo útil ya que permite saber a través de la opción “*check*” cual de esos aspectos de la malla se deben mejorar antes de generar la malla final.

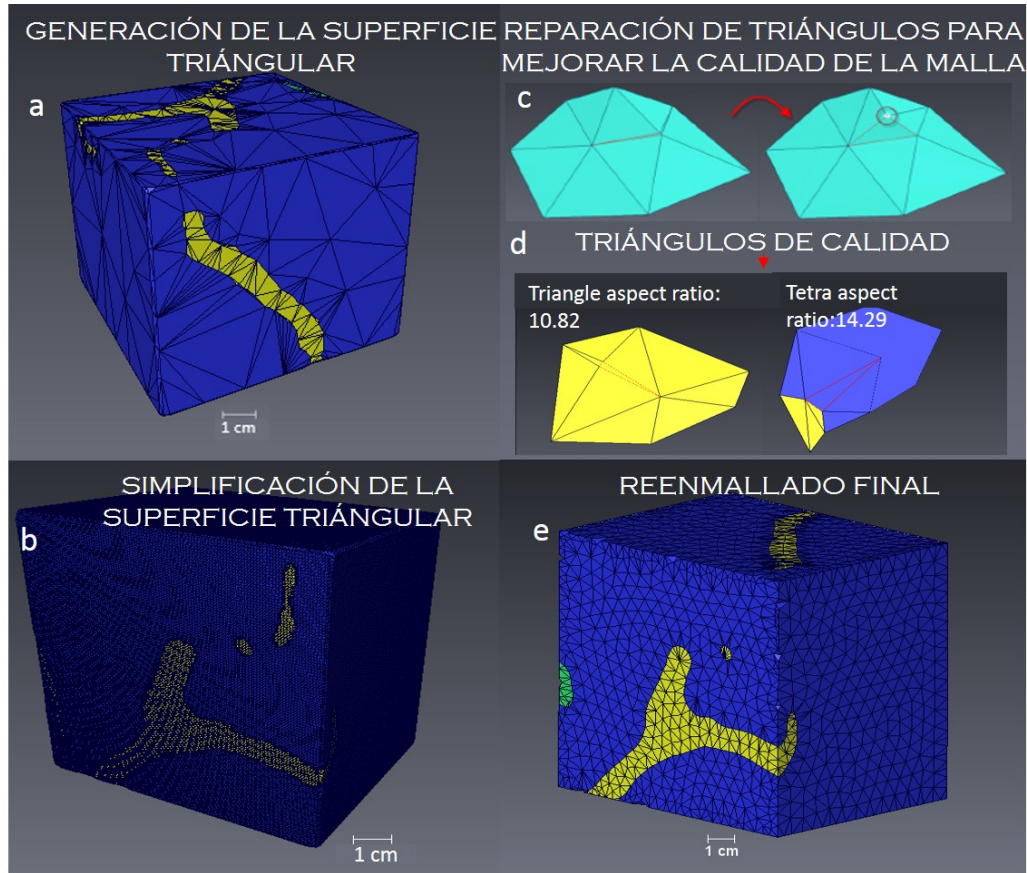


Figura 11. Generación de la malla tetraédrica **a)** Generación de la superficie triangular **b)** Simplificación de la superficie triangular **c)** Relación de aspecto de los triángulos. Un triángulo con mala relación de aspecto está resaltado **d)** Triángulos reparados bajo los parámetros de calidad **e)** Reenmallado

El software Avizo presenta unos módulos que permiten arreglar algunos de los problemas más frecuentes en las características de los triángulos de forma automática, basados en los parámetros que se deben tener en cuenta para tener una malla de calidad (tabla 5) como la relación de aspecto de un triángulo, que hace referencia a la relación entre su ancho y altura cuyo valor debe estar por debajo de 10, el ángulo diedro que es el ángulo formado entre dos planos que comparten una arista común cuyo valor debe ser superior a 10 grados, o la relación de aspecto del tetraedro cuyo valor debe estar por debajo de 25.

Tabla 5. Parámetros de Calidad de acuerdo a las características de los triángulos que componen la malla

CARACTERÍSTICAS DE LOS TRIÁNGULOS	PARÁMETROS DE CALIDAD
Intersección de los triángulos	Cero intersecciones
Triángulos cerrados	Triángulos totalmente cerrados
Relación de Aspecto	La relación de aspecto más grande debe estar por debajo de 10.
Triángulos desorientados	Relación por debajo de 10.
Ángulo Diedro	El ángulo diedro más pequeño debe ser mayor que 10 grados.
Calidad del tetraedro	La relación de aspecto tetraédrica más grande debe estar por debajo de 25.

En algunos casos no es suficiente el uso de esta herramienta automática para corregir la calidad de la malla, ya que la superficie seguirá mostrando que las características de los triángulos descritas en la tabla 5 están fuera del rango de los parámetros de calidad, en ese caso se debe interactuar manualmente con la superficie para corregirla.

4.2.2.9 Reparación de los Triángulos de Forma Manual. Afortunadamente, se cuenta con herramientas que permiten cambiar el vértice de los triángulos y a su vez reubicarlos, con el objetivo de que la relación de aspecto y el ángulo diedro cumplan con los valores establecidos como parámetros de calidad, así como se ilustra en la Figura 11c en la que se cambió el vértice del arreglo de triángulos, de forma que los triángulos tengan aproximadamente el mismo tamaño haciendo la malla homogénea. La figura 11d muestra los triángulos luego de esa corrección manual, lista para que posteriormente se haga un reenmallado.

4.2.2.10 Reenmallado, Generación de la Malla Tetraédrica y Exportación de la Malla.

Se debe realizar un reenmallado de la malla corregida (Figura 11e), debido a que la superficie cuenta con dos fases con una distribución compleja, cuyos bordes deben ajustarse con el parámetro de suavizado, con el objetivo de mantener los ángulos entre los triángulos dentro de un valor acorde con los parámetros de calidad. Posteriormente se genera la malla tetraédrica con el módulo “*Generate Tetragrid*” cuyo archivo debe exportarse en formato .inp compatible con el software Abaqus.

4.3 Etapa 3: Cálculo de Módulos Elásticos y Validación de Resultados

4.3.1 Cálculo De Esfuerzos Y Deformaciones.

4.3.1.1 Simulación De Procesos Físicos. La simulación de procesos físicos se realiza en la imagen segmentada usando los métodos de elementos finitos y dinámica de fluidos computacionales. El objetivo es el de predecir la respuesta de la muestra a estímulos físicos, por ejemplo, un gradiente piezométrico (James 2015). En el caso de estudio de este trabajo, para estimar los módulos elásticos, se usó el programa de simulación Abaqus que permite aplicar el método de elementos finitos (FEM), el cual es un método numérico usado para dar solución a ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico (Bathe, 1995).

El método de elementos finitos (FEM) es un método que consiste, en este caso, en dividir un sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de nodos, con el objetivo de dar una solución numérica a una serie de ecuaciones diferenciales interconectadas, que representan el comportamiento del sólido, luego de estar sometido a un sistema de cargas, por

medio de un proceso de discretización, que busca convertir el sistema de ecuaciones diferencial que rigen el proceso de interés, en expresiones algebraicas que conectan valores en nodos de una red finita.

Este sistema de cargas genera un campo de desplazamientos en los nodos que componen cada elemento, una vez conocidos dichos desplazamientos, es posible determinar, de una forma aproximada, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento (Pérez, 2014.)

4.3.1.2 Elementos Finitos por Elasticidad Estática. Para la resolución del problema se establece un método de elementos finitos basado en la elasticidad estática lineal que es usado para calcular numéricamente propiedades elásticas en imágenes bidimensionales y tridimensionales (Garboczi, 1998). Los cálculos numéricos consideran cada voxel como un elemento trilineal, de modo que toda la red digital puede ser tratada como una malla de elementos finitos (Garboczi, 1998) en la que el desplazamiento elástico obtenido, se extrapola linealmente en cada nodo a partir de un promedio de esfuerzo.

Cabe resaltar que se supone un régimen elástico lineal, es decir, se asume que los materiales sufren deformaciones que son reversibles, después de ser sometidas a la acción de fuerzas externas, este modelo matemático se encuentra incluido en la librería del software Abaqus.

La ley de Hooke para materiales sólidos, está sustentada por una relación entre los esfuerzos internos en el material representada por un tensor de esfuerzos y por un tensor de deformaciones, como se muestra en la expresión (9) :

(9)

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

Donde σ_{ij} , ϵ_{ij} , E son los componentes cartesianos del tensor de esfuerzos, coeficiente elástico, tensor de deformación, respectivamente. En el caso de una carga axial, como la usada en este proyecto, se incide un esfuerzo sobre la cara superior del volumen de roca, la definición de la Ley de Hooke se da de la forma, $\sigma_{yy} = \sigma$, $\epsilon_{yy} = \epsilon$, $C_{yy} = E$, que representa las variables que describen el módulo de Young.

4.3.1.3 Definición De Un Modelo En Abaqus. Para la generación de un modelo en Abaqus se debe seguir una serie de pasos propuestos en su manual de usuario (Simulia, 2011), donde se parte de un archivo de entrada en formato.inp obtenido del flujo de trabajo hecho en el software Avizo, que es un archivo de texto constituido por una serie de líneas de datos que contiene la información de la geometría del modelo tridimensional de la roca (Apéndice A)

4.3.1.3.1 Módulo Part. El módulo Part hace referencia a la creación de una representación geométrica del modelo que será objeto de análisis denominada *Parte*, esta a su vez contiene un conjunto de características de las piezas que conforman el modelo. En este caso, la geometría del modelo corresponde a la estructura de triángulos que representa la muestra roca, generada anteriormente en el software Avizo, software que permite la creación de geometrías complejas. El software Avizo exporta una sola pieza o “*parte*” que se muestra en la Figura 12a, definida por defecto, como un modelo tridimensional (3D) de una pieza deformable.

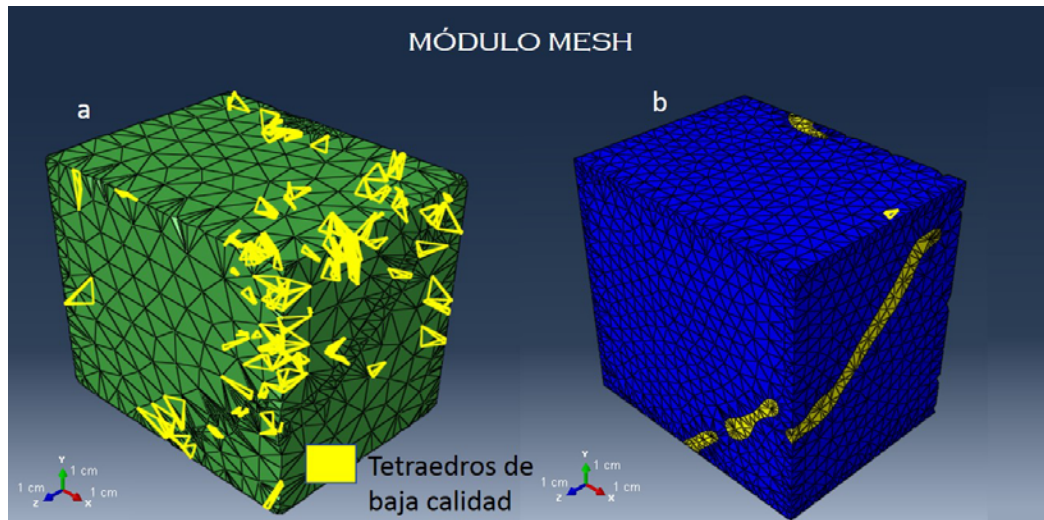


Figura 12. Verificación de la calidad de la malla en Software Abaqus **a)** Malla de baja de calidad importada desde el software Avizo **b)** Malla de calidad bajo los parámetros de calidad establecidos por Abaqus.

Esta “*Parte*” contiene información geométrica de los dos minerales (cuarzo y calcita) que componen la muestra de roca, definidas anteriormente en el proceso de segmentación, por esta razón se le pueden asignar propiedades mecánicas y de densidad a cada mineral para distinguirlos en el modelo.

4.3.1.3.2 Módulo Mesh. Esta “*Part o Parte*” como se mencionó anteriormente, que representa la estructura de la roca, debe ser sometida a una revisión del estado de calidad de los tetraedros, ya que, si estos tetraedros presentan una baja calidad, el software Abaqus no permite realizar una simulación. Aunque anteriormente en el software Avizo ya se había hecho un control de calidad, los parámetros de calidad para el software Abaqus varían, disminuyendo los rangos aceptados,

por lo que debe confirmarse que los parámetros establecidos en la tabla 5 son cumplidos rigurosamente antes de exportar la malla.

Para ello, se busca en la barra de tareas la opción: *Mesh-Verify* que resalta los triángulos de baja calidad en color amarillo. La figura 12a presenta 166 advertencias de tetraedros de baja calidad, esto se debe a que, en este caso, no se respetaron rigurosamente los parámetros de calidad establecidos en la tabla 5.

La figura 12b ya muestra una malla de buena calidad que se rige a los parámetros de calidad, en este caso de las 166 advertencias mostradas anteriormente, sólo un triángulo presenta una advertencia de baja calidad. Este no es relevante a la hora de realizar la simulación.

4.3.1.3.3 Módulo Property. Módulo que consiste en la asignación de propiedades mecánicas a los minerales que componen la muestra de roca para distinguir uno del otro. Para abordar el módulo *Property*, según el manual de usuario de Abaqus (Simulia, 2011), se deben tener en cuenta tres pasos:

- Creación del material
- Creación de una sección
- Asignación de las propiedades a esa sección.

Para el caso de estudio, se crearon dos tipos de materiales, correspondientes con los minerales que componen la muestra (cuarzo, calcita). Posterior a ello se debe crear una sección para cada mineral. Una sección es una región que contiene la información acerca de las propiedades físicas

del material, en ella se define un comportamiento mecánico-elástico ya que el problema a resolver responde a la Ley de Hooke asumiendo que el material es homogéneo e isotrópico. Luego a cada sección, se le asignan las propiedades mecánicas individualmente, entre las que se incluyen el módulo de Young y el módulo de Poisson para cada mineral como se observa en la Figura 13a y Figura 13b respectivamente, valores establecidos a partir de valores teóricos mencionados por Sánchez, M., et al., (2015). Como el software utiliza el sistema internacional de unidades (SI), el módulo de Young se ingresa en pascales.

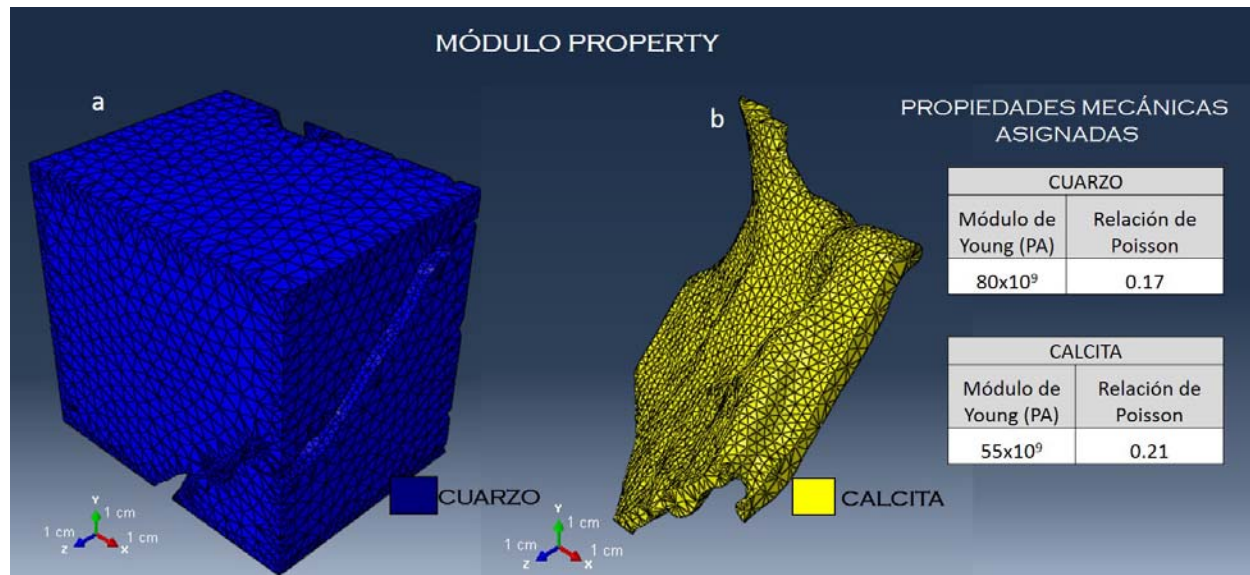


Figura 13. Creación de dos secciones **a)** Asignación de propiedades mecánicas a la sección correspondiente al cuarzo **b)** Asignación de propiedades mecánicas a la sección correspondiente a la calcita

Adicionalmente a ello, con el objetivo de caracterizar de mejor forma los minerales en la muestra, es posible asignar valores de densidad, para el valor de la calcita se asignó el valor de 2700 kg/m^3 y para el cuarzo de 2650 kg/m^3 .

4.3.1.3.4 Módulo Step. El módulo *Step* presenta la posibilidad de realizar ciertas tareas, una de ellas es configurar el tipo de análisis que se quiere llevar a cabo en el modelo y además especificar las variables de salida que se requieren. Pueden existir varios pasos de análisis, cada paso o *step* del análisis está asociado con un procedimiento específico, como, por ejemplo, un análisis de estrés estático o un análisis de transferencia de calor transitorio (Simulia, 2011).

Para el caso de estudio, el análisis consiste en 2 pasos o *steps*: Un primer paso, creado automáticamente por Abaqus, que no es editable, que muestra un estado inicial del modelo y un segundo paso que implementa un análisis estático general, con el objetivo de posteriormente, aplicar una carga de presión en la cara superior de la muestra digital de roca, en el módulo *Load*. Debido a que se seleccionó un análisis estático, el tiempo de simulación no tiene relevancia ya que las variables de estudio son independientes del tiempo. También ignora el efecto de los materiales dependientes del tiempo tales como fluencia, hinchazón, viscoelasticidad (Simulia, 2011).

El software Abaqus permite seleccionar las variables de salida que se requieren, cabe resaltar que no ofrece la posibilidad de obtener los módulos elásticos del modelo de forma directa, en cambio, a partir del *step* de análisis estático, se pueden obtener valores de esfuerzo, deformación y de desplazamientos nodales, valores que están definidos las ecuaciones constitutivas de los módulos elásticos y que se hallaron usando el módulo *Field Output Request Manager* que permite obtener resultados para cada punto del modelo tridimensional de roca.

4.3.1.3.5 Módulo Load. En el módulo *Load* se definen las cargas externas a las que se va a someter el modelo para aplicar determinado *step* de análisis. En este módulo se deben abordar dos pasos: el primer paso corresponde a la creación de la carga. En este caso, se asigna la carga de categoría mecánica, tipo presión, aplicada en dirección perpendicular a la cara superior del modelo tridimensional de roca como se muestra en la Figura 14.

En el paso número dos se deben asignar las condiciones de contorno, que serán variables conocidas que condicionan el campo de desplazamientos del sistema. De acuerdo al problema que se requiere solucionar, se añaden o se restringen los grados de libertad, los cuales hacen referencia a los desplazamientos nodales que puede tener un modelo. Las condiciones de contorno que se asignaron, buscando simular un ensayo uniaxial, son las siguientes:

- Condición de Encastre, o empotramiento en un punto central de la cara superior del volumen de roca (Figura 14) con el objetivo de fijar el modelo en el espacio y de restringir su desplazamiento y evitar rotaciones en los ejes coordenados (X, Y, Z). Con esta configuración se restan 6 grados de libertad, garantizando que el volumen de roca sólo tendrá un movimiento axial en una dirección.
- Condición de Restricción, configurada en la cara inferior del volumen de roca tridimensional, con el objetivo de simular la base del ensayo de laboratorio que es totalmente inmóvil.

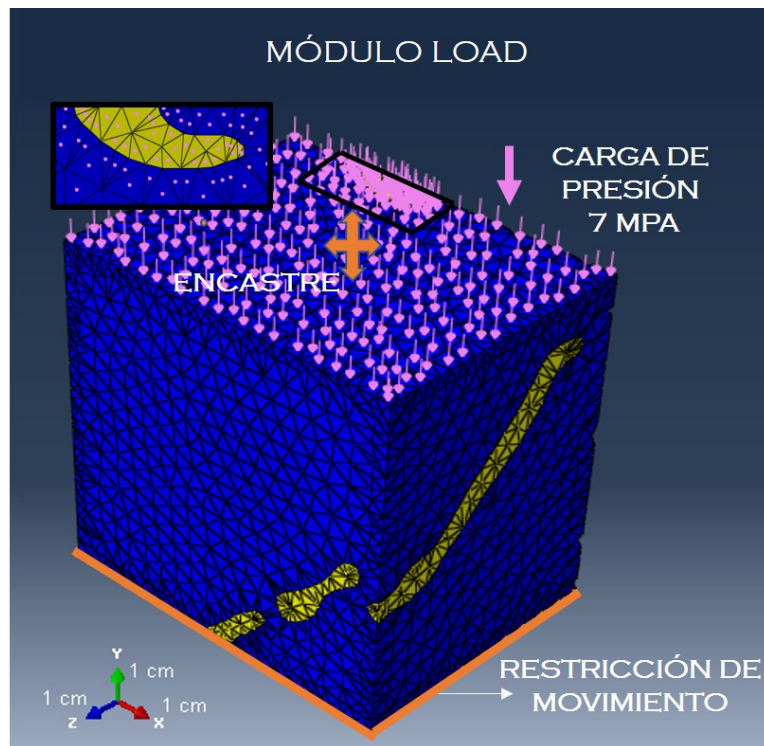


Figura 14. Definición de una carga de presión perpendicular a la cara superior del subvolumen y las condiciones de contorno: Condición de encastrado y de restricción de desplazamiento en la cara inferior

4.3.1.3.6 Módulo Visualization. Luego de definir los parámetros hasta aquí descritos, se procede a hacer la simulación. El módulo de visualización permite observar los resultados obtenidos (Figura 15a). En el caso de estudio, se observa una distribución del esfuerzo en Pascales, cuya variación está determinada por la mineralogía principalmente, donde para la fractura rellena se tendrán valores más bajos (1.023×10^5 [Pa]), que los valores para el cuarzo de 9.367×10^5 [Pa], debido a que el módulo de Young y la relación de Poisson de la calcita son más pequeños que los del cuarzo, esto en términos de deformación. El desplazamiento que se observa en la muestra es uniforme, (Figura 15b), siendo máximo en la cara superior del modelo, cara a partir de la cual se atenúa uniformemente hasta obtener un desplazamiento nulo en la cara inferior.

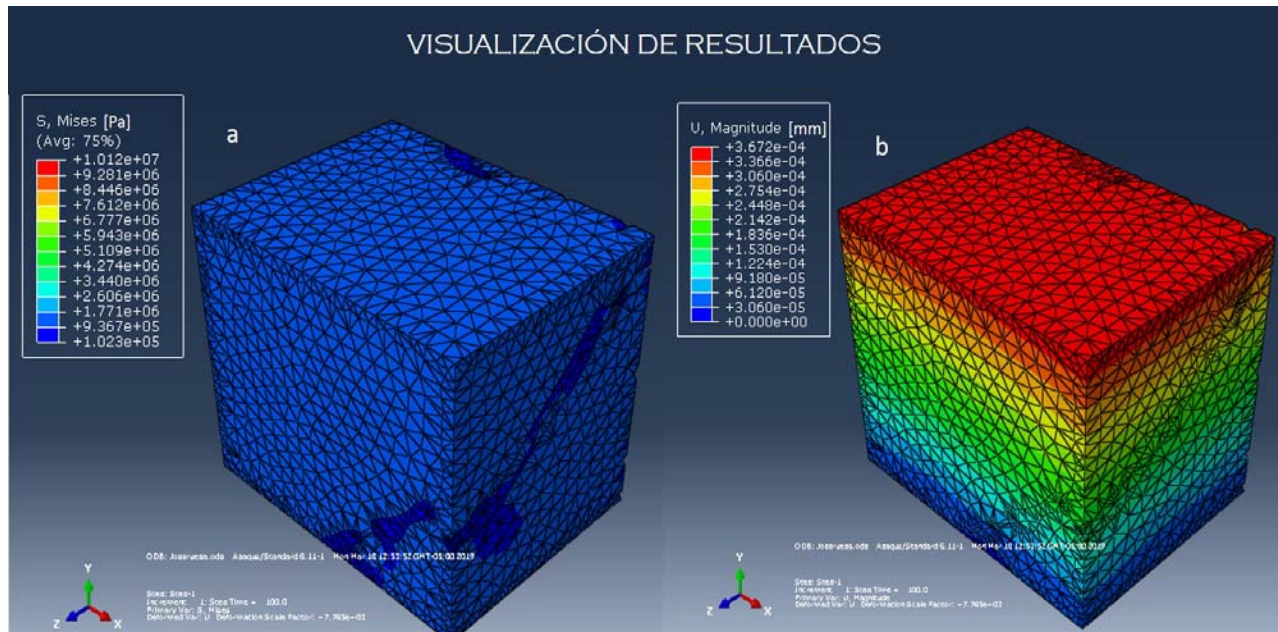


Figura 15. Visualización de Resultados después de la simulación a) Visualización la distribución de esfuerzos (s) en la muestra 3D b) Visualización del desplazamiento luego de aplicar una carga de presión.

4.4.2 Cálculo de los Módulos Elásticos

4.4.2.1 Cálculo del Módulo de Young. Como se mencionó anteriormente, en este caso se asume cada sección constituyente de la muestra de roca como un material isótropo, lineal y elástico, es decir, que sus propiedades no variarán de acuerdo a la dirección que se estudie (Peinado, 2015).

Los módulos elásticos se obtienen en el software Abaqus a partir del cálculo de los desplazamientos y esfuerzos resultantes luego de la aplicación de la carga axial en los nodos de la cara superior, y su posterior extrapolación lineal en todos los voxeles del subvolumen de estudio. Con estos valores, a partir de nuestros supuestos, se puede obtener el esfuerzo (σ_y) y la

deformación (ϵ_y) promedio en cada nodo, y de la estructura rocosa modelada a partir del promedio de valores para los nodos de la malla. Los módulos elásticos resultan entonces del uso de ecuaciones que permiten calcular las propiedades elásticas efectivas del material de estudio, como la ecuación (10), en la que los corchetes angulares significan un promedio de todos los nodos del esfuerzo y deformación para calcular el módulo de Young (Shulakova et al. 2011).

$$(10) \quad E = \frac{\langle \sigma_y \rangle}{\langle \epsilon_y \rangle}$$

4.4.2.2 Cálculo de la Relación de Poisson. Como se había mencionado anteriormente, la relación de Poisson, es una relación entre la deformación transversal (ϵ_x) y la deformación longitudinal (ϵ_y). La deformación longitudinal (ϵ_y), es un valor que ya es conocido debido que se obtuvo en el cálculo del módulo de Young.

La deformación transversal estará determinada por la diferencia entre el desplazamiento horizontal de los nodos de la cara lateral izquierda (U_{xi}) y el desplazamiento horizontal de los nodos que componen la cara lateral derecha (U_{xd}), sobre la arista (L) del modelo tridimensional de roca, como se muestra en la ecuación (11), donde los corchetes hacen referencia al promedio de los nodos (Peinado, 2015).

$$(11) \quad \epsilon_x = \frac{\langle U_{xi} \rangle - \langle U_{xd} \rangle}{L}$$

Finalmente, reemplazando el ϵ_x en la ecuación (11) descrita en la sección 2.2.2 se puede hallar la relación de Poisson.

4.3.3 Validación de los Resultados. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la tabla 6 y de forma más detallada en Apéndice B, donde se muestra una comparación entre los módulos elásticos obtenidos por la técnica de física de roca digital y módulos elásticos para el cuarzo y ensayos de laboratorio realizados en muestras de arenisca por Lama y Vutukuri (1978) y citados en Zoback (2007).

Para realizar una comparación acertada, se buscan datos de laboratorio de arenisca con porosidad similar a la de la muestra de estudio, ya que la porosidad es uno de los factores más influyentes en el cálculo de módulos elásticos.

Como la muestra de trabajo denominada muestra 1, corresponde a una arenisca de grano fino con porosidad asumida del 0% (debido a que la resolución de las imágenes usadas no era suficiente para definir la fase porosa de la muestra), se escogió como análogo el valor teórico del módulo de Young y relación de Poisson del cuarzo, (ya que es el cuarzo el mineral predominante en la muestra de estudio). Imágenes de microtomografía permitirían realizar la caracterización de la fase porosa, ya que poseen una resolución mayor (aproximadamente 5 micras). En este caso se contaba con muestras de tomografía computarizada.

Para evaluar el efecto de la variación de la porosidad en el cálculo de los módulos elásticos, a partir de la metodología propuesta se generó un caso hipotético denominado muestra 2, en el que se asume la fractura identificada, como una fractura abierta, es decir, porosidad secundaria, con propiedades mecánicas de cero, ya que es un espacio vacío.

Los resultados de la simulación para la muestra 2, muestran una distribución de esfuerzos uniforme de $6,08316 \times 10^4$ [Pa] en promedio, en todo el volumen tridimensional de la roca como

se ilustra en la Figura 16a, ya que se tiene un único mineral en esa muestra. El desplazamiento por otro lado, Figura 16b, muestra como la fractura abierta se convierte en espacio disponible de desplazamiento, que separa dos tendencias, abajo y arriba de la fractura luego de ser aplicada la carga, abajo con pequeños desplazamientos de $9,461\text{e-}05$ mm y por encima de la fractura donde se observan desplazamientos máximos de $3.784\text{e-}04$ mm después de que se aplica la carga.

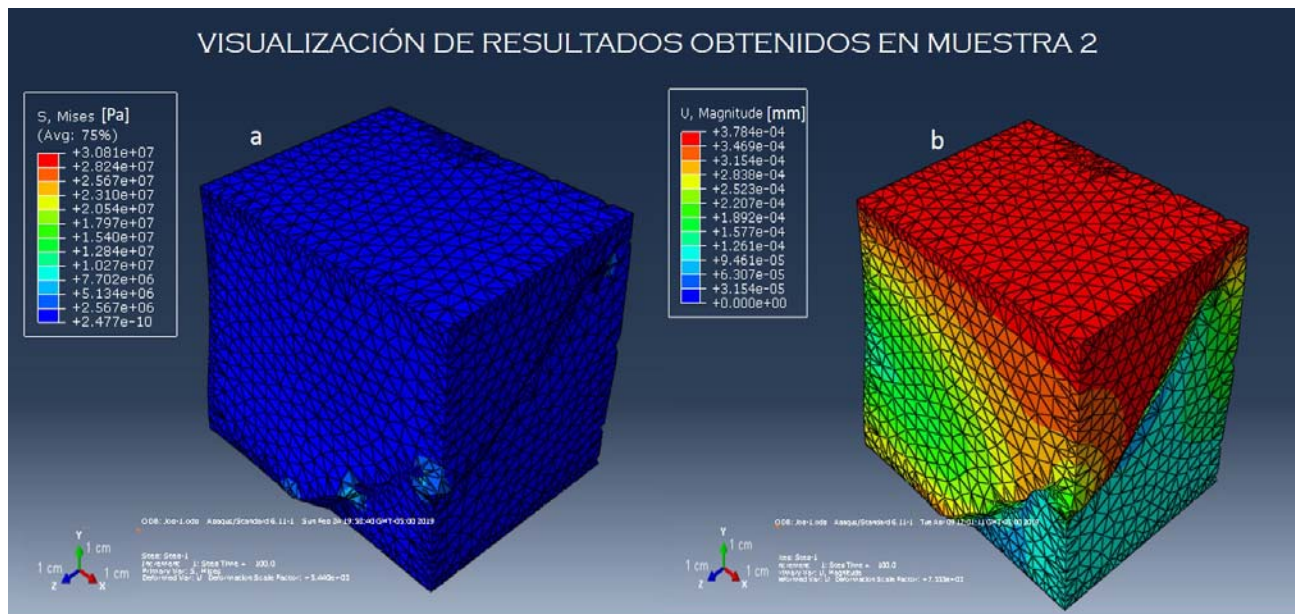


Figura 16. Visualización de resultados del caso hipotético (Muestra 2) donde la fractura se consideró como abierta a) Visualización la distribución de esfuerzos en la muestra 3D b) Visualización del desplazamiento luego de la aplicación de la carga.

Como el valor de porosidad calculado en la muestra 2, es del 14%, los módulos elásticos definidos para esta muestra se compararon con ensayos de laboratorio de areniscas con valores de porosidad entre los 8%-16%.

Tabla 6. Comparación entre los resultados obtenidos por el uso de la técnica de física de roca digital y ensayos de laboratorio realizados por Lama y Vutukuri (1978).

Propiedad Calculada	Arenisca Fractura Rellena (Muestra #1)		Arenisca Fractura Abierta (Muestra #2)	
	Valor teórico elástico del Cuarzo	Física de Roca Digital	Ensayos de Laboratorio	Física de Roca Digital
Porosidad	0%	0%	8-16%	14%
Módulo de Young (GPa)	80	78,5	30	36,8
Relación de Poisson	0,17	0,13	0,25	0,31

Como se esperaba, siguiendo los fundamentos de la física de rocas, las propiedades elásticas de las rocas están en función de su composición mineral, la muestra 1, cuya predominancia mineralógica es de cuarzo, presenta un módulo de Young de 78,5 Gpa, un valor que se asemeja al valor elástico del módulo de Young para el cuarzo que es de 80 Gpa. Si se analizan los resultados de la muestra 2, se observa que valores más altos de porosidad, el valor del módulo de Young disminuye significativamente, según Zoback (2007) se puede hablar de una relación inversamente proporcional (entre mayor porosidad, menor módulo de Young), ya que es una tendencia que usualmente se mantiene.

Por su parte, para establecer una relación directa entre la relación de Poisson y la porosidad, se necesitan un mayor número de muestras de análisis.

La variación del esfuerzo observado entre las fases modeladas cuarzo, calcita y el espacio vacío, mostró esfuerzos distribuidos de mayor magnitud para la muestra totalmente sólida (muestra 1).

Como se observa en la Figura 15a, la variación en la distribución interna del esfuerzo aumente

en la zona de la fractura, lo que podría explicarse por la variación del módulo de Young y la relación Poisson en la calcita, que es menor con respecto a los del cuarzo. Esto en términos de deformación significa que la calcita tiende a deformarse más y que la fractura rellena por su disposición angular tiende a ser un plano de debilidad, donde los esfuerzos del orden de $9.367\text{e}+05$ [Pa] se relacionarían con los desplazamientos de $3.671\text{e}-04$ mm.

Por otro lado, la distribución de los valores de esfuerzo es menor para la muestra con espacio poroso (Figura 16a, muestra 2), que al final resulta en un módulo de Young más pequeño con respecto al de la muestra 1, la variación de la deformación se representa por el desplazamiento que es creado a lo largo de la fractura, donde esfuerzos del orden de $6.08316\text{e}+04$ [Pa] estarían relacionadas con desplazamientos de $3.784\text{e}-04$ mm. La atenuación en la magnitud del esfuerzo estaría relacionada con el efecto de la porosidad en la muestra.

Finalmente, los módulos de elasticidad calculados utilizando la metodología DRP y las mediciones de laboratorio son similares, De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que la física de roca digital muestra unos resultados acordes con la recopilación hecha de ensayos de laboratorio en muestras de Arenisca y cuarzo.

A continuación, se muestra el porcentaje de error basado en la ecuación (12) para las dos a muestras a mención. Para la muestra #1, para el módulo de Young la ecuación arroja un error relativo de 1,8% y un error relativo de 23.5% para la relación de Poisson.

Por su parte, la muestra #2 después del uso de la ecuación, para el módulo de Young arroja un error relativo de 22.6% y para la relación de Poisson un error relativo de 24%.

$$(12) \quad \text{Error Relativo} = \frac{\text{Valor de Laboratorio} - \text{Valor de Física Digital}}{\text{Valor de Laboratorio}} * 100$$

Los porcentajes de error para la muestra #1 en cuánto al módulo de Young es bastante cercano, por su parte el error en el valor de la relación de Poisson se debe a que la fractura rellena tiene una orientación pseudo vertical que podría afectar la deformación transversal, factor que puede incidir en el valor final, si se compara con una muestra de mineralogía homogénea.

Para la muestra #2, los porcentajes de error pueden estar asociados a la distribución de la porosidad asumida que se encuentra concentrada en la fractura y no distribuida en toda la roca, como usualmente es la estructura de una roca. Al tener una distribución homogénea de la porosidad en la roca se esperaría un valor que se asemeje al valor de laboratorio.

Otros ensayos serán útiles para documentar la variación del error del uso de la técnica de roca digital comparada con los ensayos de laboratorio, diferentes soluciones posibles de la simulación después de probar diferentes definiciones de umbral en la segmentación.

Cabe resaltar que el error documentado en las mediciones de laboratorio puede tener un rango de tolerancia de hasta el 20%, es decir un valor de error aceptable en laboratorio asociado a los instrumentos usados y errores humanos (Galvis et al., 2011).

5. Conclusiones

Se estimó el módulo de Young y la relación de Poisson en una muestra de tomografía computarizada, a partir del flujo de trabajo propuesto por la física de roca digital, obteniendo resultados con valores que se encuentran en el rango de valores para muestras de Arenisca de alrededor de 14% de porosidad, respectivamente.

La variación de los módulos elásticos depende considerablemente de la porosidad y la mineralogía del material, teniendo en cuenta estos dos factores, se puede decir que las areniscas con bajo grado de porosidad (0-6%), tendrán un módulo de Young más alto, es decir que son más resistentes a la deformación con respecto a rocas de porosidades de 14%, consideración que corresponde a la recopilación bibliográfica.

Por su parte, la relación de Poisson, no presenta una tendencia definida, factores distintos a la porosidad podrían tener más incidencia.

El uso de dos herramientas software permite simular procesos físicos en una matriz mineral (Abaqus) representada por una malla 3D de nodos creada a partir de imágenes tomográficas (software Avizo). Debe tenerse en cuenta que:

- 1.) La resolución de las imágenes es muy importante, ya que, para visualizar el espacio poroso de la muestra, se requiere de microtomografía computarizada que posee resolución de aproximadamente 8 a 16 micras, tecnología que no se encuentra en el país actualmente, en el caso del presente trabajo, la segmentación fue realizada en función de fracturas y la fase mineral de la roca.
- 2.) El proceso de segmentación dependerá del método elegido, el método de análisis de la forma del histograma de la escala de grises arroja buenos resultados, pero requiere de una intervención

manual para refinar la definición del umbral requerido para la separación de los constituyentes de la roca y a su vez, una cuantificación de su volumen acertada.

3.) La generación de la malla tetraédrica es una superficie tridimensional hecha por el software Avizo, que usa un tipo de mallado libre que se adapta a la geometría de los constituyentes de la roca definidos a partir de la segmentación. La simulación será exitosa dependiendo de la cantidad de tetraedros generados en la malla, cantidad que está determinada por el tamaño y la estructura de la muestra. Además de la cantidad, la forma de los tetraedros debe ser homogénea y debe cumplir con los parámetros de calidad definidos. Este proceso de generación de la malla, necesita de un recurso computacional alto, por tanto, es necesario realizar la subdivisión del volumen original de la roca.

4) El software Avizo permite reconstruir la estructura de la roca compleja e irregular, lo que se convierte en una ventaja considerable, si se compara con respecto a los softwares clásicos de simulación que sólo permiten recrear estructuras que responden a una figura geométrica. El software Avizo también permite exportar la malla tetraédrica para realizar el modelado numérico en el Software Abaqus.

5) La configuración de las condiciones de contorno asegura la similitud entre la simulación numérica y la prueba de laboratorio. Una asignación incorrecta de las condiciones de contorno puede generar una variación en los resultados. Se enfatiza la importancia de colocar la condición de encastre en el centro de la cara superior para garantizar la restricción de los grados de libertad del modelo, de modo que quede fijo en el espacio y no presente rotaciones después de aplicar la carga correspondiente.

6) Los valores de error comunes obtenidos de las mediciones de laboratorio pueden alcanzar un rango de tolerancia de hasta el 20%. La variación de los valores calculados del módulo de

Young con respecto a los resultados de laboratorio de las muestras análogas es del 1.8% (muestra-1) y del 22.6% (muestra-2). Comparando el error con la desviación entre la técnica de la física de roca digital y las muestras de laboratorio, los resultados difieren más de lo esperado. Esta variación se debe a la comparación entre rocas análogas, cuya estructura de roca podría ser diferente y, por lo tanto, también el módulo elástico. Además, la segmentación depende del criterio del intérprete, que puede agregar subjetividad al proceso y la selección de subvolúmenes que representan una sección de la roca y no la roca en su totalidad. Una cuantificación de este error debe abordarse en las siguientes repeticiones del experimento.

6. Recomendaciones

Es necesario aplicar esta metodología en otro tipo de roca, en muestras de microtomografía computarizada o FIB-SEM, para caracterizar su microestructura y comparar los resultados obtenidos con muestras de laboratorio de la misma roca. Se recalca la importancia de tener un equipo computacional robusto de mínimo 16 Gb de memoria RAM y con buena tarjeta gráfica, que permita visualizar los modelos tridimensionales de roca y realizar las simulaciones.

Estudiar a fondo la variación de la ecuación linear elástica propuesta por Arns, et al., (2002) donde programaron ese algoritmo específicamente para calcular propiedades elásticas en medios heterogéneos y se añadió como un nuevo *plugin* en el Software Abaqus usando Fortran y C++. Además, se recomienda estudiar el método para calcular módulos elásticos dinámicos simulando el efecto de la propagación de la onda S y P en la microestructura de la roca por medio del uso de diferencias finitas propuesto por autores como Saenger, et al., (2007), con el objetivo de poder comparar los módulos elásticos estáticos con los módulos elásticos dinámicos.

Se recomienda abordar los modelos multiescales: teoría Mori-Tanaka (MT), esquema autoconsistente (SCS), medio efectivo diferencial (DEM) propuestos en Lingyun Kong et al., (2019) que permiten extrapolar las propiedades obtenidas a microescala de forma que sean representativas en las propiedades de macroescala. Un mayor número de datos en microescala y macroescala podrían permitir verificar cuál de ellos es el más preciso.

Referencias Bibliográficas

- Acebedo, D. (2009). *Determinación de la magnitud de los esfuerzos in situ*. (Tesis de grado de Ingeniería de Petróleos). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Andra, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., Zhan, X (2013a). Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and segmentation. *Computers & Geosciences* 50(43), 1-7. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.005>
- Andra, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., Zhan, X (2013b). Digital rock physics benchmarks—Part II: Computing effective properties. *Computers & Geosciences* 50(43), 1-11. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.008>
- Arns, C.H., Knackstedt, M.A., Pinczewski, W.V., Garboczi, E.J., (2002). Computation of linear elastic properties from microtomographic images: methodology and agreement between theory and experiment. *Geophysics* 67 (5), P1395–P1405.
- Bathe, K (1995). *Finite element procedures*. Watertown, Estados Unidos: Prentice Hall. Recuperado de: http://web.mit.edu/kjb/www/Books/FEP_2nd_Edition_4th_Printing.pdf
- Brady, R y Brown, E (2005). *Rock Mechanics for underground minning*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/49184303_Rock_Mechanics_For_Underground_Mining
- Calderón, Z. (2012). *Introducción a la Mecánica de Rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo*, Bucaramanga, Colombia: Ediciones Universidad Industrial de Santander.

- Custidiano, E y Valenzuela, M (2013). Cálculo del número atómico efectivo parcial y total de tejidos mamarios sanos y malignos. *Revista Ingeniería Biomédica* 7(14), P24-p29.
- Davis, R y Selvadurai, A (2002). *Plasticity and Geomechanics*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/252820625_Plasticity_and_Geomechanics
- Dvorkin, J, Derzhi, N., Diaz, E., Fang, Q., (2011). Relevance of computational rock physics. *Geophysics* 76, E141–E153. 1-13 Recuperado de: <https://doi.org/10.1190/geo2010-0352.1>
- Fjaer, E., Holt, R., Horsrud, P., Raaen, I., Risnes, R. (1992) *Petroleum related rock mechanics*. Trondheim, Noruega: Elsevier.
- Garboczi, E (1998). *Finite Element and Finite Difference Programs for Computing the Linear Electric and Elastic Properties of Digital Images of Random Materials*. Recuperado: https://www.researchgate.net/publication/267418263_Finite_Element_and_Finite_Difference_Programs_for_Computing_the_Linear_Electric_and_Elastic_Properties_of_Digital_Images_of_Random_Materials
- Galvis, L., Ochoa, C., Arguello, H., Carvajal, J., Calderón, Z. (2011). Estimación de propiedades mecánicas de roca utilizando inteligencia artificial. *Ingeniería y Ciencia*, 7(14), 83-103, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S179491652011000200005&lng=en&tlng=es.
- González, R y Wintz, P. (1996), *Procesamiento digital de imágenes*. Massachusetts, Estados Unidos: Addison Wesley.

- Ketcham, A., y Carlson, W (2001) Acquisition, optimization, and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences, *Computation. Geoscience.*, 27, 381 – 400, Recuperado de: doi:10.1016/S0098-3004(00)00116-3.
- Knackstedt M.A., Latham S., Madadi M., Sheppard A., Varslot T., Arns C. (2009) Digital Rock Physics: 3D Imaging of Core Material and Correlations to Acoustic and Flow Properties. *The Leading Edge* 28, 28-33. Recuperado: http://people.physics.anu.edu.au/~tjs110/2009%20Papers/No.2_3D%20Imaging%20of%20core%20material%20and%20correlations%20to%20acoustic%20and%20flow%20properties.pdf
- Kong, L., Ostadhassan, M., Zamiran, S., Liu, B & Li, Chunxiao & G. Marino, Gennaro. (2019). Geomechanical Upscaling Methods: Comparison and Verification via 3D Printing. *Energies*. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/en12030382>.
- Iassonov, P., Gebrenegus, T., Tuller, M., (2009). Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: a crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures. *Water Resources Research* 45. Recuperado: <https://doi.org/10.1029/2009WR008087>
- James, G (2015). Simplifying Digital Rock Physics Workflows. *Geoexplor* 12 (4), 1-8. Recuperado de: <https://www.geoexplor.com/articles/2015/09/simplifying-digital-rock-physics-workflows>
- Lama, R. y Vutukuri, V. (1978). Handbook on Mechanical Properties of Rock. Clausthal, Germany: Trans Tech Publications.

- Ortiz, A., Plata, J., Otero, E., Santos, N (2015). Caracterización estática de rocas por medio de tomografía computarizada de rayos x. *Fuentes El Reventón Energético* 13 (1), 1-7
Recuperado de: <https://doi.org/10.18273/revfue.v13n1-2015005>
- Peinado, J (2015). Estimación numérica de propiedades mecánicas del material compuesto reforzado por partículas mediante elementos finitos (Tesis de Pregrado en Ingeniería Mecánica) Universidad Carlos III de Madrid, Madrid
- Pérez, U (2014). Introducción al método de los elementos finitos. Aplicación a la mecánica de sólidos Universidad Carlos III de Madrid. Rec: http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-dtructuras/1/apuntes/Capitulo_9.Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf
- Sánchez, M., Winograd E., Bosco, S., Álvarez J., Mendoza, M (2015). Caracterización de propiedades mecánicas de rocas a través de simulación numérica y tratamiento de imágenes, *Y-TEC* 5 (2), 5-8. Recuperado de:
<https://www.onepetro.org/download/conference-paper/ARMA-2015-362?id=conference-paper%2FARMA-2015-362>
- Shulakova, V., Pervukhina, M., Lebedev, M., Mueller, T., Mayo, S., Schmid, S...Gurevich, B (Mayo, 2011) Computation of Elastic Properties Based on Microtomogram Images, En H Walter (Director), *73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011*, Viena.
- Simulia, 2011. *Abaqus 6.11 Abaqus/CAE User's Manual*. Recuperado de:
130.149.89.49:2080/v6.11/pdf_books/CAE.pdf

Saenger, E., Ciz, R., Kruger, O., Schmalholz, S., Gurevich, B, Shapiro, S., (2007) Finite-difference modeling of wave propagation on microscale: A snapshot of the work in progress.

Geophysics 72 (5), 1293-1300

Sone, H y Zoback, M (2013). Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks — Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy, *Geophysics* 78 (5), 5-8. Recuperado de:

<https://doi.org/10.1190/geo2013-0050.1>

Thermo Fisher Scientific (2017). *Guide-Avizo-Software-9-4*. Recuperado de:

<https://www.fei.com/software/avizo-user-guide/>

Thiercelin, M y Roegiers, J (2000). *Reservoir Simulation*. Reino Unido, Chichester: John Wiley and Sons Ltd.

Zack, G. Rogers, E y Latt, S (1977). Automatic measurement of a sister chromatid exchange frequency, *J. Histochem. Cytochem.*, 25 (7) 741– 753. Recuperado de:

<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/25.7.70454>

Zoback, M. (2007). *Reservoir geomechanics*. Estados Unidos, New York: Cambridge University Press.