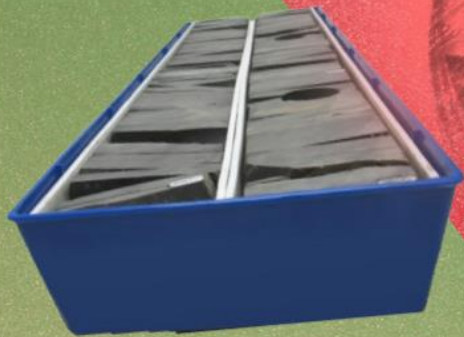


Protocolo Integral

Manejo, Preservación y
Tomografía de Núcleos



**Prácticas
Recomendadas**
Versión Final
2017

PROTOCOLO INTEGRAL DE MANEJO, PRESERVACIÓN Y TOMOGRAFÍA DE NÚCLEOS

Prácticas Recomendadas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Versión Final

Título Original:

Protocolo Integral de Manejo, Preservación y Tomografía de Núcleos: Prácticas Recomendadas, Versión Final.

Copyright © Universidad Industrial de Santander – Agencia Nacional de Hidrocarburos. Las mencionadas instituciones autorizan la utilización y reproducción de este documento para actividades académicas y sin fines de lucro. Su contenido es el resultado de las consultas realizadas con los expertos de las áreas involucradas, tras el análisis de las necesidades existentes en torno al tema en Tomografía computarizada.

Cita correcta: Protocolo Integral de Manejo, Preservación y Tomografía de Núcleos: Prácticas Recomendadas. Versión Final. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.2017.

TABLA DE CONTENIDO

DIAGRAMA DE FLUJO	5
ABREVIATURAS Y SIGLAS	6
GLOSARIO	7
Prólogo	10
1. EXTRACCIÓN Y CORTE.....	11
2. PRESERVACIÓN DE NÚCLEOS.....	15
3. MARCADO DEL NÚCLEO	22
4. ALMACENAMIENTO EN CAJAS AZULES	27
5. FOTOGRAFIA.....	30
6. ETIQUETADO	36
7. TRANSPORTE	37
8. PROTOCOLO DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA	39
8.1 DIAGRAMA DE FLUJO	40
8.2. CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	41
8.3. REGISTRO FOTOGRÁFICO	42
8.4. ADQUISICIÓN DE DATOS	43
8.5. CALIBRACIÓN PARA LECTURA DE ROCA	45
8.6. PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN Y RESOLUCIÓN	47
8.7. SEGMENTACIÓN	48
8.8. VERIFICACIÓN DE DATOS RHOB Y PEF	49
8.9. VERIFICACIÓN DE LOS REQUISITOS Y ENTREGABLES.....	50
8.10. INSTRUMENTACIÓN TECNOLÓGICA.....	52
8.10.1. Herramientas generales.....	52
8.10.2. Herramientas Tecnológicas (Hardware y Software).....	52
9. EXTRACCIÓN DE PLUGS EN SACANÚCLEO USANDO IMÁGENES DE CT	53
10. ENTREGA DE NÚCLEOS	62
11. INSTRUMENTACIÓN Y MATERIALES PARA PRESERVACIÓN	65
12. REFERENCIAS.....	66
ANEXO I.....	70
ANEXO II.....	73

ANEXO III	74
ANEXO IV	82
ANEXO V	83
ANEXO VI	90
ANEXO VII	97
ANEXO VIII	98

```

graph TD
    A[Protocolo de Preservación y Manejo de muestras] --> B[Recuperación]
    B --> C[Inicio de Inventario]
    C --> D[Descripción Macro]
    D --> E[Marcado - Polarizado]
    E --> F[Mangas]
    E --> G[Core desnudo]
    F --> H[Corte]
    H --> I[Estabilización]
    I --> J[Fotografía de inventario]
    G --> K[Corte]
    K --> L[Fotografía de inventario]
    L --> M[Preservación]
    M --> N[Marcado - Polarizado]
    N --> O[Almacenado en cajas azules]
    J --> P[Consolidación de Inventario]
    O --> P
    P --> Q[Carta de entrega Formato ANH & Formato de Inventario de Corazones operadora]
    P --> R[Protocolo de Tomografía Computarizada]
    Q --> R
    R --> S[Mangas]
    R --> T[Core desnudo]
    S --> U[Selección y extracción de Plugs]
    T --> V[Despreservar]
    V --> W[Selección y extracción de Plugs y/o submuestra]
    U --> X[Visualización y selección de la sección del plugs RCAL, SCAL, petrografía, daño de formación y mecánica de rocas, secciones de conservación]
    W --> X
    X --> Y{Core desnudo}
    Y -- Si --> Z[Core Gama]
    Y -- No --> AA{Diámetro del núcleo ≥ 4 pulgadas}
    AA -- Si --> AB[Slabbing *]
    AA -- No --> AC{Solicitar permiso a la ANH operadora}
    AC -- Si --> AD[Slabbing *]
    AC -- No --> AE[Core Gama]
    Z --> AF[Fotografía Luz Blanca & Ultravioleta]
    AF --> AG{Diámetro del núcleo ≥ 4 pulgadas}
    AG -- Si --> AB
    AG -- No --> AH{Solicitar permiso a la ANH operadora}
    AH -- Si --> AB
    AH -- No --> AI[Formato de Entrega de Núcleos]
    AB --> AJ[Preservación]
    AE --> AJ
    AI --> AK[Entrega a Litoteca Nacional]
    AK --> AL[Entregables Protocolo de Preservación]
  
```

Entregables Protocolo de Preservación

- Mayor proporción del núcleo eslabado
- Fotografías de inventario core desnudo y preservado
- Registro Core gama
- Fotografía Luz blanca y UV pie a pie
- Ver Protocolo Entregable Tomografía
- Carta de entrega (Formato ANH) & Formato de Inventario de Corazones (operadora)
- Registros
- Otros entregables (Ver Formato de entrega EPIS)

5

ABREVIATURAS Y SIGLAS

ALFANUMERICAS

A	Constante ajuste para densidad Bulk
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	Son las siglas o acrónimo que se refiere al American Petroleum Institute.
API*	Application Programming Interface
B	Constante ajuste para densidad Bulk
B _z	Buzamiento
C	Constante ajuste para densidad Bulk
CP	Código de Proyecto
CT	Por sus siglas en inglés Computerized Tomography.
CXX	Número de núcleo
Dcm	Digital Imaging and Communication in Medicine
Full HD	Full High Definition
h	Distancia adecuada para la extracción del plug
h ₁	Distancia que hay entre el tope del núcleo y el tope de la capa de interés.
h ₂	Distancia del tope del núcleo y la base de la capa de interés.
HU	Unidades Housefield
ID	Identidad
IP	Internet Protocol
LTDR	Laboratorio de Tomografía Digital de Rocas
PEF	Factor Fotoeléctrico
PVC	Policloruro de vinilo
Raw	Formato de archivo digital de imágenes que contiene la totalidad de los datos de la imagen tal y como ha sido captada por el sensor digital del tomógrafo.
RCAL	Rutine Core Analysis Laboratorie
RHOB	Densidad, g/cc
ROI	Región de Interés
SCALE	Special Core Analysis Laboratorie
SGC	Servicio Geológico de Colombia
SXX	Número de Sección
UV	Ultravioleta

GRIEGAS

α	Ángulo obtenido uniendo el punto más alto de la curva con el punto más bajo medido desde la horizontal
β	Ángulo de buzamiento aparente
ρ	Densidad Bulk, g/cc.

SUBÍNDICES

<i>high</i>	Alta Energía
<i>low</i>	Baja energía.

GLOSARIO

Barril interno/Saca núcleos de aluminio: También llamado manga. Tubo de aluminio con medidas entre 10 y 30 pies, que se ubica dentro del barril externo, y se encarga de alojar al núcleo a medida que avanza la operación de corte del núcleo.

Canaleta: Cilindro eslabado para acomodar los núcleos para su marcación o preservación, fabricado en materiales de PVC.

Colimación del haz: Es el fraccionamiento del rayo a través de la fuente para generar los cortes en la muestra, y generalmente está dado por producto del espesor del corte y el número de cortes por disparo.

Core gamma: Se implementa para determinar la concentración de varios isótopos radioactivos en una muestra de roca. Típicamente se miden las concentraciones de Uranio, Torio, Potasio y la radiación total de la muestra. La salida gráfica permite comparar y correlacionar el núcleo de roca con los registros del pozo, identificar zonas de interés y distribución de zonas arcillosas.

Corrida: Núcleo o core recuperado, ya sea en intervalo total o parcial.

Corriente del tubo: Es la cantidad de electrones emitidos.

Cuna: Estructura de baja densidad, usada para disponer los núcleos a escanear de longitud mínima 3ft. Asimismo, se ubicarán sobre este, los fantasmas de adquisición de manera longitudinal.

Diámetro completo: Muestra seleccionada de un núcleo convencional que se conserva en su diámetro original y que es destinada para realizar análisis de laboratorio.

Espaciado interslice: Es la distancia de separación entre cortes sobre el eje Z.

Espesor mínimo de corte: Es la longitud de un corte del rayo en el eje Z.

Fantasma para Adquisición: Son cilindros de longitud mayor o igual a 3 (ft). Con propiedades físicas homogéneas (i.e. RHOB y PEF), los materiales más comunes son: Cuarzo fundido, Teflón, Agua y Aluminio. Se deben disponer de 3 de ellos, para calcular las propiedades del material a escanear.

Fantasma para Calibración: Consta de un cilindro de 20 centímetros de diámetro, provisto por el fabricante, el cual es llenado con agua mineral.

Fluorescencia: Tipo particular de luminiscencia que caracteriza a las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones electromagnéticas. Parte de esa energía es emitida en forma de radiación electromagnética con longitud de onda diferente. Esta prueba permite identificar

la presencia de hidrocarburos, los cuales emiten fluorescencia cuyo brillo y color son afectados por su composición.

Gap: Intervalo de perforación de no interés para ser corazonado.

Lodo de perforación: Fluido que se utiliza durante la perforación de un pozo. Entre sus funciones están: i) Transportar los ripios de roca que corta la broca a la superficie, ii) Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación, y iii) Mantener la presión de formación durante las operaciones de perforación y/o corazonamiento.

Luz blanca: Luz compuesta por la superposición de todo el espectro de luz visible.

Luz ultravioleta (lámparas fluorescentes): Lámparas especiales cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400 nm (i.e. 4×10^{-7} m) y los 15 nm (i.e. 1.5×10^{-8} m); permite resaltar el contraste entre las zonas no prospectivas y las petrolíferas. Las rocas con presencia de hidrocarburo exhiben una fluorescencia intensa inducida por la luz ultravioleta.

Matriz de Reconstrucción: Es la matriz de filas y columnas de píxeles en la imagen reconstruida. Está dada por el número de píxeles a lo largo del campo de visión, generalmente es 512x512 (www.ndt-ed.org, 2017).

Número CT: Se miden en HU (unidades Housefield), el cual es la medida estándar de los coeficientes de atenuación en una imagen CT.

Parafina plástica: Solución plástica, que permite generar una corteza que previene la pérdida de fluidos en el núcleo.

Pitch: También conocido como Tono. Definido como el cociente entre la distancia de mesa recorrida en una rotación de 360° y el ancho total del haz colimado de rayos X. Es inversamente proporcional a la radiación del objeto (Coursey & Frush, 2008).

Polaridad: Identificación y definición del tope y base en el núcleo usando método de doble línea (ver **MARCADO DEL NÚCLEO**).

Punto Focal: Es el punto donde el haz de electrones incide en el ánodo del tubo y de donde se emiten los rayos X. El tamaño del punto focal está determinado por el tamaño del filamento y el cátodo, que es determinado por el fabricante. La mayoría de los tubos de rayos X tienen más de un tamaño de punto focal. El tamaño del punto focal influye en la resolución espacial(www.ndt-ed.org, 2017).

Resolución Espacial: Se refiere a la capacidad de la modalidad de imagen para diferenciar dos objetos. Se determina principalmente por el tamaño y número de elementos detectores, el tamaño del punto focal de rayos X y las distancias fuente-objeto-detector (Geosciences, 2017).

Roca no recuperada (*Missing*): Intervalo faltante de la muestra recuperada, ocasionado por problemas en la perforación (e.g. relavado de lodo, compactación de broca sobre estratos, cambios de litologías). Se representa mediante una porción de icopor debidamente marcado (ver **MARCADO DEL NÚCLEO**).

Sección/Tubo: Intervalo de corrida/core recuperado, que consta de máximo 3 pies y mínimo 1 pie, para poder preservar, estabilizar y transportar.

Set de Calibración: Debe constar mínimo de 8 secciones de longitud de 1 ft, con propiedades físicas homogéneas (i.e. RHOB y PEF) certificadas por una empresa, con valores de densidad *bulk* entre 1,5 y 3 g/cc, y PEF con valores entre 1 y 7.

Tiempo de Reconstrucción: Es el tiempo que tarda el proceso matemático para convertir los datos CT de adquisición en una imagen.

Vinipel: Papel laminado/película fina, transparente, flexible y resistente a esfuerzos de tracción, pero muy fácil de cortar.

Voltaje del tubo: La potencia que se añade para mover los electrones del cátodo al ánodo en la fuente.

Prólogo

Con el objeto de estandarizar las buenas prácticas para el manejo, preservación y tomografía computarizada de núcleos de perforación, se establece el presente documento en sinergia entre la Universidad Industrial de Santander y la Agencia Nacional de Hidrocarburos, celebrado bajo el convenio interadministrativo No. 237 de 2017. Este protocolo incluye una metodología estándar que va desde la extracción de núcleo, pasando por tomografía hasta la entrega final de información y muestras a la Litoteca Nacional, incluyendo todas las exigencias y políticas adoptadas por esta entidad.

De esta forma, atendiendo a la resolución 183 de 2013, en la cual se estipula el uso de la Tomografía computarizada para muestras de roca recuperadas del subsuelo colombiano, se incluye y se estandarizan los procedimientos asociados con la misma, generando un flujo de trabajo para la adquisición, manejo y entrega de información de datos relacionados con tomografía computarizada.

Este protocolo también incluye recomendaciones relacionadas con el manejo y preservación de núcleos fundamentados en: i) Norma internacional (e.g. API RP40), ii) Reglamentaciones nacionales (e.g. Manual de Entrega de Información Técnica, Manual de entrega de Información Técnica de Ecopetrol y Manual de Entrega de Información Geológica generada en Actividades Mineras), iii) Documentación en la literatura (e.g. Core Analysis: A Best Practices Guide), y iv) Experiencias en la industria petrolera colombiana.

I. EXTRACCIÓN Y CORTE

Metodología:

- I. Después de recuperar el núcleo en superficie, extraer la roca del portanúcleo o barril corazonador. El núcleo debe removerse del cilindro interior, en cuanto sea posible, en una posición horizontal, procurando tener cuidado para minimizar sacudidas mecánicas durante la extracción (Ver **Figura 1 & 2**). Se debe permitir que el núcleo se deslice del sacanúcleos ligeramente elevando el extremo superior del mismo. Si el núcleo no se desliza, se puede utilizar un elemento tal como un listón de madera para empujar el núcleo del cilindro. Puede ser necesario golpear el sacanúcleos suavemente con un martillo o maso de goma para iniciar el movimiento del núcleo. Sin embargo, no se debe martillar el sacanúcleos de una manera que cause una sacudida mecánica en el núcleo. En toda manipulación física se debe intentar exponer el núcleo al mínimo esfuerzo mecánico para garantizar su integridad. Si no es posible la remoción del núcleo con el método anterior, se debe extraer por medio del bombeo con fluido. Si esto es necesario, se debe utilizar un arreglo adecuado de pistones para prevenir que los fluidos tengan contacto directo y contaminen el núcleo¹ (API, 1998).

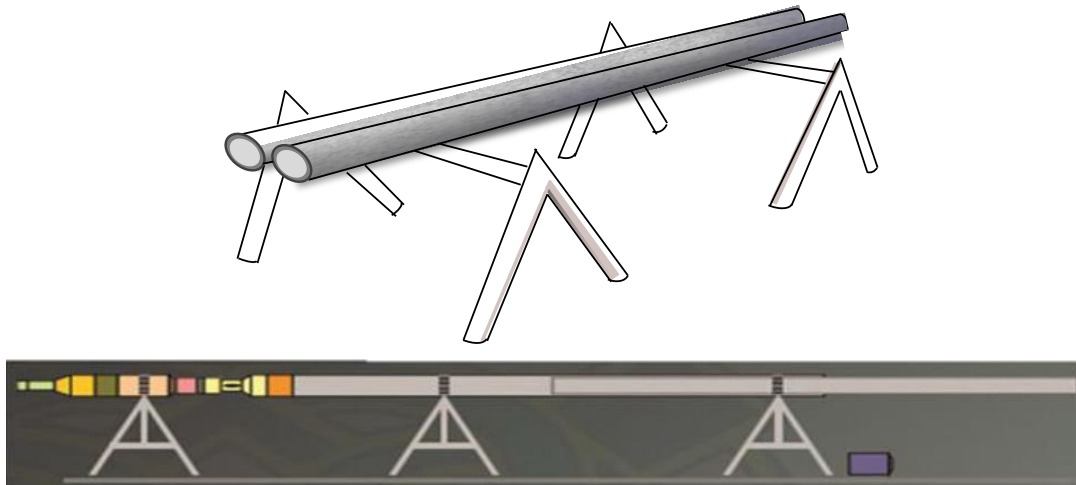


Figura 1. Disposición horizontal de barril y sarta de perforación. Modificado de (Rodríguez & Roa, 2011).

¹ El núcleo recuperado debe ser sacado del tubo portanúcleos rápidamente para minimizar imbibición por el lodo de perforación, o contaminación atmosférica. Se debe evitar el uso de agua fresca u otros fluidos extraños en el núcleo. Cualquier irregularidad en la extracción de roca se debe registrar en el formato de inventario de núcleos en pozo (Ver **ENTREGA DE NÚCLEOS**).

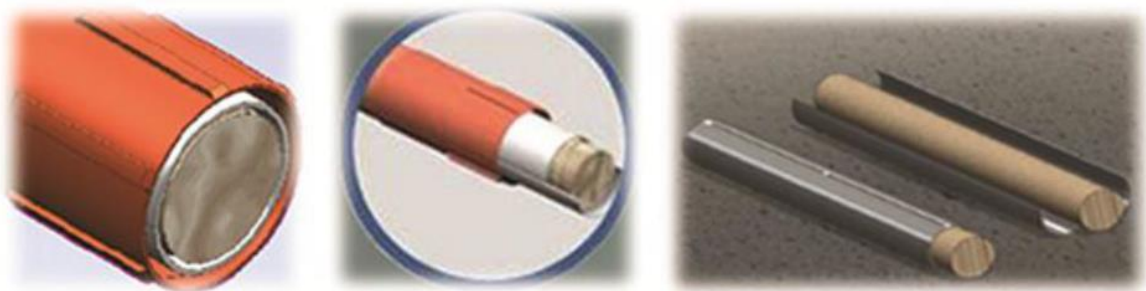


Figura 2. Extracción del núcleo del barril interno. Tomado de (Rodriguez & Roa, 2011).

2. Disponer los núcleos extraídos de corridas en bases de trabajo, para consecuentemente, marcarlos y cortarlos según consideraciones (ver **Figura 3**).



Figura 3. Recuperación y extracción de núcleo de longitud de 10 pies sin barril de aluminio. Tomado de (UIS & ANH, 2011)

3. Después de realizar la marcación del tubo (Ver **Figura 4.a.**) se debe seleccionar la longitud a cortar (secciones no mayores a 3 ft de longitud)², para consecuentemente proceder a realizar un corte transversal con herramientas apropiadas para este propósito y de acuerdo con la litología de la roca (Ver **Figura 4 & 5**) (API, 1998).

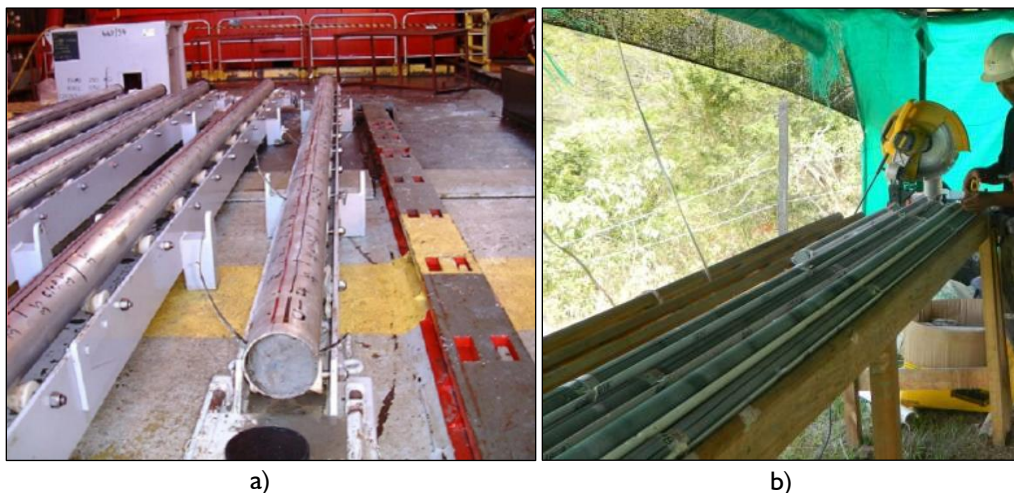


Figura 4. a. Marcación del núcleo para corte. b. Herramienta de corte. Tomado de (UIS & ANH, 2011).

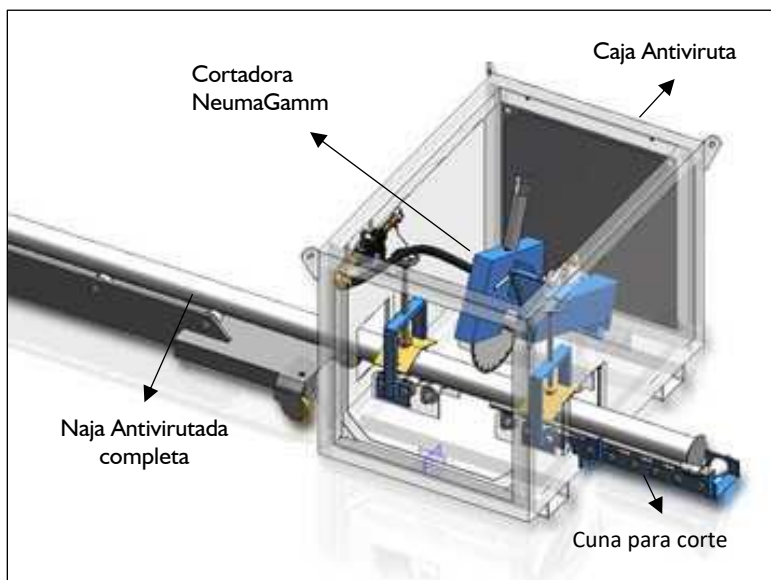


Figura 5. Máquina cortadora de núcleo de rocas. Tomado de (Rodríguez & Roa, 2011).

² El corte de secciones menores a 3ft de longitud, dependerá de la importancia de la sección para análisis posteriores, del porcentaje no recuperado de roca y de su acomodación en las cajas.

4. Se deben extraer pequeñas pastillas de 1 cm³ de volumen distribuidas a conveniencia a lo largo del núcleo para análisis litológicos (e.g. fluoroscopia, textura y composición).
5. Disponer los núcleos en cajas con capacidad para 2 o 3 secciones de 3 pies cada una, dependiendo del diámetro (Ver **ALMACENAMIENTO EN CAJAS AZULES**). Cada núcleo debe diferenciarse uno del otro por el número de sección y de corrida. Cada corrida debe ser enumerada en forma ascendente, iniciando desde el tope hasta la base del pozo³. A su vez las secciones deberán enumerarse siguiendo el mismo parámetro hasta completar la corrida⁴ (Pillado, 2016).
6. Realizar la medición de la longitud de la corrida completa, teniendo cuidado de conservar la secuencia del núcleo, esto debe ser independiente del fracturamiento de la roca. Se debe diligenciar el registro considerando el intervalo perforado (IP) y el intervalo recuperado (IR) de la corrida, para posteriormente calcular el % de recuperación⁵ como se enuncia en la **Ecuación 1**:

$$\% \text{ de Recuperación por corrida} = \frac{IR}{IP} * 100 \quad (1)$$

³ Las corridas serán referenciadas en las etiquetas y reportes con el nombre de "Corazón o Core".

⁴ Las profundidades en las etiquetas deben ser ajustadas con el *master logs* u otro mecanismo adecuado para ello (e.g. descripciones litológicas).

⁵ En corridas que presenten recuperaciones mayores al 100%, se sugiere que los excesos hacia la base sean ajustados en el pozo con la recuperación de la corrida posterior en profundidad. Asimismo, si la siguiente corrida a la recuperación en exceso (i.e. la corrida anterior), presenta una situación de pérdida se deberá reportar el intervalo de exceso como porcentaje recuperado de este último. Estas zonas serán denominadas intervalos de ajuste. Esto se realiza con el fin de reestructurar la recuperación total del pozo para no presentar porcentajes mayores al 100% (Valentine & Norbury, 2016).

2. PRESERVACIÓN DE NÚCLEOS.

Nota Aclaratoria: El objetivo principal del corazonamiento es obtener muestras de roca suficiente que permitan un mejor entendimiento geológico del yacimiento, en la mayoría de los casos esto permite determinar sus propiedades petrofísicas básicas y especiales. Para esto se requiere un manejo adecuado del sacanúcleos, y de esta manera evitar algún tipo de alteración mecánica. También es necesario de una gran agilidad para definir la polaridad (i.e. Tope y Base), cortar y marcar los núcleos adecuadamente. Tener siempre presente la estabilización de los núcleos una vez se preserve para no alterar su estado mecánico.

Metodología:

Preservación en Aluminio o en Cilindros de fibra de vidrio.

1. En el sacanúcleo de aluminio o fibra de vidrio se procede a marcar y seccionar en longitudes de 3 y/o 1 pie (Ver **Figura 6**). Inmediatamente, se efectúa el sellado con tapas de plástico en los extremos del tubo, ajustados con abrazaderas de acero.
2. Drenar el fluido de perforación, para esto se procede a perforar pequeños agujeros en las tapas plásticas y en el sacanúcleos.
3. Una vez seccionados y drenados, los agujeros deben ser llenados con una solución de espuma o resina inerte al ambiente, no invasiva a las fracturas del núcleo y la matriz de la roca; que permita estabilizarlos mecánicamente y sellen sus poros para evitar pérdidas de fluido de la formación contenida en el núcleo (Ver **Figura 7 & 8**).
4. Inmediatamente se realizan los inventarios, los núcleos se proceden a refrigerar, para su transporte, entrega y almacenamiento (Ver **Figura 9**).

Preservación en PVC

1. Se retira el núcleo del tubo de aluminio por medio de presión de aire, o dando ligeros golpes de manera que se deslice horizontalmente sobre las canaletas de PVC.
2. La canaleta debe ser estabilizada para evitar daños por movimiento. Cada sección de tres (3) pies (i.e. 91.44 cm) de largo debe disponerse en canaletas de PVC con marcas de tope y base, de profundidad cada pie (i.e. 30 cm). Estas deben limpiarse con toallas de papel o trapos que no generen residuos, luego los núcleos son recubiertos con vinipel (Ver **Figura 10**).
3. Una vez preservado el núcleo debe ser dispuesto en una caja azul estándar, para el almacenamiento de muestras (Ver **ALMACENAMIENTO EN CAJAS AZULES**).

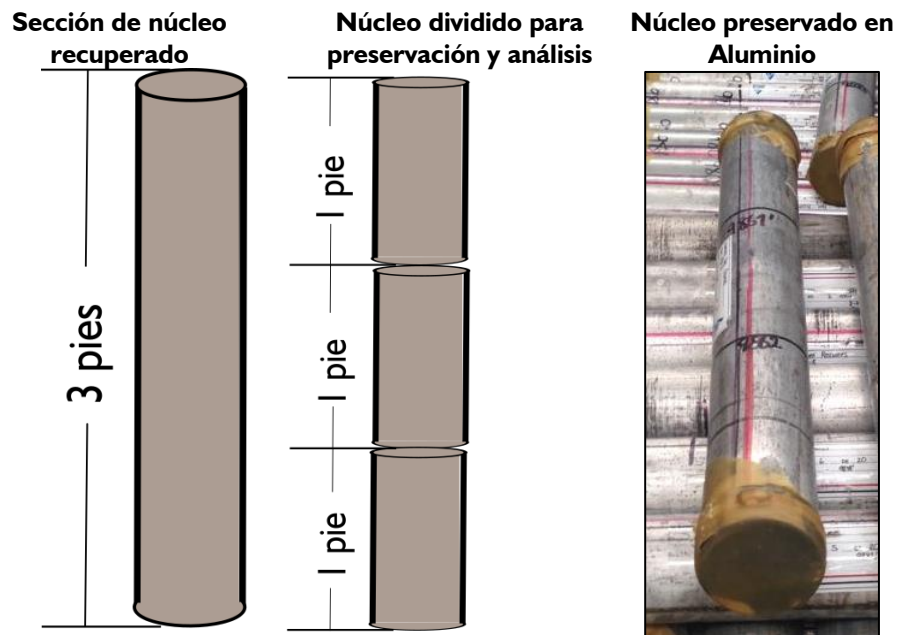


Figura 6. Modelo de recuperación de núcleo, subdivisión de acuerdo con el análisis requerido y preservación en aluminio. Modificado de (Andersen, et al., 2013).



Figura 7. Estabilización mecánica con resina. Tomado de (ALSGLOBAL, 2017).

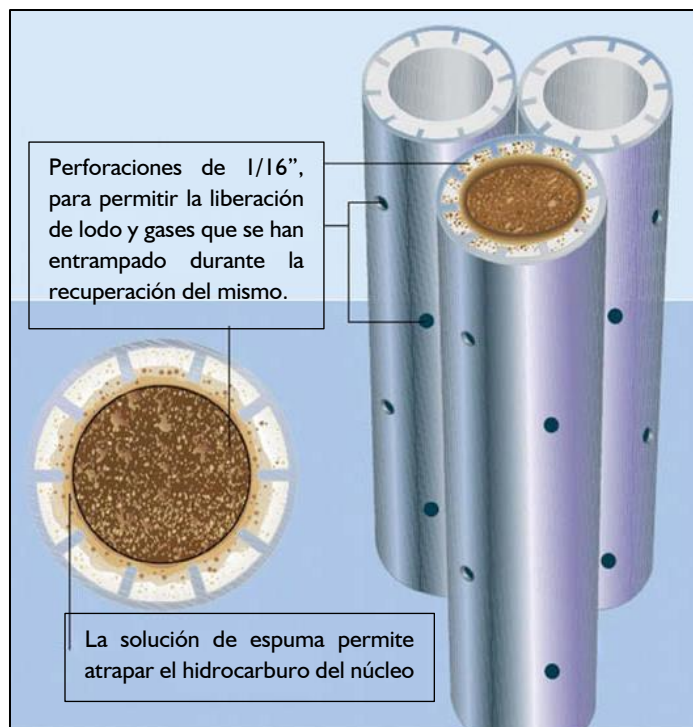


Figura 8. Estabilización mecánica de los núcleos preservados en aluminio/fibra de vidrio con espuma. Modificado de (McPhee, et al., 2015).



Figura 9. Nevera almacenamiento de núcleos preservados en mangas. Tomado de (McPhee, et al., 2015).



Figura 10. Metodología de preservación en PVC. Modificado de (Ariza & Buendia, 2010).

Preservación en baños y revestimientos

Nota Aclaratoria: La preservación en parafina⁶ es muy apropiada cuando los núcleos van a ser probados después de pocas horas o días, y cuando el material va a ser transportado largas distancias. También pueden utilizarse con laminados plásticos para agregar integridad mecánica.

CUIDADO: Los núcleos nunca deben ser bañados directamente con cera derretida o material plástico derretido.

1. Preparar una tina de calentamiento para el baño-revestimiento varias horas antes de preservar el núcleo. Observe todas las precauciones de seguridad. Siga las recomendaciones de manejo del fabricante del baño. El recalentamiento del baño puede dañar la eficacia del revestimiento (Ver **Figura 11.a.**)
2. Envolver el núcleo ajustadamente en una película plástica que se amoldará a la superficie de la roca, ajustando los extremos libres. Se aconsejan varias capas de película plástica de alta calidad para prevenir perforaciones.

⁶ Elementos de baja densidad (i.e. $\leq 1 \text{ g/cm}^3$), químicamente inerte al agua.

3. Envolver el núcleo con varias capas de papel aluminio⁷, ajustando los extremos libres. Evite la perforación de la envoltura de aluminio. Este papel aluminio deberá tener las líneas de orientación y el marcado en profundidad del núcleo.
4. Amarrar un alambre alrededor del núcleo para formar una manija.
5. Sumergir la muestra del núcleo envuelto en papel aluminio en un material de revestimiento derretido. Una cantidad abundante de revestimiento debe encerrar el núcleo. Se recomienda un revestimiento de 1/8 a 1/4 pulgada (i.e. 3.18 a 6.35 mm) de grosor. Esto se logra por medio del uso de múltiples sumersiones, permitiendo que cada revestimiento se endurezca antes de la aplicación de material adicional. Se recomienda que el revestimiento se deje endurecer suspendiendo el núcleo en el aire por medio de la manija de alambre (Ver **Figura 11.b.**).
6. La manija de alambre debe cortarse a ras con el revestimiento. El baño adicional debe aplicarse al extremo del alambre para eliminar posibles efectos de oxidación o evaporación.

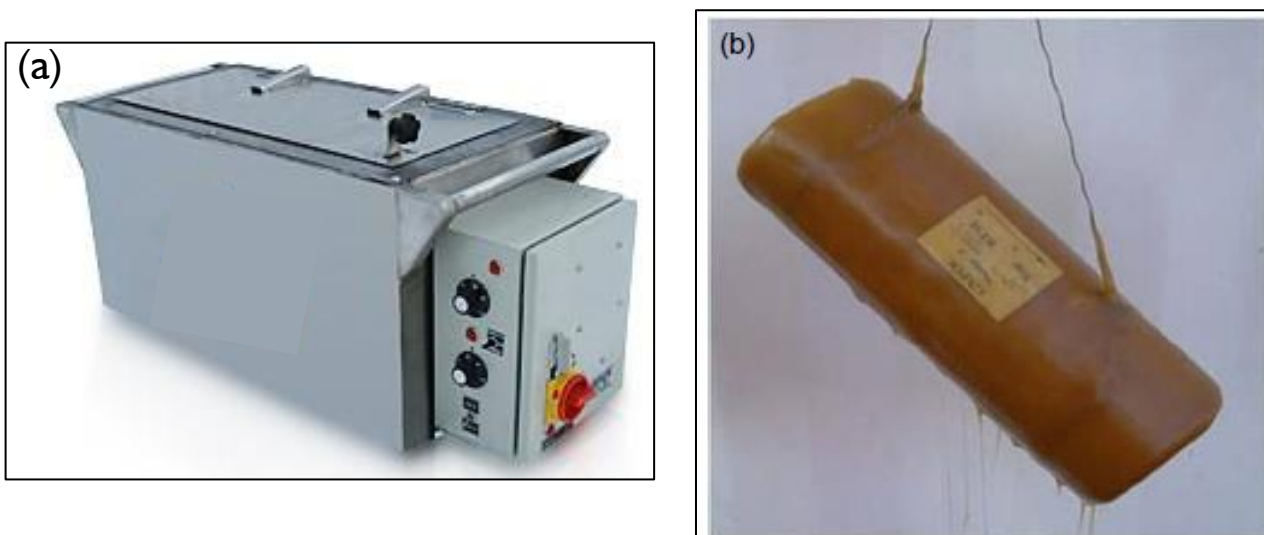


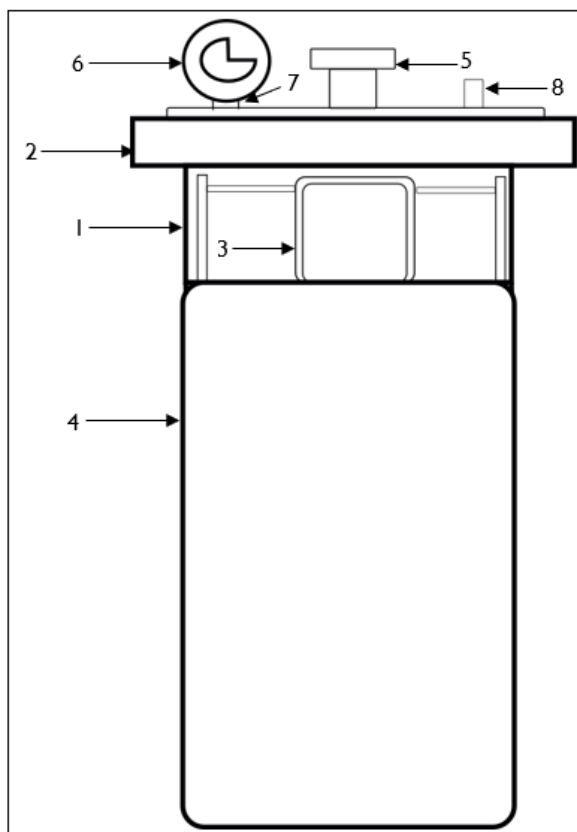
Figura 11. Preparación para preservar núcleos en cera plástica. (a) Tina de calentamiento, (b) núcleo preservado en baño de parafina. Tomado de (ALSGLOBAL, 2017) & (McPhee, et al., 2015), respectivamente.

⁷ Se recomienda usar papel aluminio por su fácil manipulación y funcionalidad al momento de marcar. El papel aluminio no debe tener contacto directo con la muestra, esto se debe a su difícil remoción al momento de hacer remoción de la preservación en etapas posteriores.

Preservación en Frascos Anaeróbicos/Preservaciones de medios Húmedos.

Nota Aclaratoria: El principal objetivo de este tipo de preservación es la inmersión del núcleo en líquido dentro de un frasco anaeróbico, este líquido debe evitar oxidación, evaporación o el secado de la muestra. En ocasiones es muy útil algún bactericida con formaldehído, para evitar el crecimiento de bacterias. Los líquidos más comunes para la preservación del núcleo son salmuera de formación desoxigenada, y aceite mineral refinado despolarizado. Este frasco anaeróbico debe tener una tapa que ayuda a remover o evacuar el oxígeno y otros gases. La compañía que elabore este tipo de preservación debe asegurar el registro fotográfico de la muestra (McPhee, et al., 2015).

1. En un frasco elaborado en PVC o vidrio (ver **Figura 12**), previamente llenado con salmuera o aceite mineral refinado, introducir la sección del núcleo a preservar (i.e. máximo 1 pie) (Cornwall, 1990).
2. Sellar el frasco con una tapa que tenga instalada una válvula liberadora de gases, y generar una liberación esporádica cada 10 minutos o dependiendo del tiempo de transporte y cronograma de análisis.



1. Frasco Anaeróbico.
2. Tapa.
3. Canasta para muestra.
4. Manga de seguridad.
5. Agarradera.
6. Manómetro.
7. Válvula interna.
8. Válvula de liberación.

Figura 12. Modelo de frasco Anaeróbico. Modificado de (Cornwall, 1990).

Este tipo de preservación es recomendado para ciertos análisis geoquímicos (e.g. Contenido de materia orgánica total, reflectancia de la vitrinita), sin embargo, no se sugiere para viajes muy largos, o tiempos muy prolongados de almacenaje.

3. MARCADO DEL NÚCLEO

Nota Aclaratoria: Una adecuada comunicación entre el personal de recuperación de núcleos, el perforador y el *well site* en campo es requerida para que el marcado sea exacto a las correspondientes profundidades, de donde fueron extraídos los núcleos (API, 1998). Asimismo, es necesario un cuidado minucioso para garantizar la continuidad del núcleo en profundidad, y no incurrir en discrepancias con las medidas obtenidas de Core Gamma, Tomografía Axial Computarizada, fotografías de luz blanca y UV.

Metodología:

1. Extraer el núcleo con corrida de 10 o 30 pies⁸. Seguidamente, posicionar la corrida completa sobre la mesa de observación (Ver **INSTRUMENTACIÓN**).
2. Realizar limpieza del núcleo, para lo cual, se debe desplazar una esponja seca perpendicularmente a la superficie del núcleo tratando de retirar la totalidad del fluido de perforación. En algunas ocasiones la viscosidad del fluido no permite retirarlo del núcleo, para lo cual se puede hacer uso de una esponja impregnada con un fluido de perforación de menor viscosidad⁹.
3. Realizar marcación tope-base a toda la corrida por el método de doble línea¹⁰ con el fin de definir la polaridad del núcleo (Ver **Figura 13**).
4. Se deberá marcar y etiquetar el núcleo con las profundidades pie a pie, utilizando materiales de marcación adecuados para la actividad (i.e. materiales de difícil remoción y que no alteren las propiedades del núcleo)¹¹ (Ver **Figura 14**). Para hacer la medición de longitud de los corazones en campo se debe realizar con un flexómetro en unidades de pies y décimas de pies¹² o con una regleta para intervalos cortos como se observa en la **Figura 15** (Ariza & Buendía, 2010).

⁸ Dependiendo de los requerimientos de la operadora, después de extraído el núcleo con corrida de 10 o 30 pies, la mayoría salen en revestimiento de: i) tubo de aluminio, ii) fibra de vidrio o plástico, o iii) sin ningún tipo de revestimiento (i.e. Core Desnudo). Este último, generalmente para los pozos tipo Slim Hole.

⁹ Si existe alguna ambigüedad acerca de los efectos dañinos, elija la precaución, por ejemplo, evitando el lavado del núcleo (API, 1998).

¹⁰ Los núcleos muy fracturados y/o disgregados presentan dificultad en la marcación de la doble línea, para lo cual es clave el esfuerzo y la experticia del técnico.

¹¹ El Perforador o el geólogo *well site* debe suministrar la información de profundidad de tope y base de cada intervalo, debido a que, en ocasiones, se presentan intervalos discontinuos denominados *gap*. El marcado pie a pie siempre debe ser un número entero. En caso de terminar y/o iniciar la sección en decimal, se deberá buscar el siguiente número entero y allí realizar la marcación pie a pie. El tope del siguiente núcleo debe ser dado por la base del anterior. Esto significa que en el caso de que no exista falta de alguna sección de núcleo, habrá la misma profundidad en dos núcleos (Pillado, 2016).

¹² Para la entrega a la Litoteca Nacional, las secciones de núcleo deben estar marcados en pies y decimas de pies.



Figura 13. Marcado de orientación del núcleo. Tomado de (Ariza & Buendía, 2010).



Figura 14. Marcación pie a pie. Cortesía de Litoteca Nacional- SGC.

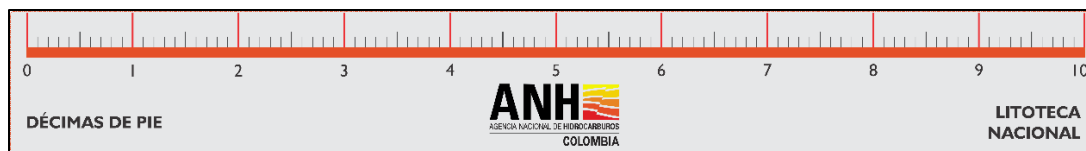


Figura 15. Regleta de medición en décimas de pie. Modificado de (Ariza & Buendia, 2010).

5. Si el núcleo es recuperado sin sacanúcleos(i.e. núcleo desnudo), se coloca la sección de núcleo de roca sobre canaletas de PVC previamente orientadas y marcadas por método de doble línea¹³. Estas canaletas se encuentran sobre la mesa de observación que también debe estar marcada con tope y base. Se debe ubicar correctamente el portanúcleo sobre la mesa, respetando la orientación del núcleo (Ver **Figura 16**).
6. Las fracciones de roca no recuperadas e intervalos preservados se deberán representar por un segmento de icopor del mismo diámetro del núcleo original, y que tenga exactamente la misma longitud de la fracción faltante, exceptuando cuando se necesita estabilidad en la caja hasta completar la base. Esta porción de icopor deberá cumplir con las mismas condiciones de marcado y etiquetado del núcleo original. En caso de que la fracción de icopor sea < 5 pulgadas, y, fin de corrida, se deberá ubicar otra porción de icopor de mínimo 1 pie en la siguiente caja con el etiquetado de la fracción faltante de roca (Ver **Figura 17**).
7. Seguidamente se realiza la fotografía de núcleo desnudo (ver **FOTOGRAFIA**). Posteriormente, se procede a preservar en vinipel y aluminio según requerimientos del personal a cargo de perforación¹⁴ (API, 1998). Efectuar nuevamente el marcado sobre el aluminio según pasos 3 y 4 (Ver **Figura 18**). La **Figura 19** evidencia un ejemplo del marcado incorrecto sobre la muestra, referido a la implementación errada de números decimales.

¹³ La marcación de la canaleta siempre debe ser en la superficie externa.

¹⁴ Se requiere una superficie limpia y plana para alisar el laminado antes de sellar (API, 1998).



Figura 16. a. Marcado de canaleta de PVC por método de doble línea, b. Posicionamiento de núcleo en canaleta. Se debe verificar que la canaleta se encuentra orientada antes de posicionar el núcleo. Tomado de (Ariza & Buendía, 2010).

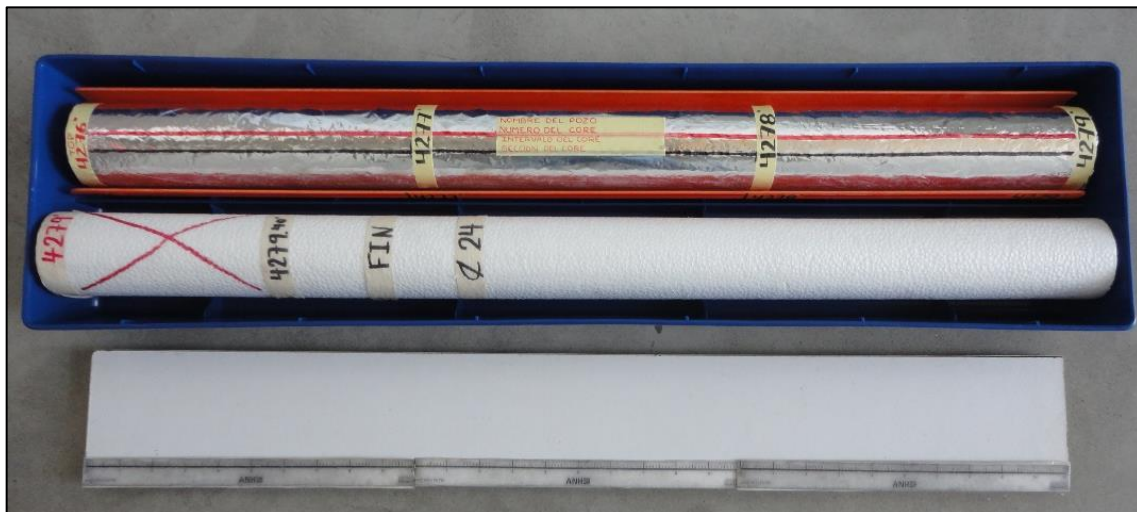


Figura 17. Fracción faltante. Se completa hasta estabilizar la caja. Cortesía de Litoteca Nacional- SGC.

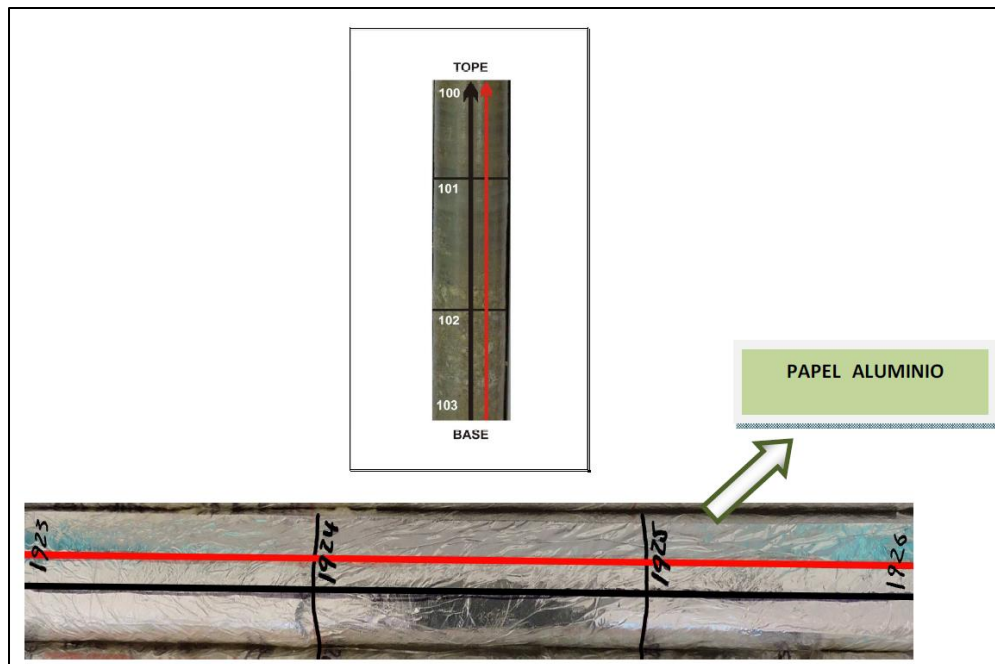


Figura 18. Marcado de núcleos pie a pie. Forma correcta de marcación. Tomado de (Ariza & Buendía, 2010).

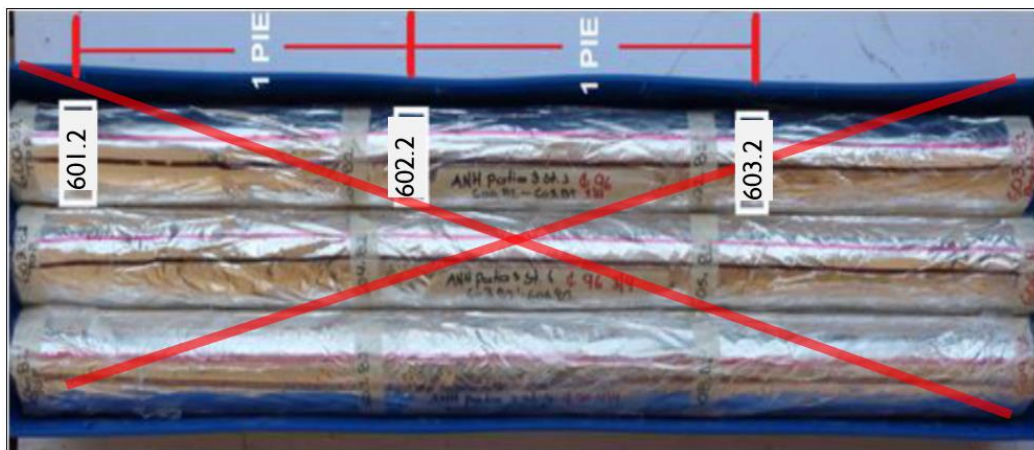


Figura 19. La X muestra que el marcado pie a pie no se debe hacer con numeración decimal. Modificado de (Ariza & Buendía, 2010).

4. ALMACENAMIENTO EN CAJAS AZULES

Nota Aclaratoria: El uso de las cajas azules¹⁵ se encuentra estandarizado por la ANH mediante la resolución 183 de 2013 (Ver **Figura 20**).

Metodología:

1. Posterior al corte y marcación, las secciones son dispuestas en cajas de plástico con capacidad para 2 secciones cada una de 3 pies. Las secciones de núcleo recobrado deberán disponerse en orden de derecha a izquierda con el tope en la parte superior y la base en la parte inferior de la caja. Se debe tener cuidado para mantener la orientación, y preservar la secuencia correcta de las secciones de núcleo. El núcleo debe clasificarse y marcarse de tal manera que todo el intervalo pueda volverse a ensamblar en un futuro (API, 1998). Para optimizar el espacio en la caja con núcleos de diámetro inferior a 3 pulgadas (i.e. capacidad de 3 secciones por caja), se recomienda quitar las venas y agregar un soporte en icopor como se evidencia en la **Figura 21**.
2. Las cajas deberán contar con etiquetado (Ver **ETIQUETADO**) que ordenan la secuencia del pozo en profundidad, y siempre deberán disponerse de derecha a izquierda.

¹⁵ Cajas plásticas azules estándar: Cajas plásticas (base y tapa) inyectadas en polietileno de alta densidad (PEAD) y color azul PANTONE 2945C, que son utilizadas para la conservación y almacenamiento de muestras litológicas. La caja consta de dos piezas separadas FONDO y TAPA. La base de la caja o FONDO tiene una configuración trapezoidal en ángulo de 9.5° de 925 mm de longitud en el punto superior, 95 mm de altura incluyendo venas de refuerzo, 204 mm de ancho de la base y 239 mm de ancho en el punto superior. La TAPA tiene una configuración de 968 mm de longitud, 247 mm de ancho y 15 mm de altura incluyendo venas de refuerzo (Resolución No. 183 de 2013 _ANH).

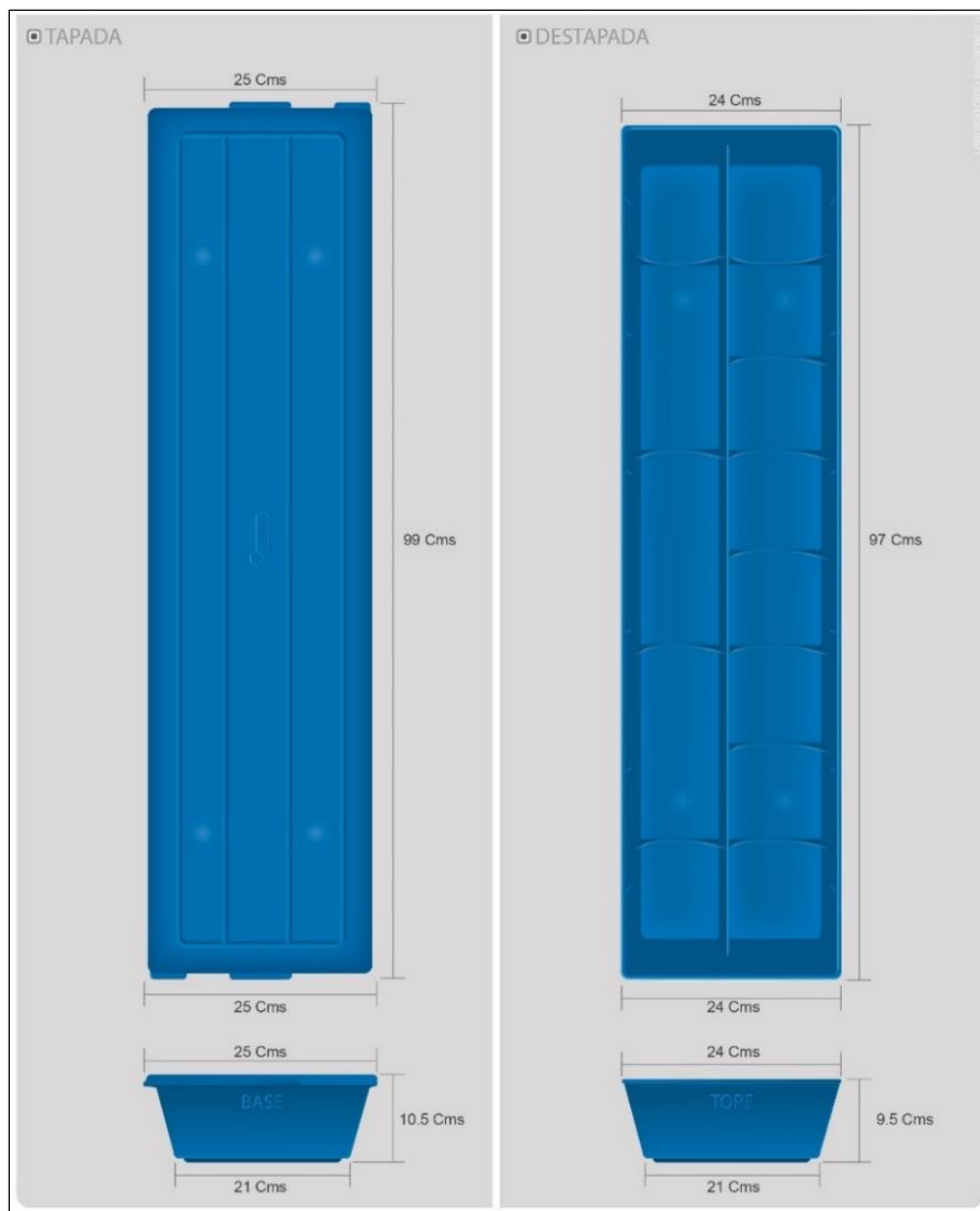


Figura 20. Caja plástica estándar para empaque de los corazones. Cortesía de Litoteca Nacional- SGC.

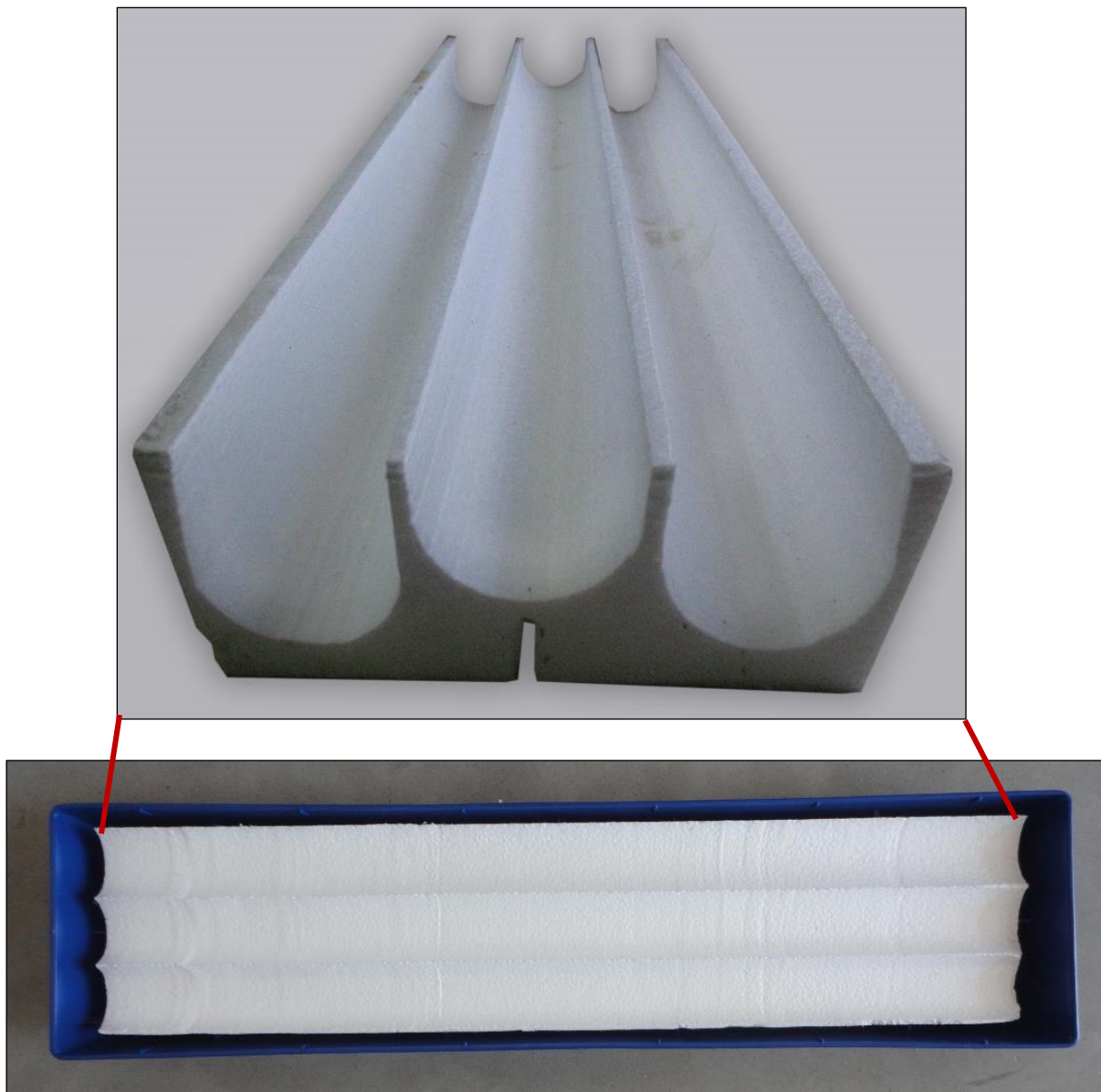


Figura 21. Cama en icopor para aumento de capacidad en las cajas. Cortesía de Litoteca Nacional-SGC.

5. FOTOGRAFIA

Nota Aclaratoria: Ciertas consideraciones deben ser tenidas en cuenta para la toma de fotografías, algunas de estas son:

- La iluminación es uno de los factores predominantes, evitar la mayor cantidad de sombras ayudará a una mejor adquisición de la imagen.
- La adquisición de imágenes fotográficas debe ser realizada con una cámara de alta resolución, que garantice un excelente detalle de las características superficiales del núcleo.
- El eje de la cámara siempre debe estar perpendicular al eje Z del núcleo, con el fin de evitar distorsiones en la imagen (ver **Figura 22**).

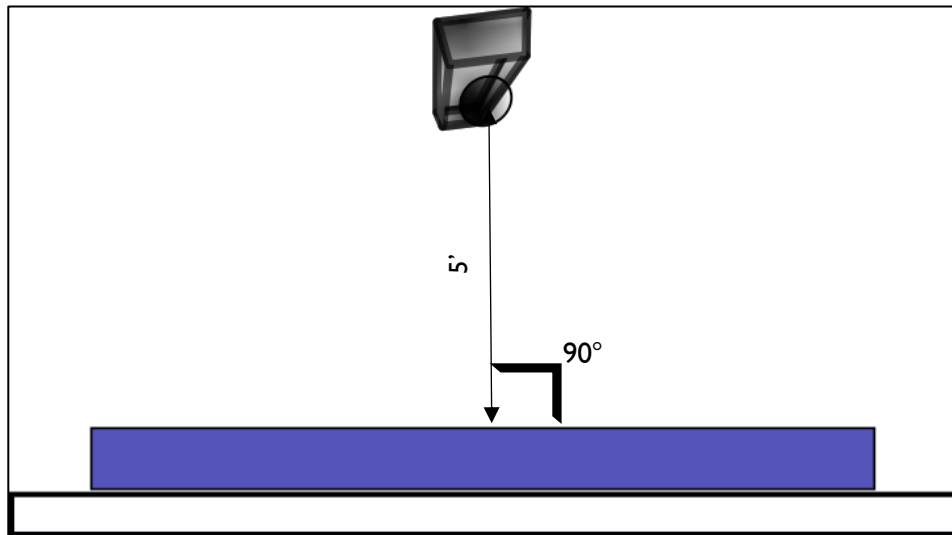


Figura 22. Modelo de toma de fotografía de núcleos almacenados en cajas azules o con preservación en aluminio.

Metodología:

Fotografía de inventario en pozo para núcleo desnudo.

- I. La adquisición fotográfica de inventario del núcleo desnudo consiste en evidenciar el estado del mismo una vez es retirado del barril de aluminio. Posterior al marcado y corte se ubica cada sección en una canaleta sobre la mesa de observación para ser fotografiado con la escala y etiqueta reglamentadas por la ANH¹⁶ (Ver **Figura 23**). Se debe garantizar que la línea roja y negra tengan continuidad de una sección a otra.

¹⁶ La fotografía de inventario se debe tomar en orden de profundidad a la corrida completa.

2. Seguidamente se procederá a preservar según sea considerado/programado por la compañía operadora.

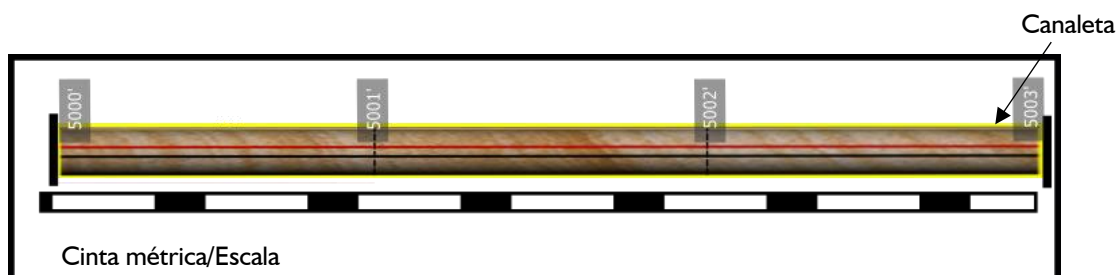


Figura 23. Extracción y posicionamiento del núcleo para fotografía de inventario del núcleo desnudo. Modificado de (UIS & ANH, 2011).

Fotografía del núcleo preservado para inventario en pozo

1. Después de extraer y estabilizar el núcleo, se procederá a tomar fotografías de cada sección del mismo, con su respectivo marcado de profundidad y sección. Una escala se ubicará en el borde de la manga de aluminio.
2. Es necesario, después de preservado los núcleos en canaletas de PVC, realizar la fotografía dentro de la caja azul, permitiendo tener un registro del estado en el que se empacó y el posicionamiento dentro de la misma; adjunto a la caja llevará una etiqueta en la parte de la base que muestre el número de corrida, tope y base (Ver **Figura 24**). Para un mejor control, también se tomará la fotografía de la respectiva etiqueta que llevará esta caja (Ver **ETIQUETADO**). Esto se realiza con el fin de efectuar un control de calidad, y obtener un registro de las cajas con el producto que será entregado en la Litoteca Nacional.
3. Los núcleos que sean preservados en parafina deben ser fotografiados antes de ser recubiertos en papel aluminio, y sumergidos en la solución. El núcleo al final del proceso de parafinado debe quedar registrado como se observa en la **Figura 25**.

Fotografía en Luz blanca y UV de núcleos

1. Para garantizar una buena fotografía en luz blanca y UV, se debe remover el papel aluminio y vinipel que recubren el núcleo. Esta fotografía debe ser tomada pie a pie. Debe ser entregada en formatos .psd, .tiff, .jpg. Si el núcleo esta eslabado (ver **Figura 26 & 27**), se deberá fotografiar ambas partes con los 2 espectros lumínicos (ver **Figura 28**).¹⁷

¹⁷ Referirse a los instructivos internos de la Litoteca Nacional-Servicio Geológico Colombiano.



Figura 24. Fotografía de núcleos preservados en canaletas de PVC con etiqueta hacia la base. Cortesía de Litoteca Nacional-SGC.



Figura 25. Correcto etiquetado y fotografía de núcleos preservados en parafina. Tomado de (Gonzalez, 2012).

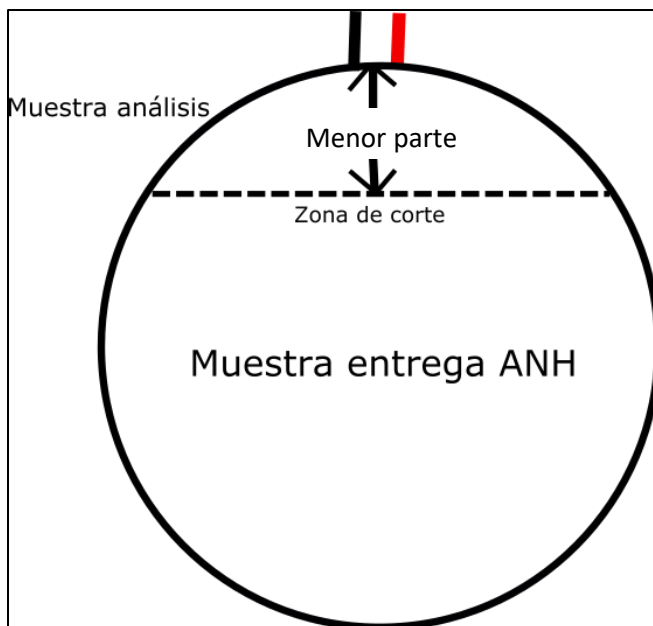


Figura 26. Modelo de núcleo eslabado. Modificado de (Campbell & Gay, 1989).

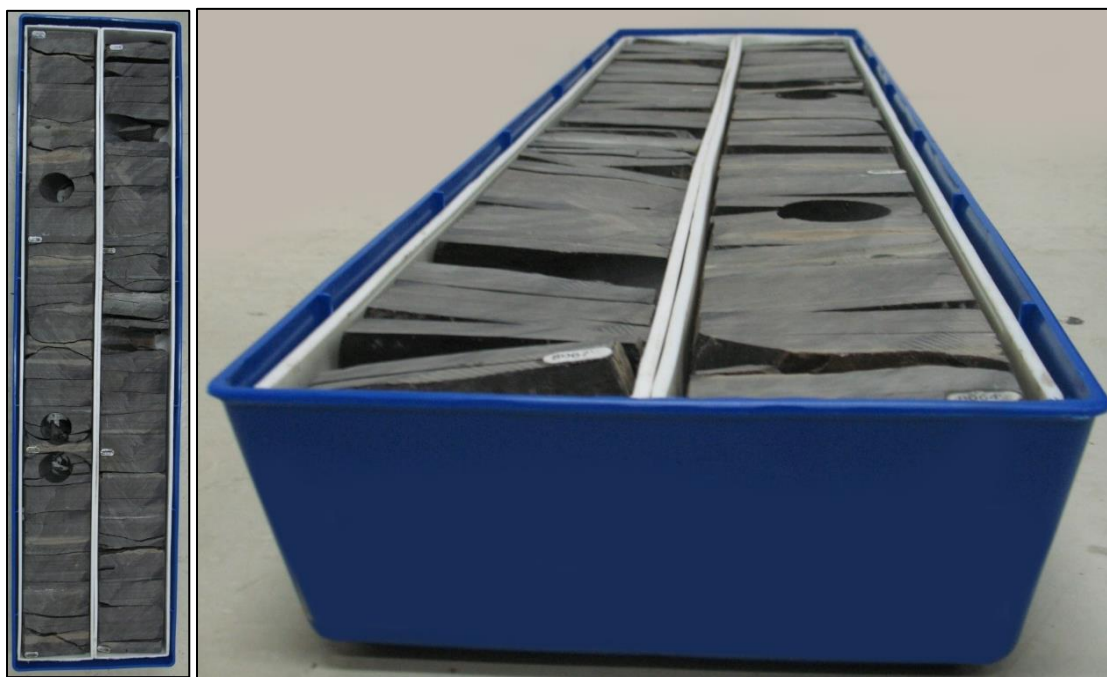


Figura 27. Mayor porción del núcleo eslabado. Cortesía de Litoteca Nacional-SGC.

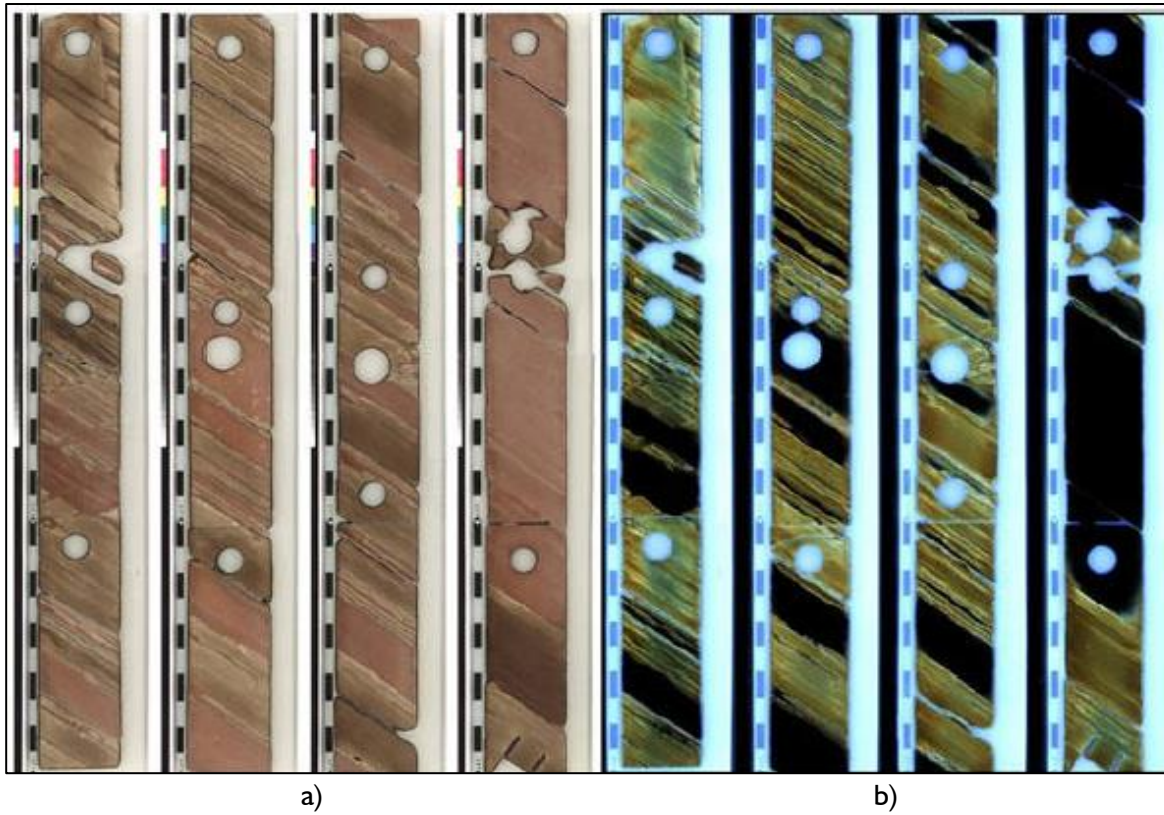


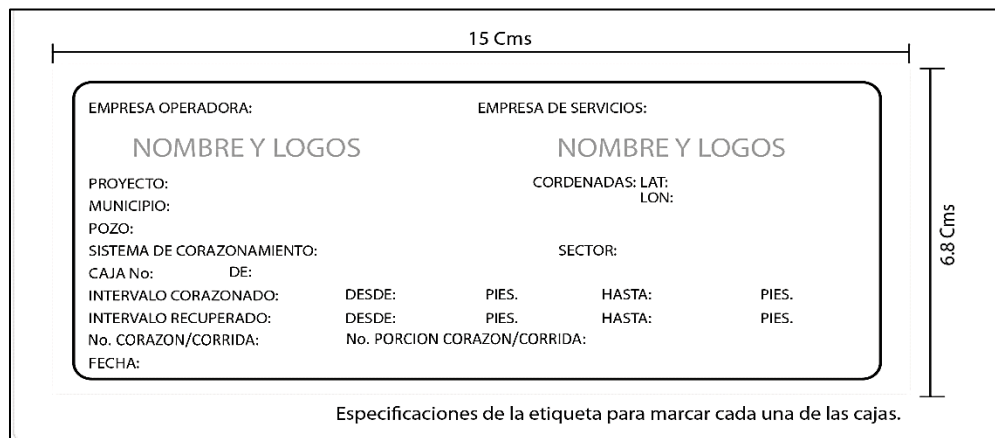
Figura 28. a) Fotografía del núcleo bajo luz natural, y b) fotografía del núcleo bajo luz UV. Tomado de (McPhee, et al., 2015).

6. ETIQUETADO

Nota Aclaratoria: Cada caja que se entregue con un núcleo debe estar marcada con un rótulo que contenga la siguiente información:

- Nombre - Contrato Localización, Compañía (s).
- Coordenadas de Superficie y Fondo (origen Bogotá)
- Profundidad del corazón.
- Intervalo corazonado.
- Diametro del núcleo.
- Formación corazonada.
- Intervalo recuperado.
- Porcentaje de recobro.
- Empresa de servicios de corazonamiento
- Fecha de inicio de perforación.
- Fecha de terminación de perforación.
- Fecha de corazonamiento.

Esta informacion se establecerá mediante la etiqueta mostrada en la **Figura 29**:



15 Cms

6.8 Cms

EMPRESA OPERADORA: EMPRESA DE SERVICIOS:

NOMBRE Y LOGOS NOMBRE Y LOGOS

PROYECTO: CORDENADAS: LAT:
MUNICIPIO: LON:

POZO: SECTOR:

SISTEMA DE CORAZONAMIENTO:

CAJA No: DE:

INTERVALO CORAZONADO: DESDE: PIES. HASTA: PIES.

INTERVALO RECUPERADO: DESDE: PIES. HASTA: PIES.

No. CORAZON/CORRIDA: No. PORCION CORAZON/CORRIDA:

FECHA:

Especificaciones de la etiqueta para marcar cada una de las cajas.

Figura 29. Etiqueta Estándar. Cortesía de Litoteca Nacional-SGC.

Se colocaran dos etiquetas iguales por caja, una ubicada en la tapa y otra en la lateral de menor longitud.

7. TRANSPORTE

Nota Aclaratoria: El transporte en cajas es usado para protección y almacenamiento mientras se llevan del sitio de perforación al laboratorio u otro sitio de acopio. Se debe proteger al núcleo de temperaturas extremas, humedad, y deshidratación (i.e. sol directo, motores calientes, lluvia, vientos fuertes, y baja humedad relativa) (API, 1998).

Únicamente se usarán las cajas plásticas estándar (ver **Figura 20**) para transporte de núcleos que hayan sido preservados con papel aluminio y vinipel. Las demás preservaciones como canister, cera o revestimiento de aluminio no necesitan ser transportados en cajas, no obstante, los núcleos preservados en sacanúcleos deben ser transportados en neveras para garantizar su integridad (Ver **Figura 9**).

Metodología:

1. Para el traslado de los núcleos del pozo al laboratorio¹⁸, deberán disponerse en estibas manteniendo siempre el orden de derecha a izquierda, como lo ilustra la **Figura 30**¹⁹. La siguiente fila de cajas deberán disponerse de forma ortogonal a la fila anterior, y así sucesivamente para garantizar la estabilidad de la estiba²⁰.
2. Para el transporte de núcleos desde la locación hasta la Litoteca Nacional deberá usarse un vehículo de carga dedicado exclusivamente a la labor en mención. Para tal objetivo se dispondrán las cajas de acuerdo con lo descrito en el numeral anterior, debidamente ajustadas²¹ para evitar movimientos bruscos (Ver **Figura 31**).

¹⁸ El laboratorio de Tomografía Axial Computarizada deberá ser el próximo destino después del corazonamiento en pozo (Resolución No. 183 de 2013 _ANH).

¹⁹ El núcleo debe ser protegido de las temperaturas extremas, humedad y deshidratación.

²⁰ Se debe tener en cuenta no sobrepasar la capacidad de cada estiba, que máximo es de 500 kg, para cuidar la estabilidad de la misma.

²¹ Se recomienda colocar zunchos en ambos extremos de la caja, previniendo un desprendimiento de la tapa de las cajas azules por algún movimiento brusco repentino.



Figura 30. Estiba. Cortesía de Litoteca Nacional-SGC.



Figura 31. Transporte de núcleos corazonados. Tomado de (Ariza & Buendia, 2010).

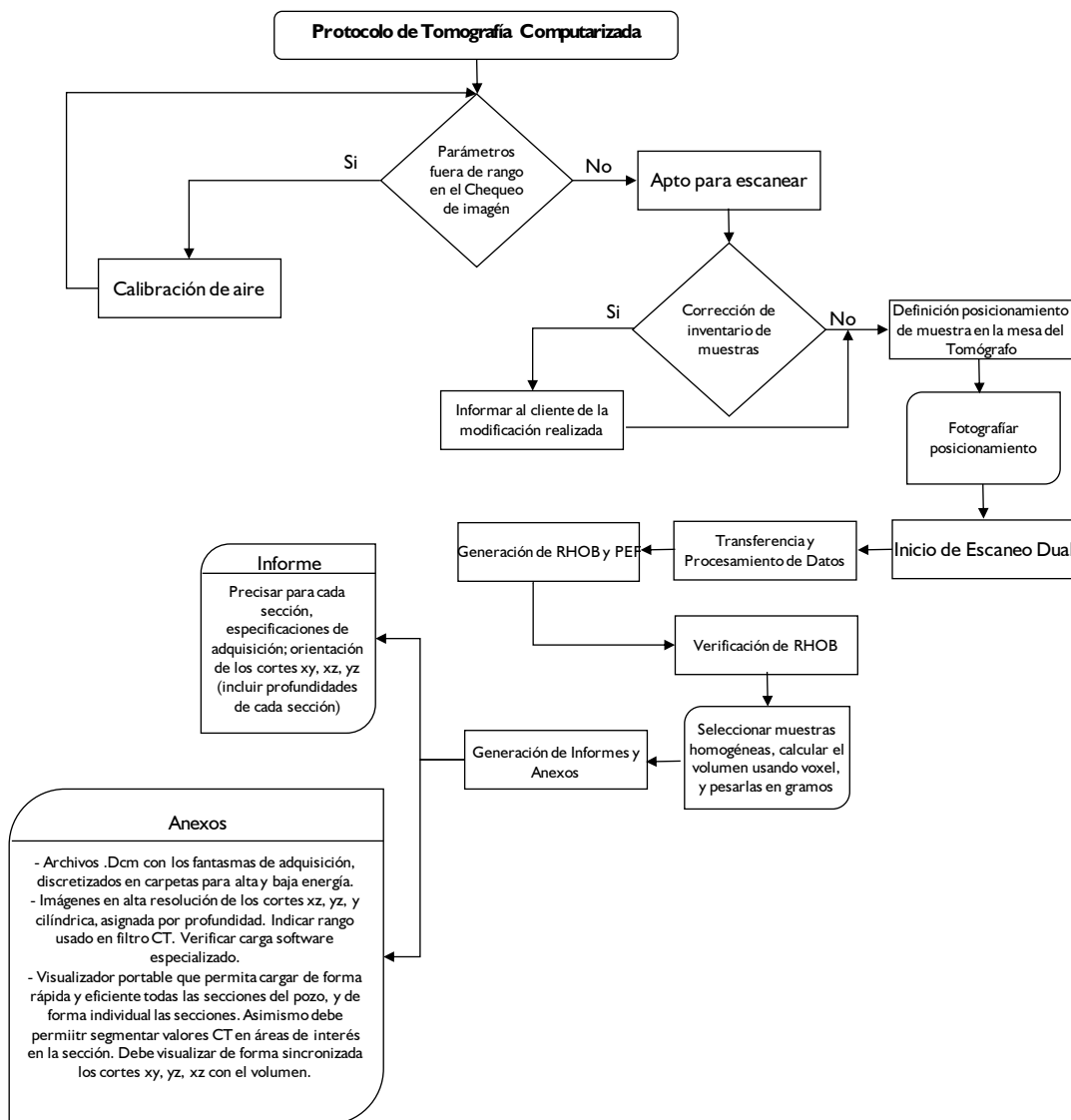
8. PROTOCOLO DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA

Dentro del manejo y preservación de núcleos se establece el Protocolo de Tomografía Computarizada, buscando dar cumplimiento a los requerimientos de la resolución **183 del 13 de marzo de 2013**, donde se debe garantizar una entrega de información referente a la adquisición de tomografía computarizada. No obstante, se deben considerar ciertos factores que pueden afectar los resultados esperados, para lo cual, se deben atender las siguientes recomendaciones:

- Preservaciones tales como acero inoxidable y fibra de carbono, generan artefactos en las imágenes de tomografía y valores erróneos en los números CT. Por lo tanto, se recomienda el uso de materiales como aluminio para preservación en mangas.
- Una correcta marcación e inventario de los núcleos es necesaria para no incurrir en errores dentro de los análisis posteriores (e.g. Tomografía, Core Gamma y análisis especiales), tales como marcación en pulgadas, saltos de profundidad, confusión de tope y base, entre otros. De igual forma se recomienda realizar una revisión del inventario de las secciones en las cajas recibidas, para verificar las longitudes de cada corrida y sección de núcleo a escanear.
- Las líneas que definen la polaridad del núcleo son fundamentales en el proceso de adquisición de tomografía, debido a que la línea roja indicará la posición central del escaneo para la consecuente generación de imágenes radiales. No deben incluirse en el núcleo más de una línea roja y una negra.

Por lo tanto, estas dos asociaciones normativas son importantes para la exploración de Yacimientos y sirven de referente a toda la industria del petróleo y gas en Colombia. En el caso del Protocolo de Tomografía no existe un antecedente para este tipo de ensayo, por lo que se regulan aspectos importantes tales como: i) manejo de resolución, ii) procesamiento de imágenes y iii) cálculo de propiedades petrofísicas como los son RHOB y PEF.

8.1 DIAGRAMA DE FLUJO



8.2.CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS

Nota Aclaratoria: En todo tomógrafo sin importar su generación, los números CT deberán ser verificados con la metodología “escaneo del fantasma de agua” al encenderse por primera vez, o, si los números CT son incorrectos después de una calibración de aire (i.e. air calibration). El fantasma de agua es llenado con agua mineral. En el momento de su escaneo debe estar libre de burbujas (Seeram, 1994). Debe estar posicionado en el borde de la mesa en dirección al Gantry; para consecuentemente ubicar el láser helicoidal sobre el mismo, y generar un corte sobre la marca central superior de este (Ver **Figura 32**). Una vez efectuado el procedimiento, se verifican los valores CT según protocolo.

Metodología:

1. Generar un protocolo en el aplicativo del tomógrafo que permita medir de manera cuantitativa los siguientes parámetros: definir el número CT promedio, la uniformidad y la desviación estándar de los números CT, adicionalmente es necesario determinar el diámetro del contraste para baja energía; todo se realiza en una lámina escaneada con el fantasma de agua. Este procedimiento debe realizarse cada 6 horas (Ver **ANEXO II: Control de Calidad de imagen**).
2. Si los parámetros medidos en el ítem anterior están fuera de rango (Ver **ANEXO II: Control de Calidad de imagen**), se debe proceder a realizar la calibración de aire²².

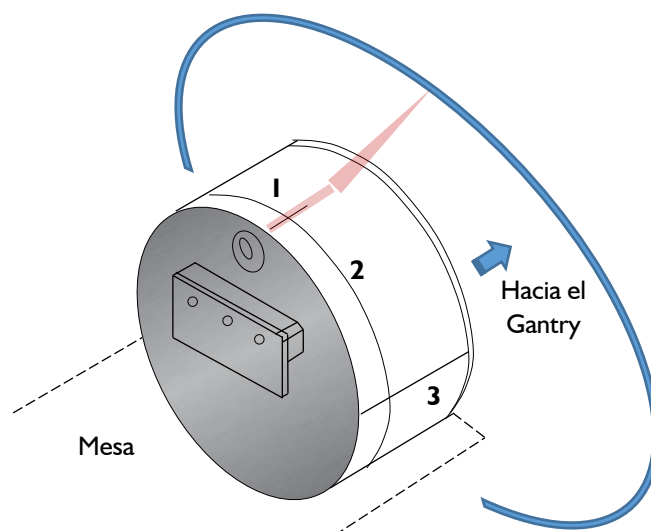


Figura 32. Posicionamiento del fantasma de agua. Donde 1: Línea de alineación superior, 2: Línea circunferencial de alineación, 3: Línea de alineación lateral.

²² La calibración de aire básicamente es cuando el Gantry se encuentra sin ningún objeto en su radio de acción (i.e. entre la fuente y el detector solo hay aire), y el grupo de detectores es irradiado sin atenuar los rayos-X.

8.3.REGISTRO FOTOGRÁFICO

Nota Aclaratoria: Estas fotografías se realizan a manera de evidencia, para presentar la orientación de escaneo realizada. No requieren de resolución FullHD.

Metodología:

1. La cámara debe estar ubicada en la parte superior de la mesa del tomógrafo a una altura máxima de 1.5 metros, el lente debe estar ubicado en el centro de la cuna y enfocar la totalidad del núcleo a escanear. Es necesario que se visualice una escala en la cuna (Ver **Figura 33**).
2. La resolución de la fotografía debe ser igual a 300 pixeles por pulgada, para visualizar las líneas de orientación, y las numeraciones del tope y la base.
3. La fotografía debe ser tomada antes de iniciar el escaneo cuando el núcleo está en posición, es importante que el láser longitudinal del gantry este encendido y pose sobre la línea roja del núcleo.
4. La fotografía se tomará a todo núcleo a escanear.

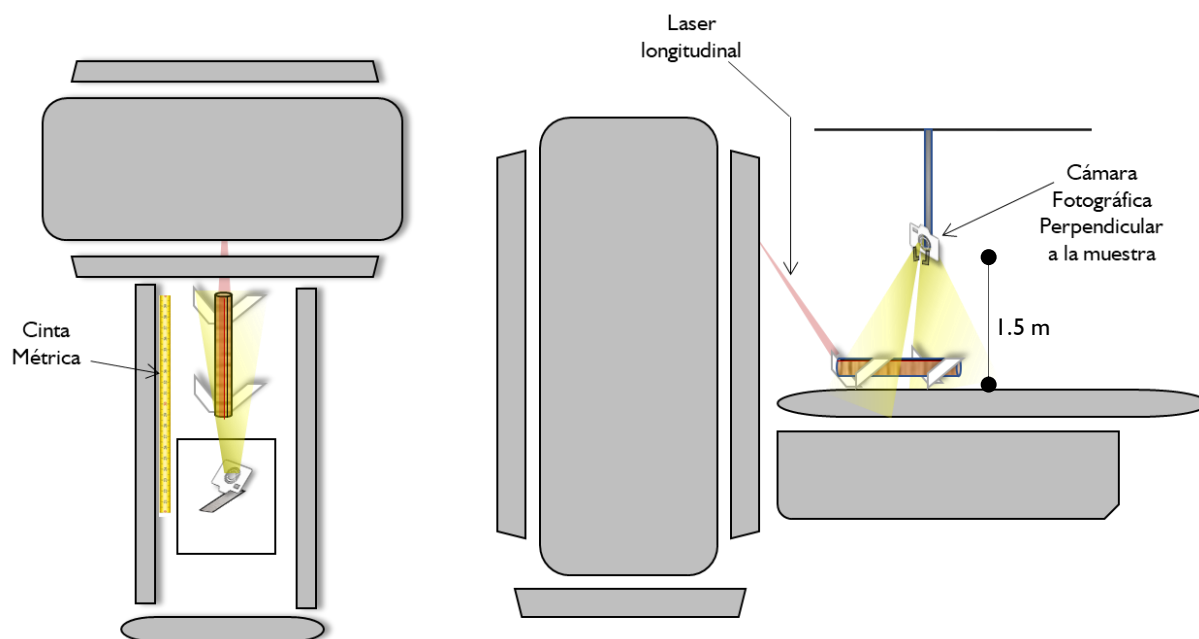


Figura 33. Esquema ilustrativo para registro fotográfico.

8.4.ADQUISICIÓN DE DATOS

Metodología:

1. Se deberá disponer de una cuna en material de baja densidad (e.g. madera o policarbonato), con disposición de 3 fantasmas como ilustra el **ANEXO III**, para posicionamiento de núcleos.
2. Ubicar la cuna de forma longitudinal sobre la mesa. Debe estar centrada y alineada en todos los ejes (ver **Figura 34**).
3. Posicionar la almeja²³ sobre la cuna, la cual, debe ser de un diámetro acorde a la sección a escanear.²⁴
4. Se deben generar 2 marcas en la almeja de aluminio: i) El cero (0) longitudinal; y, ii) A 0.5 cm de la ubicación de la sección.²⁵
5. Calibrar el cero (0) longitudinal moviendo la mesa hasta ubicar el láser en la marca del sistema cuna-almeja preestablecido. Al tener ubicada la mesa en la posición del láser, oprimir en consola o gantry, el botón de cero (0).
6. Ubicar la sección en la marca preestablecida, siempre de tope a base, ya que esta es la forma correcta para reconstrucción del núcleo y procesamiento de datos.
7. Medir la sección para introducir en el sistema la longitud de escaneo.
8. Ajustar el campo de visión. Se debe dejar un espacio aproximadamente de 0.5 cm en el tope y base de la sección para garantizar la adquisición de datos de roca.
9. Iniciar escaneo.

²³ Especificaciones de la almeja: Longitud del Cilindro, 130 cm; espesor, 0.5 cm; diámetro, cercano al diámetro del núcleo a escanear, pero sin hacer contacto con el mismo; pureza, 80-20, y dividida longitudinalmente en dos secciones iguales.

²⁴ Si el tomógrafo es de 5ta generación en adelante no requiere almeja, debido a la incorporación de la función de corrección del endurecimiento del haz.

²⁵ El tomógrafo iniciará a escanear en el cero (0) longitudinal, no obstante, se debe proporcionar un espacio de 0.5 cm para garantizar la adquisición de la roca.

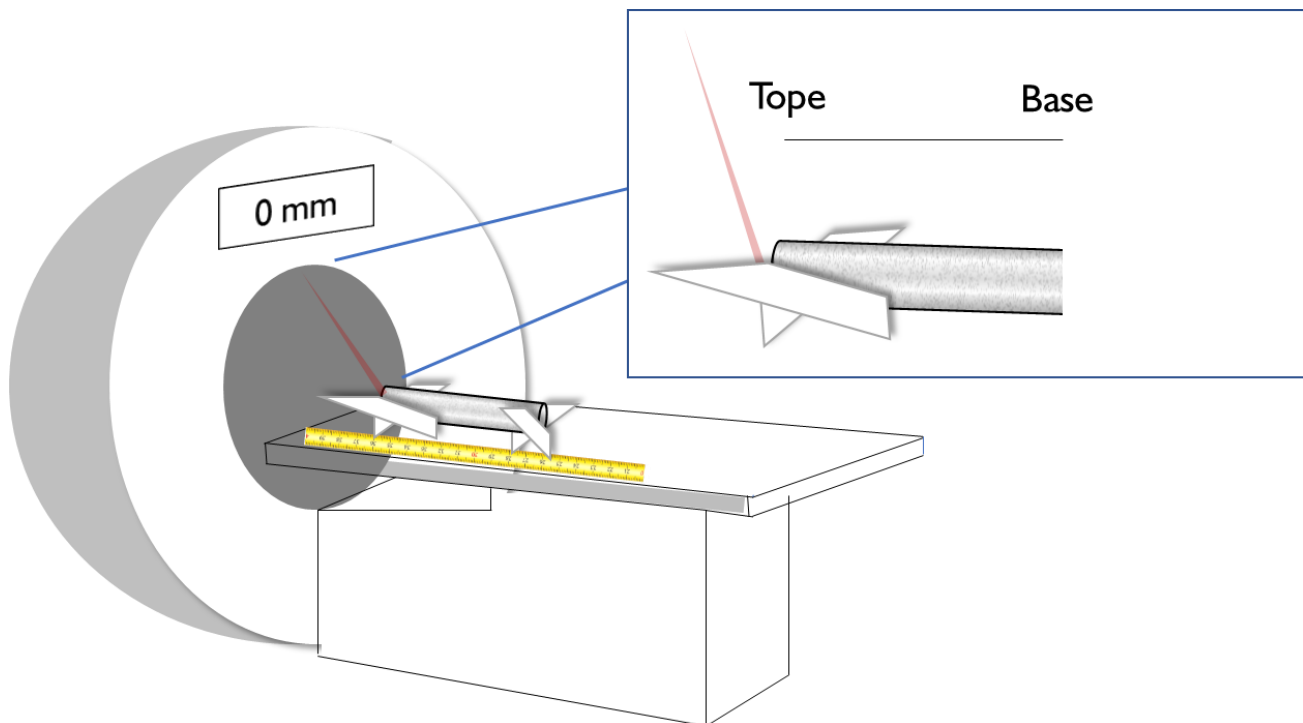


Figura 34. Esquema ilustrativo para adquisición de datos.

8.5.CALIBRACIÓN PARA LECTURA DE ROCA

Metodología:

1. Adquirir un set de calibración de roca compuesto por 8 muestras pertenecientes a este grupo Berea Sandstone, Crab Orchard ss, Dessert Pink ss, Edward White ss, Idaho ss, Marcos Shale, Silurian Dolomite, Scioto ss (Ver **ANEXO IV**) con las siguientes características: RHOB desde 1.5 - 3 g/cc, y PEF desde 1 - 7.
2. Escanear a 2 niveles de energía; [baja energía ($\leq 100\text{kV}$) y alta energía ($\geq 130\text{kV}$)]; las muestras del set de calibración. (Ver **Figura 35**).
3. Calcular los valores de RHOB y PEF del set de calibración adquirido, por medio de un software especializado.
4. Extraer datos de densidad medida²⁶ y densidad calculada, por medio de software especializado, para cada una de las muestras escaneadas.
5. Verificar que el error entre la densidad medida y la densidad calculada no sea mayor a +/- 4%, por medio de la curva de calibración. De estar desfasados proceder a ajustar. (Ver **Figura 36**).
6. Realizar ajustes en la densidad calculada²⁷, buscando la mayor cercanía posible a la densidad medida.

²⁶ Densidad medida = Masa de la muestra / volumen calculado.

²⁷ $\rho = A * CT_{Low} + B * CT_{High} + C$ (Siddiqui, 2004).

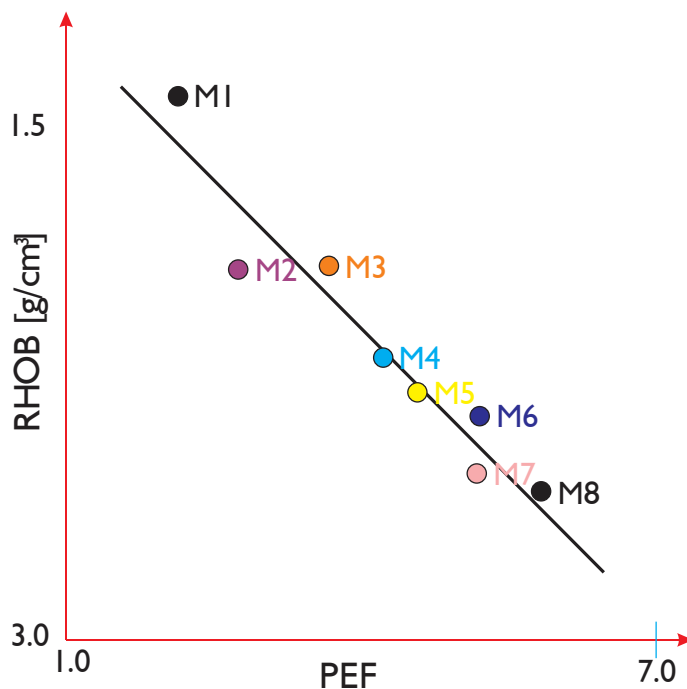


Figura 35. Conceptualización de litologías comúnmente utilizadas en la calibración de densidad y número atómico efectivo.

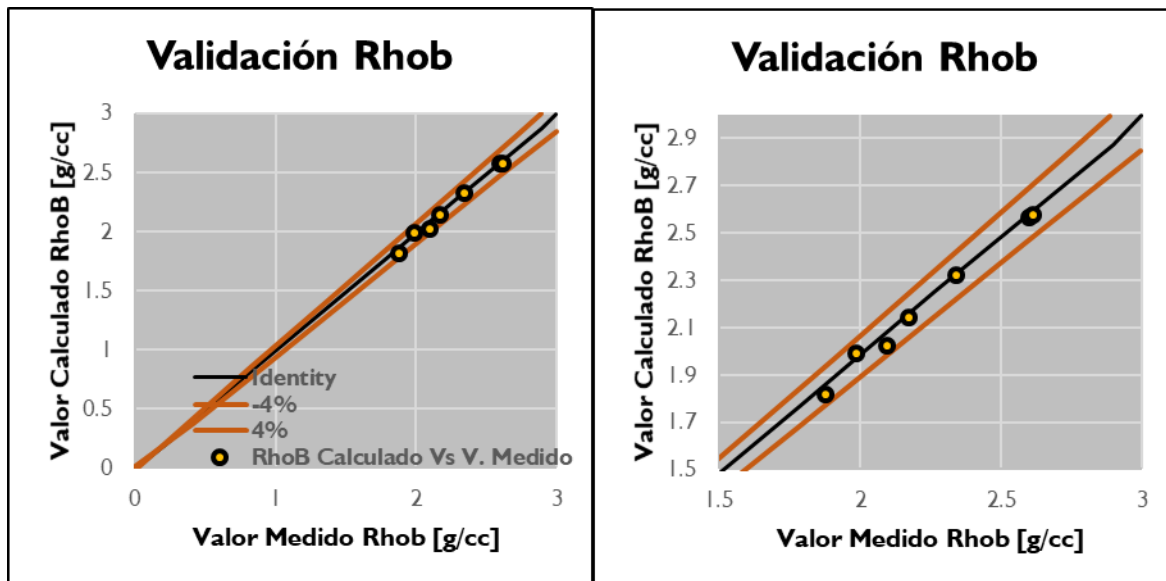


Figura 36. Validación de la densidad.

8.6. PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN Y RESOLUCIÓN

Metodología:

1. Crear un protocolo interno de adquisición de datos para rocas, diferente a los que vienen preestablecidos en el tomógrafo. Este protocolo deberá radicarse dentro del entregable (Ver **ANEXO V**).
2. La resolución espacial estará regulada por las dimensiones del voxel, las cuales deberán ser como mínimo, en el eje Z de 0.625 mm (i.e. espesor del corte), y en los ejes X y Y deberán ser 4/5 del mismo, esto corresponde a resolución de adquisición. La resolución proveniente de reconstrucción deberá ser como mínimo de 0.4 mm en Z, manteniendo la misma relación de 4/5 en los ejes X y Y.
3. Para la adquisición de imágenes, se debe ajustar el campo de visión al máximo a la roca en el eje Z, y en los ejes X y Y se debe garantizar la adquisición y visualización de los 3 fantasmas (e.g. agua, teflón y cuarzo).
4. Dentro del entregable (i.e. informe de resultados) debe incluirse imágenes en alta resolución²⁸ del escaneo; adquiridas en alta energía, correspondientes a los planos XY, XZ y cilíndrica. Estas imágenes no deberán presentar ningún artefacto generado por el endurecimiento del rayo.
5. Para el procesamiento de las imágenes se deberá utilizar una pantalla de resolución mínima Full HD (i.e. 1920×1080 p), con el objeto de realizar capturas de pantalla de los planos correspondientes.
6. La ventana del histograma de contrastes se deberá unificar para cada proyecto²⁹ realizado.
7. Corrección de ruido: Cuando la imagen presente un nivel de ruido superior al permitido (ver **ANEXO II: Control de Calidad de imagen**), se debe:
 - Realizar calibración de aire y verificar la imagen usando el fantasma de agua. Repetir el proceso de ser necesario.
 - De persistir esta inconsistencia comunicarse con el técnico de la marca proveedora.

Nota: Es fundamental contar con personal capacitado en física digital de rocas para la evaluación de calidad de imagen, de manera que pueda identificar y validar estructuras y materiales intrínsecos de la roca, para su posterior correlación con los registros digitales.

²⁸ Las imágenes de alta resolución son capturas de pantalla del escaneo.

²⁹ Entiéndase por proyecto cada pozo escaneado.

8.7.SEGMENTACIÓN

Nota aclaratoria: Para cualquier proceso de segmentación, debe estar disponible un software de lectura y manipulación de archivos .dcm, o alguno con la capacidad de convertir datos .dcm a cualquier otro formato de imagen legible. Asimismo, se debe considerar que el compilado de datos no debe corromperse con un bordeado de imagen incorrecto, o sin la adecuada corrección al endurecimiento del haz de rayos, estas imágenes quedaran compiladas en formato “.raw” o cualquier otro archivo con características similares (ver **ANEXO VI**).

Metodología:

1. Cargar los archivos .dcm; y/o .raw, en un software de segmentación.
2. Seleccionar áreas o regiones de interés, de manera longitudinal (visual XZ, YZ), es decir, todo lo que constituye material de roca.
3. Realizar una selección en el histograma, efectuando una discretización de los números CT pertenecientes al material de roca en el umbral de datos³⁰ (ver **Figura 37**), teniendo cuidado de no seleccionar voxel³¹ con números CT pertenecientes al aire o fracturas.
4. Considerar siempre que los valores CT no son homogéneos de un voxel a otro, por lo que siempre requieren de una discriminación muy minuciosa.

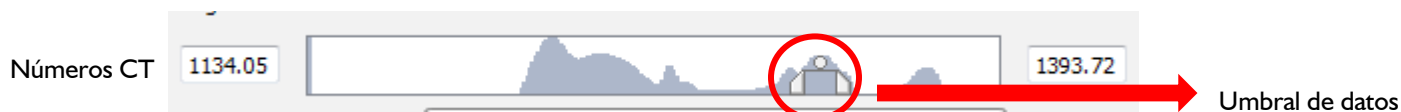
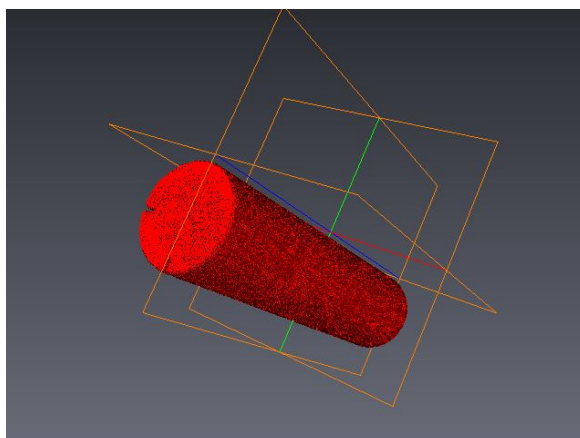


Figura 37. Selección de valores en histograma de datos para un núcleo de 1 ft, totalmente homogéneo.

³⁰ Umbral de datos “Thresholding”: Consiste en definir un color de grises u otra escala de tonos, en la zona de interés de acuerdo con datos de histograma.

³¹ Es la unidad cúbica que compone un objeto tridimensional. Constituye la unidad mínima procesable de una matriz tridimensional y es, por tanto, el equivalente del píxel en un objeto 2D.

8.8.VERIFICACIÓN DE DATOS RHOB Y PEF

Nota aclaratoria: Por medio de la tomografía de resolución media (i.e. 0.625 mm de resolución vertical) no es posible determinar densidad de grano, solo se puede calcular la densidad Bulk o total en unidades de g/cc. El valor de PEF tiene una relación directa con la composición mineralógica de la roca, a diferencia de RHOB que tiene mayor relación con la textura. Debido a su naturaleza el valor de PEF no puede ser verificado de forma sencilla, sin embargo, se puede estimar por medio del set de calibración (Ver **Calibración de Lectura de Roca**).

El procedimiento para verificar el valor de RHOB es el siguiente:

Metodología:

1. Seleccionar secciones de núcleo³² de cada pozo mientras este es escaneado. Dichas secciones deben ser homogéneas en el registro RHOB, tener longitudes mayores a 0.3 ft, estar distribuidas uniformemente a lo largo de todo el pozo. Por cada 100 ft deben escogerse mínimo 4 secciones³³.
2. Escanear nuevamente de forma individual cada una de las secciones escogidas anteriormente y pesar en balanzas con precisión de 0.1g.
3. Considerando las dimensiones del voxel, efectuar el conteo voxel a voxel de aquellos que componen la sección, con el objeto de calcular el volumen de la sección escaneada, y consecuentemente, determinar la densidad³⁴.
4. Comparar el valor de la densidad, obtenida del paso anterior, con el valor calculado por el software implementado; de tal manera, que la variación no deberá ser mayor a ± 0.03 g/cc del valor medido (i.e. paso 3).
5. Si el valor de PEF calculado es mayor a 4.0 unidades, el error en la densidad determinada será significativo, y deberá hacer ajustes en el software, considerando la curva de calibración del set de calibración.
6. El reajuste en la densidad debe efectuarse una vez se haya escaneado la totalidad del pozo.

³² Cuando la sección esté preservada en manga de aluminio, esta selección se hará teniendo en cuenta los valores de RHOB de los materiales usados para la preservación.

³³ El número de secciones puede variar de acuerdo con las variaciones litológicas presentes en el pozo.

³⁴ Esta densidad puede ser determinada por cualquier otro método de laboratorio (e.g. Mercurio, Arquímedes).

8.9. VERIFICACIÓN DE LOS REQUISITOS Y ENTREGABLES

1. Todo proyecto de CT se realiza por secciones de máximo 3 ft³⁵, las cuáles serán escaneadas a 2 niveles distintos de energía, estructurado en una carpeta que irá dentro del entregable final³⁶.
2. La carpeta deberá contener todos los archivos con /sin procesar, obtenidos de la tomografía (e.g. .mpg, .dcm, .png, .txt, .raw). Cada sección de núcleo y los archivos pertenecientes a ella, deberá estar nombrada teniendo en cuenta su ID³⁷.
 - Una subcarpeta con los archivos .dcm crudos que incluya los fantasmas de adquisición, separados por niveles de energía (alta y baja).
 - Una subcarpeta con los archivos .dcm procesados que incluya los fantasmas de adquisición, separados por niveles de energía (alta y baja).
 - Una subcarpeta que contenga las películas en formato .mpeg. El nombre de la película debe ser igual al nombre de la sección correspondiente relacionada en profundidad.
 - Una subcarpeta de imágenes en alta resolución, que contenga los cortes XY, YZ y cilíndrica, cada imagen debe ser correspondiente a la profundidad.
 - Ejecutable de visualizador.
 - Una subcarpeta que contengan los registros RHOB y PEF, por cada sección, relacionados en profundidad.
 - Informe final en pdf.
 - **INFORME FINAL**

El informe final deberá contener como mínimo:

- Generalidades del proyecto (i.e. ubicación del pozo, dirección de escaneo, observaciones inventario de muestras).
- Información de adquisición (anexar **Tabla 7**)
- Un resumen de resultados (Un análisis facies generalizado)
- Gráfico cruzado coloreados por profundidad, debe hacerse por cada sección y por pozo.
- Gráfico cruzado coloreados por densidad poblacional, debe hacerse por cada sección y por pozo.
- Imágenes vectorizadas del registro compilado de RHOB y PEF por sección de núcleo y de pozo. Estos registros no deben incluir valores de RHOB y PEF pertenecientes a vacío.
- Imágenes de los cortes XZ, YZ y cilíndrica en alta resolución por cada sección. Descripción de la orientación de dichos cortes (una - I - página)

Los anexos deberán contener:

- Imágenes, vertical y cilíndrica, nombradas con la profundidad respectiva.
- Registros de RHOB y PEF nombradas con la respectiva profundidad.

³⁵ En la industria existen secciones mayores a 3 ft, para lo cual el laboratorio debe estar dotado de herramientas para este tipo de escaneos.

³⁶ Para la digitalización de imágenes solo es necesarios los DCM de alta energía.

³⁷ El ID de la sección debe contener el código del proyecto, el número del núcleo, la sección y la profundidad.

- Fotografías de la orientación de escaneo, deben ser nombradas con el ID de la sección.
- Resultados de la curva de calibración obtenidas del set de calibración en formato .xls.
- Se deberá entregar un archivo .txt, que incluya el conteo de archivos mediante un árbol de información (Ver **ANEXO VII**), y verificar la existencia y calidad de los datos³⁸.

Nota: En cuanto a la verificación de requisitos y entregables se debe tener en cuenta que los archivos pertenezcan a la sección correspondiente, que no contengan imperfecciones y realizar un conteo de manera que los archivos se encuentren completos.

³⁸ Para las películas se deberá reproducir una por una para comprobar que no tenga resaltos y que el etiquetado corresponda a la sección. En el caso de las imágenes de los cortes XZ, YZ, y cilíndrica, se verificará que pertenezcan a la sección y que este bien orientada (i.e. Tope y base).

8.10. INSTRUMENTACIÓN TECNOLÓGICA

(Ver **ANEXO VIII**)

8.10.1. Herramientas generales

- Balanza de plataforma de calidad de uso industrial (i.e. Gran display retroiluminado de 110x30mm y desplazable por 1 m. de cable del display a la plataforma).
- Cámara digital de alta definición (i.e. 1920x1080 p).
- Atornillador eléctrico.
- Mesa de acondicionamiento.
- Papel Aluminio.
- Rollo papel plástico.
- Toallas de papel.
- Almejas de PVC.
- Estibas.
- Estantería de cargas pesadas.
- Estantería de livianos.
- Neveras para refrigeración de núcleos.
- Computador para manejo de inventarios.
- Escritorios para PC.
- Cinta de enmascarar (48mmx40m; 24mmx40m; 18mmx40m).
- Marcadores permanentes.

8.10.2. Herramientas Tecnológicas (Hardware y Software)

8.10.2.1. Hardware

- Tomógrafo helicoidal multicorte, 64 cortes (e.g. Cuarta Generación en adelante).
- Reconstructor para visualización de archivos .dcm
- Estaciones de trabajo (Para procesamiento) con CPU de alto rendimiento.
- Display FullHD (1920x1080 px) o superior.

8.10.2.2. Software

- Software de reconstrucción .dcm para TAC.
- Software para conversión y transferencia de .dcm (e.g. Osirix/Clear Canvas).
- Software para segmentación y visualización de .dcm (e.g. Jimage, Pergeos, Dragonfly)
- Software para conversión de .dcm a RHOB y Pef/Zeff (e.g. VoxelCalc).

9. EXTRACCIÓN DE PLUGS EN SACANÚCLEO USANDO IMÁGENES DE CT

Nota Aclaratoria: La representación de los núcleos y mangas, mostradas en la presente metodología, así como los datos hallados fueron tomados de Pereira & Narváez (2016). Los autores consideraron los siguientes datos sintéticos, los cuales son independientes de la información obtenida por tomografía.

- Diámetro del núcleo: 4 in.
- Longitud del núcleo: 1 ft.
- Diámetro externo de la manga de aluminio: 5 in.
- Espesor de la capa de interés: 2 in.

El espesor de la capa de interés fue seleccionado para casos en donde el estrato es catalogado como de poco espesor, aproximándose éste a el diámetro de las brocas utilizadas para dicho fin. Para la manga de aluminio, se tomó como diámetro 5 in, teniendo en cuenta el tamaño del núcleo a trabajar. Las siguientes indicaciones deben ser realizadas teniendo en cuenta la información proporcionada por los registros de pozo y los reportes de tomografía.

Metodología I:

1. Por medio de la combinación de los registros de pozo con los cuales se cuente, (ejemplo: rayos gamma, potencial espontaneo, caliper, densidad total, fotoeléctrico, resistivos, entre otros) se debe seleccionar zonas de interés a ser muestreadas. Estas zonas seleccionadas, dependerán de la razón por la cual quieren ser estudiadas las muestras. Un ejemplo de las razones por las cuales se quiere estudiar un determinado intervalo es: se desea tener un mayor conocimiento de una posible zona productora por lo cual se necesita tener en cuenta propiedades como: porosidad, permeabilidad, saturación de fluidos, etc. Es necesario recalcar que no necesariamente siempre deben ser muestreadas zonas posiblemente productoras, si no también otras zonas que pueden servir para otros estudios como lo es la aplicación de métodos de recobro en los yacimientos, por lo que es necesario conocer las características de zonas donde se van a trabajar.
2. Luego debe realizarse un gráfico cruzado con los registros PEF y RHOB, adquiridos mediante tomografía, del cual se deben definir las diferentes facies que componen la zona analizada.
3. Una vez definidas las facies, se deben determinar las locaciones para la toma de muestras de tapón.
4. Las locaciones definidas, deben ser analizadas a través de las imágenes de tomografía, con el fin de detectar si hay fracturas o vugs, que pueden afectar la integridad de la muestra. Si se presenta estos casos, se debe descartar dichas zonas.
5. Inicialmente se debe tomar como referencia la película continua y verificar si es posible dar uso de esta. Para ello, se debe tener en cuenta, que la capa de interés ya definida se denote



a la hora de visualizar la película, de lo contrario es necesario utilizar la segunda opción planteada más adelante.

6. Una vez verificado el uso de la película se procede a revisar, si el contacto de las capas se encuentra paralelo al eje Y, esto indica que la capa de interés ya se encuentra como filo, si esto sucede debe dirigirse el paso 8, si no debe medir el rumbo de la capa respecto al eje y.
7. Teniendo en cuenta el ángulo medido, se procede a girar la manga, basado en que el contacto litológico debe formar 90° respecto a la horizontal, como se ilustra a en la **Figura 38**.

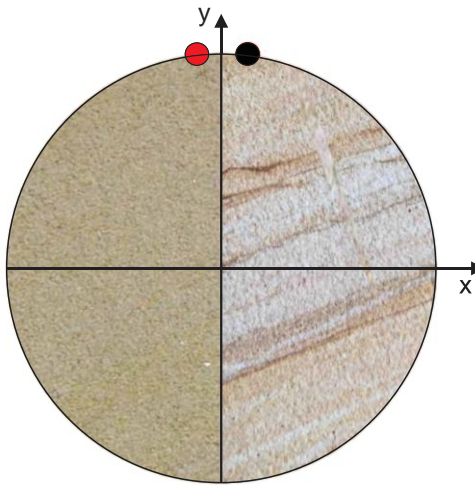


Figura 38. Ejemplo de contacto litológico, llevado a 90° respecto a la horizontal. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

Sin embargo, es importante recalcar, que el sentido de la rotación depende de las condiciones de los planos y vistas, con los cuales se esté trabajando, como se explica en la **Tabla I**.

8. Luego es necesario determinar la profundidad en el núcleo a la cual la broca debe estar ubicada (ver **Ecuación 2**), para obtener el plug del centro de la capa de interés y de esta forma asegurar que la muestra sea de un solo litotipo y cuente con una longitud equivalente al diámetro del núcleo (ver **Figura 39**).

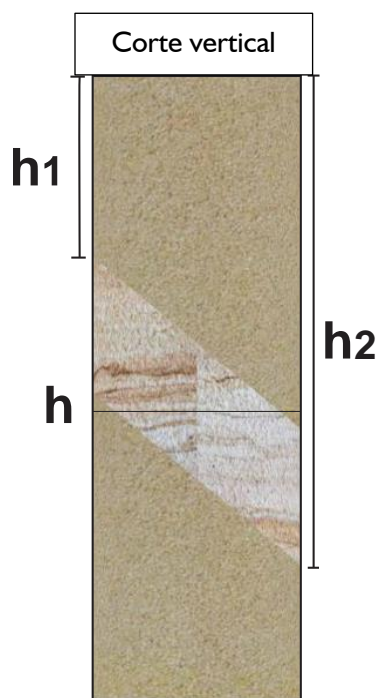


Figura 39. Imagen explicativa para hallar la profundidad a la cual extraer el plug. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

$$h = \frac{h2 - h1}{2} + h1 \quad (2)$$

Donde;

h: Distancia adecuada para la extracción del plug

h1: Distancia que hay entre el tope del núcleo y el tope de la capa de interés.

h2: Distancia del tope del núcleo y la base de la capa de interés.

9. Si el centro del núcleo y de la manga NO están alineados, prosiga al siguiente paso, de lo contrario diríjase al paso 11.
10. Una vez, determinada la profundidad a la cual se extraerá el plug, la manga debe ser desplazada horizontalmente en la superficie que lo soporta, para asegurar que el plug extraído cuente con una longitud equivalente al diámetro del núcleo.
11. Realizadas las indicaciones ya nombradas, se procede a extraer el plug, asegurando de esta manera la obtención de la muestra de un solo litotipo y con una longitud equivalente al diámetro del núcleo.

Metodología 2:

Nota aclaratoria: Esta metodología se aplica, en caso de que no sea posible utilizar la película continua, debido a que en algunas ocasiones la capa de interés no es distinguible fácilmente.

1. Realizar los primeros 4 pasos de la Opción I, luego se debe dirigir a la imagen cilíndrica y revisar si es necesario aplicar la metodología, considerando que el plano no se encuentra como filo.

Si la condición mencionada aplica a las imágenes cilíndricas que se tienen, se debe proceder al paso 6, de lo contrario prosiga al siguiente paso.

2. Tomar la medida del ángulo en la imagen cilíndrica, que forma el punto máximo y mínimo de la senoide, como se ilustra en la **Figura 40**.

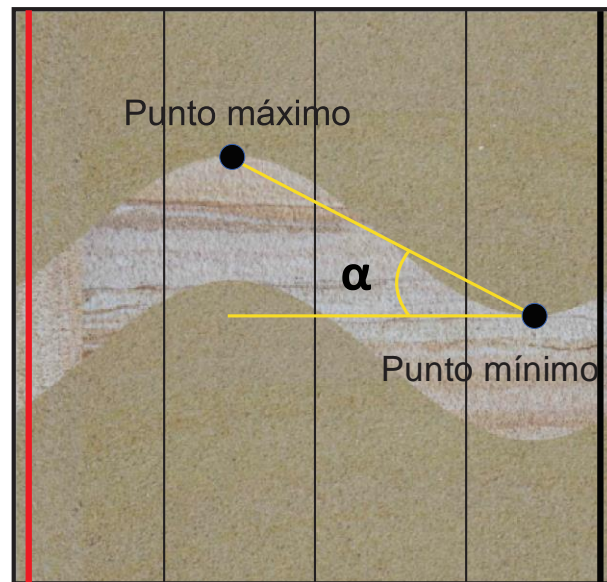


Figura 40. Ejemplo de la toma del ángulo alfa en la imagen cilíndrica. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

Una vez hallado el ángulo, se procede a determinar el buzamiento real a partir de la **Ecuación 3**.

$$B_z = \frac{-0.4221 + \sqrt{\frac{5.977 + \alpha}{41.667}}}{0.012} \quad (3)$$

Corrección para buzamientos menores o iguales a 20° se implementa la **Ecuación 4**.

$$B_z = \frac{-0.728 + \sqrt{\frac{62.4363 - \alpha}{119.05}}}{-0.0042} \quad (4)$$



α es el ángulo obtenido uniendo el punto más alto de la curva con el punto más bajo medido desde la horizontal, este ángulo siempre es menor que el Buzamiento real.

Los cálculos para determinar el buzamiento real a través de las **Ecuaciones 3 & 4**, podrán ser desarrollados por medio de un programa portable.

3. Luego debe ser tomada la medida del buzamiento aparente en la imagen vertical como se ve en la **Figura 41**. El corte vertical puede ser frontal/posterior o corte lateral derecha/izquierda (éste es indicado en el reporte de la empresa encargada).

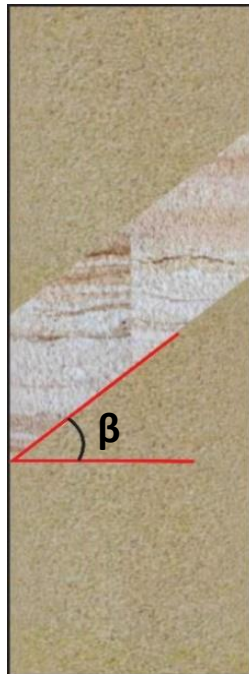


Figura 41. Ejemplo de la toma del buzamiento aparente medido en el corte vertical. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

4. Teniendo en cuenta los dos valores anteriormente mencionados (i.e. buzamiento aparente y real) y dependiendo del corte vertical con cual se cuente, se seleccionará la gráfica correspondiente para así determinar el ángulo con el cual debe ser girada la manga.

Si la imagen vertical es un corte frontal/posterior, implementar la **Figura 42**. Por otro lado, si la imagen vertical es un corte lateral izquierdo/derecho, usar la **Figura 43**.

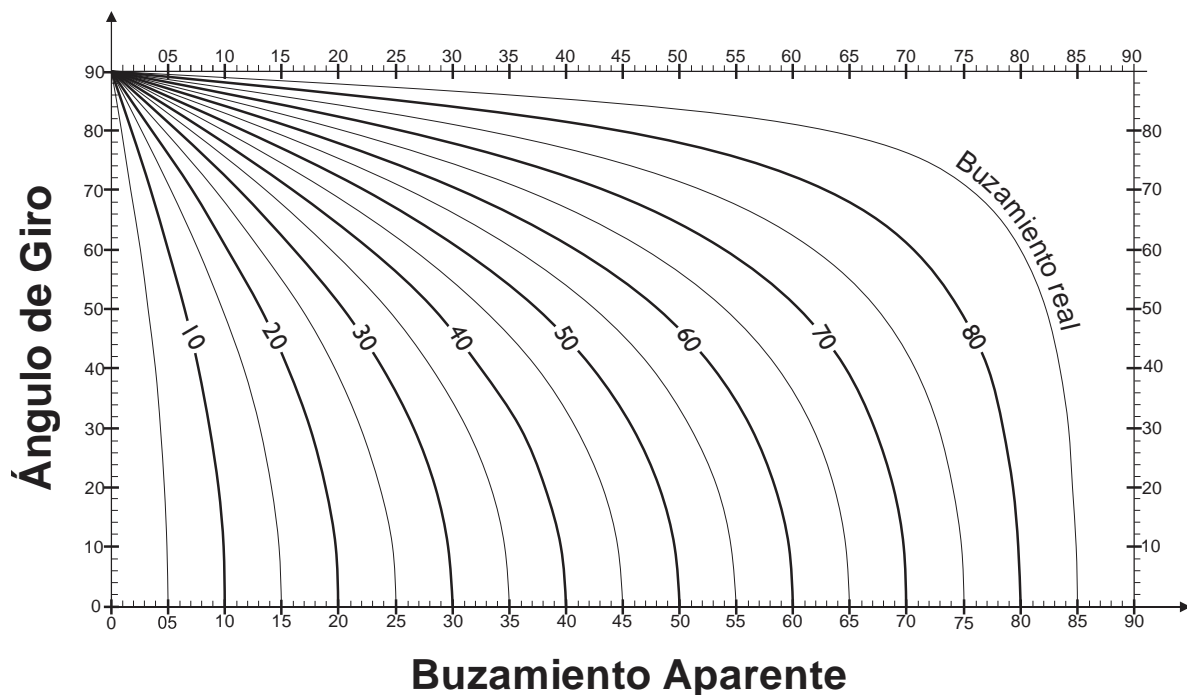


Figura 42. Gráfica para hallar el ángulo a rotar para el corte XZ. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

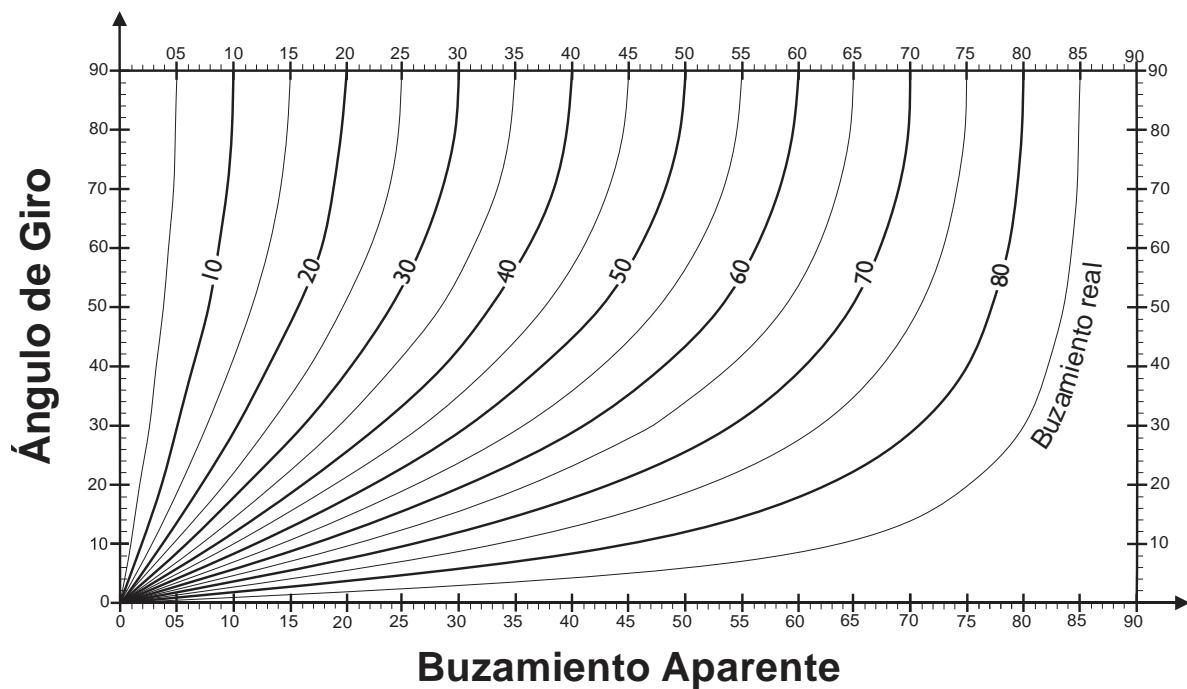


Figura 43. Gráfica para hallar el ángulo a rotar para el corte YZ. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

El ángulo de giro puede ser expresado en longitud de arco, para facilitar el procedimiento de la rotación de la manga, para ello se debe utilizar la **Ecuación 5**.

$$L_{arco} = \frac{2\pi * r * \theta}{360} \quad (5)$$

5. Después de conocer el valor a girar, se procede a identificar el sentido de rotación teniendo en cuenta la concavidad que existe en la senoide entre las líneas que representan 0 y 1/2 de la imagen cilíndrica.
 - Si la senoide tiene concavidad hacia arriba, indica la presencia de un mínimo, ya sea de 0 – 1/4 o 1/4 -1/2 de la imagen cilíndrica (Ver **Tabla 1.a.**).
 - Si la senoide tiene concavidad hacia abajo, indica la presencia de un máximo, ya sea de 0 – 1/4 o 1/4 -1/2 de la imagen cilíndrica (Ver **Tabla 1.b.**).
6. Luego es necesario determinar la profundidad en el núcleo a la cual la broca debe estar ubicada, para obtener el plug del centro de la capa de interés. Para un mayor entendimiento, dirigirse a la **Figura 39** y utilice la **Ecuación 2**.
7. Una vez, determinada la profundidad a la cual se extraerá el plug, la manga debe ser desplazada horizontalmente en la superficie que lo soporta, para asegurar que el plug extraído cuente con una longitud equivalente al diámetro del núcleo.
8. Realizada las indicaciones ya nombradas, se procede a extraer el plug, asegurando de esta manera la obtención de la muestra de un solo litotipo y con una longitud equivalente al diámetro del núcleo.

Nota: Es importante recalcar, que para estratificaciones más complejas como lo es el caso de la estratificación cruzada en artesa, también es posible dar uso de la presente metodología, ya que este tipo de estratificación igualmente tendrá una posición en la cual, la capa estará como filo.

Tabla I. a. Indicación de sentido de giro respecto a la vista axial y las líneas de orientación. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

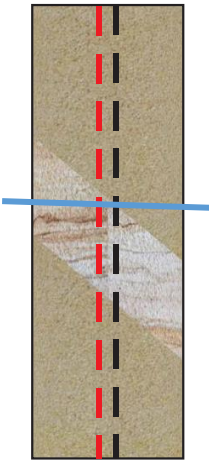
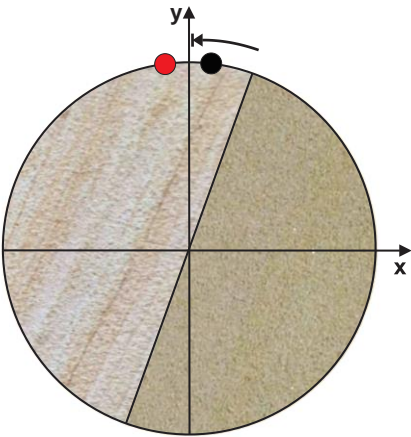
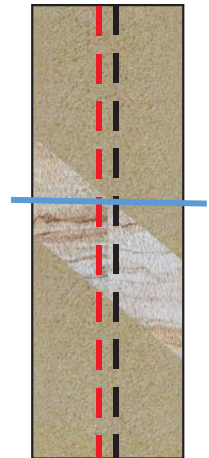
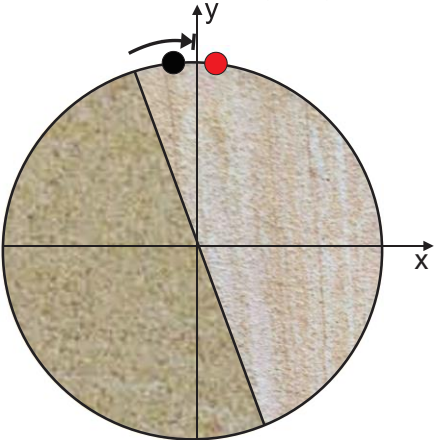
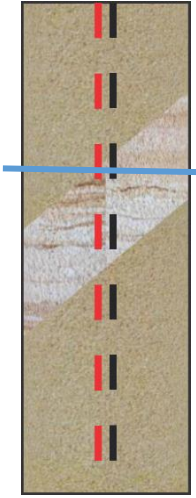
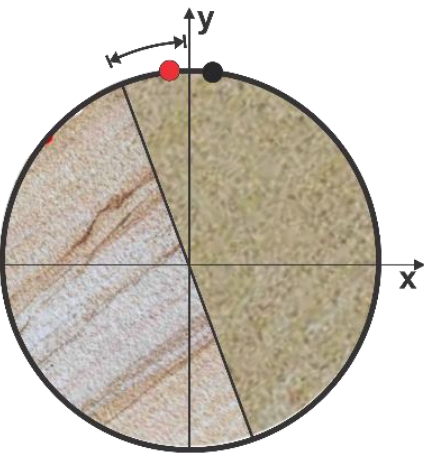
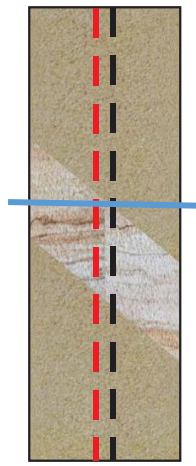
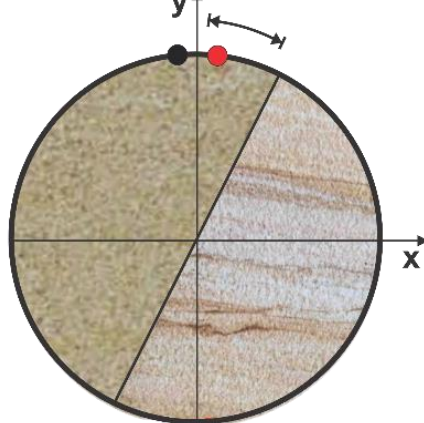
Corte vertical (Plano XZ-Vista posterior)	Vista axial	Sentido de giro respecto a la vista axial	Sentido de giro respecto a las líneas de orientación de la manga
	<p>Hacia el tope (XY-1)</p> 	Hacia la línea roja	Hacia la línea roja
	<p>Hacia la base (XY-2)</p> 	Hacia la línea roja	Hacia la línea roja


Tabla I.b. Indicación de sentido de giro respecto a la vista axial y las líneas de orientación. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

Corte vertical (Plano XZ-Vista posterior)	Vista axial	Sentido de giro respecto a la vista axial	Sentido de giro respecto a las líneas de orientación de la manga
	<p>Hacia el tope (XY-1)</p> 	Hacia la línea negra	Hacia la línea negra
	<p>Hacia la base (XY-2)</p> 	Hacia la línea negra	Hacia la línea negra

10. ENTREGA DE NÚCLEOS

FORMULARIOS

Toda información que se entregue a la ANH-SGC en el marco del manual de entrega debe estar acompañada de una comunicación en papel membretado y debidamente firmada por un representante autorizado de la compañía operadora (Ver **Figura 44**). Asimismo, deberán ir incluidos el nombre de la Contratista, nombre del transportista, datos generales de la unidad, fecha y hora aproximada de llegada del material y deberá incluir el Formato de Entrega de Corazones (Ver **Figura 45**) correctamente elaborado; este mismo deberá ser entregado en físico por el transportista junto con evidencia fotográfica del material transportado para mayor facilidad de inspección.



ANH
AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS

**PROSPERIDAD
PARA TODOS**

CARTA DE ENTREGA
(Papel con logo, dirección, teléfono)

Bogotá, D. C., ____ de ____ de 20 ____.

Señores:
EPIS -ANH.
Av. Calle 26 No. 59-65 Piso 2
Bogotá D. C.

Referencia: Entrega de Información Contrato XXXXX

Por medio de la presente hacemos relación de la entrega de información, obtenida dentro del contrato XXXX, celebrado entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos y XXXX, para realizar XXX (actividad a realizar nombre pozo-programa sísmico).

Relación de medios	
Medios a entregar	Cantidad de medios a entregar
FOLDER/INFORME	xx
CD	xx
DVD	xx
DISCO DURO	xx
USB	xx

De los medios antes relacionados, los productos entregados se especifican en el listado adjunto.

Cordialmente,

Nombre:
Cargo:
Teléfono de contacto:
Correo electrónico de contacto:
Dirección:

Con copia a: **Vicepresidencia Técnica (sin anexos).**
Vicepresidencia de contratos de hidrocarburos (sin anexos).

Avenida Calle 26 No. 59-65 Piso 2 - PBX: (571) 5931717 - Fax (571) 5931718 - Bogotá, Colombia
| www.anh.gov.co | info@anh.gov.co | Código Postal: 111321

45 de 85





Figura 44. Carta remisoría a ANH-SGC. Tomado de (ANH, 2013).

FORMATO DE ENTREGA DE CORAZONES:

Es importante que las Compañías tengan en cuenta que las muestras que lleguen a la Litoteca sin la identificación requerida serán rechazadas y devueltas al Contratista.

El transportista deberá permanecer durante el proceso de verificación por si se presentara el rechazo de una parte o de todo el material a recibir. Únicamente se aceptará la entrega de materiales en los horarios establecidos por la Agencia Nacional de Hidrocarburos.



ANH
AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS
COLOMBIA

ENTREGA DE CORAZONES CONVENCIONALES

**LOGO
OPERADOR**

CUENCA: _____ PROYECTO: _____

POZO: _____ OPERADOR: _____ CORAZONADOR: _____

COORDENADAS	LATITUD:	NORTE:	ORIGEN:
	LONGITUD:	ESTE:	FECHA:

INFORMACIÓN RELACIONADA CON EL POZO										TOMOGRFIA		CORE GAMMA		FOTOGRAFIA		
CORE/ CORRIDA	SECCIÓN/ TUBO	CAJA	PESO [Kg]	LONGITUD [ft]	DIAMETRO [in]	TOPE [ft]	BASE [ft]	INTERVALO [ft]	FORMACIÓN	% DE RECUPERACIÓN	DOBLE ENERGÍA CT		SI	NO	LUZ UV	LUZ BLANCA
											High	Low			ID, PROFUNDIDAD	ID, PROFUNDIDAD

TOTAL PIES PERFORADOS: _____ TOTAL PIES RECUPERADOS: _____

PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN: _____

COMENTARIOS GENERALES:	
Profundidad Inicial (ft)	Total Core
Profundidad Final (ft)	Total Cajas

Figura 45. Formato de inventario de núcleos en pozo. Modificado de (ANH, 2013).

OBSERVACIONES

Los núcleos podrán ser caracterizados antes de ser entregados a la Litoteca dentro de los plazos establecidos, mientras no hayan alterado el estado físico del núcleo más allá del eslabado permitido.

Una vez sea caracterizado el núcleo y si la operadora requiere hacer análisis (e.g. petrofísica básicas y especiales), podrá ser intervenido para extracción de plugs, siempre y cuando el núcleo sea \geq a 2,5 pulgadas de diámetro y el intervalo no sea inferior a un (1) pie³⁹. Se recomienda que dichos tapones o “plugs” se tomen antes de realizar el corte longitudinal de cada uno de los corazones (i.e. slabbing). Una vez extraídos, el núcleo debe ser eslabado y estabilizado para garantizar su integridad. Los tapones deben entregarse acompañados de una relación de análisis realizados con sus respectivos resultados de acuerdo con el numeral 2.3.1. del manual de entrega de información del EPIS. Cuando los tapones tomados de los corazones o muestras de superficie sean sometidos a análisis de carácter destructivo, debe entregarse un reporte de tal situación a la Litoteca Nacional.

³⁹ En la actualidad se debe hacer uso de la CT para la selección de intervalos de interés en los núcleos, para posteriormente, realizar la extracción de plugs.

"Las corridas deberán ser entregadas a la Litoteca Nacional con porcentajes de recuperación no mayores al 100%

EXCEPCIONES

Solo en casos extremos será permitido la ausencia y/o intervalos de muestras durante la recuperación de las mismas:

- Muestra no recuperada debido a pérdida de circulación, por lo que se deberá indicar los intervalos dónde ocurre este caso.
- En aquellos casos donde se desvía el lodo para circular con seguridad y no se pueden recuperar rípios de perforación.
- Cuando la muestra esté compuesta principalmente de algún material no representativo de la formación, se debe enviar una muestra lo más significativo posible separándola del material extraño. En estos casos es posible aceptar menos muestras que la especificada en esta sección.
- Si existe un caso no mencionado aquí se deberá enviar un documento con una explicación de la ausencia de las muestras con evidencias fotográficas cuando sea posible.

ENTREGA DE INFORMACIÓN DIGITAL

La información digital asociada a núcleos convencionales que deberá entregar el contratista se enuncia más no se limita a lo siguiente:

- Servicios de descripción macroscópica.
- Descripción del tipo de litología.
- Copias digitales de la foto-documentación de los núcleos en diámetro completo.
- Fotografías bajo luz blanca y ultravioleta.
- Registro Core Gamma Spectral siguiendo el formato de entrega de información del EPIS.
- Informe técnico de perforación (i.e. tipo de lodos, porcentaje de recuperación, compañía de corazonamiento, fechas de inicio y terminación del corazonamiento).

La información deberá entregarse en conjunto con un formato de descripción de núcleos según disponga la operadora.

II. INSTRUMENTACIÓN Y MATERIALES PARA PRESERVACIÓN

- Mesa
- Bases de trabajo/burros metálicos.
- Canaletas de PVC diferentes diámetros.
- Cajas azules.
- Sierra de tajada grande con hoja de diamante.
- Sierra de guarnición con hoja de diamante.
- Prensa taladradora con brocas de núcleos de diamante, capaces de perforar muestras cilíndricas.
- Afilador para cuadrar los extremos de los tapones.
- Bombas de fluido para llevar diferentes refrigerantes (e.g. salmuera, aceite, aire, agua, N₂ líquido) a las superficies de cortado.
- Medios de marcado indeleble tal como tinta india.
- Hornos para derretir parafina.
- Taladro manual.
- Solución espuma para *liners*
- Solución epóxica.

12. REFERENCIAS

ALS CORING, 2011. METODOLOGÍA PARA EL MANEJO Y PRESERVACIÓN DE CORAZONES DE POZOS TIPO SLIM HOLE. APLICACIÓN CUENCA CAUCA-PATÍA. Bucaramanga: Tesis de pregrado. Univeridad Industrial de Santander.

ALSGLOBAL, 2017. ALSGLOBAL. [En línea]

Available at: <https://goo.gl/N3KL6U>

[Último acceso: 28 09 2017].

Anderson, S., Peyton, R., Wigger, J. & Gantzer, C., 1992. Influence of aggregate size on solute transport as measured using computed tomography. s.l.:Geoderma 53, 387–398..

ANH, 2013. Resolución 183 de 13 de Marzo de 2013. Agencia Nacional de Hidrocarburos ed. s.l.:s.n.

ANP, 2000. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. [En línea]

Available at: <https://goo.gl/wx8j7b>

[Último acceso: 05 2017].

ANP, 2014. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. [En línea]

Available at: <https://goo.gl/QtRHym>

[Último acceso: 05 2017].

API, 1998. Recomend Practices for Core Analysis. s.l.:s.n.

Ariza, E. & Buendia, H., 2010. METODOLOGÍA PARA EL MANEJO Y PRESERVACIÓN DE CORAZONES DE POZOS TIPO SLIM HOLE., Bucaramanga: s.n.

ASTM, 1992. Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging ASTM Designation E 1441-92a. s.l.:Annual Book of ASTM Standards, Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures. ASTM, Philadelphia pp. 690–713..

Barret , J. & Keat, N., 2004. "Artefacts in CT: Recognition and Avoidace", Radiographics. En: s.l.:s.n., pp. 1679-1691.

Bartuschat, D. y otros, 2009. A parallel K-SVD implementation for CT image denoising. Lehrstuhl für Informatik 10 (Systemsimulation), pp. 1-26.

Campbell, W. & Gay, F., 1989. Core Handling Procedures Used for the Cajon Pass, California, Deep Drilling Experiment, California: s.n.

Carlson, W. & Denison, C., 1992. Mechanisms of porphyroblast crystallization: results from high-resolution computed X-ray tomography. s.l.:Science 257, 1236–1239..

Codding, E. & Alwaler, J., 1986. Application of Core hydrocarbon Logging. s.l.:En Society Petroleum Engineers, SPE 863720.

Cornwall, C. K., 1990. Core preservation—an alternative approach. In: Proceedings of the First, s.l.: s.n.

Coursey, C. & Frush, D. P., 2008. Applied Radiology. [En línea]
Available at: <https://shar.es/IBIInU>

Denison, C., Carlson, W. & Ketcham, R., 1997. Threedimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography: Part I. Methods and techniques. s.l.:Journal of Metamorphic Geology 15 (1), 29–44..

Filler, A. G., 2009, July. The history, development and impact of computed imaging in neurological diagnosis and neurosurgery: CT, MRI and DTI. s.l.:s.n.

Gonzalez, M., 2012. INSTRUCTIVO TECNICO DE ENSAYO TOMOGRAFIA DE NUCLEOS, Bogota: s.n.

Gonzalez, R. & Wood, R., 2002. Digital Image Processing,. s.l.:s.n.

Hansel, W., 1973. Core Analysis For Optimum Reservoir Exploitation. s.l.:En Society of Petroleum Engineers, - SPE 4494-MS.

Hejis, A., De Lange, J., Schoute, J. & Bouma, J., 1995. Computed tomography as a tool for non-destructive analysis of flow patterns in macroporous clay soils. s.l.:Geoderma 64, 183–196..

Hunt, P., Engler, P. & Bajsarowicz, C., 1988. Computed tomography as a Core Analysis Tool: Applications, Instrument Evaluation and Image Improvement Techniques. s.l.:Journal of Petroleum Technology, pp. 1203-1210..

Iassonov, P., 2009. Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: A crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures.

JAVINF, 2016. ct101blog. [En línea]
Available at: <https://goo.gl/GMHx5f>

Ketcham, R. & Carlson, W., 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. Computers & Geosciences.

Ketcham, R., 2005. Computational methods for quantitative analysis of three-dimensional features in geological specimens. s.l.:s.n.

Ketcham, R. & Carlson, W., 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. s.l.:Computers & Geosciences 27, pp 381-400.

Kretz, R., 1966. Grain size distribution for certain metamorphic minerals in relation to nucleation and growth. s.l.:Journal of Geology 74, 147–173..

Kretz, R., 1969. On the spatial distribution of crystals in rocks. Lithos 2, 39–66. ed. s.l.:s.n.

Lake, L. & Helfferich, F., 1978. Cation Exchange in Chemical Flooding: Part 2: The effect of Dispersion, Cation Exchange, and Polymer/Surfactant Adsorption on Chemical Flood Environment. s.l.:SPE Journal, vol. 18, no. 6, pp. 435-444.

McPhee, C., Reed, J. & Zubizaretta, I., 2015. Core Analysis A Best Practice Guide. Elsevier. Developments in Petroleum Science Volume 64 ed. s.l.:s.n.

Nicholas, J. J., 2010. Ceessentials. [En línea]

Available at: <https://goo.gl/rvrHUF>

[Último acceso: 28 06 2017].

Niu, B., 2010. CO₂ flooding in chalk Reservoir; Experiments with X-Ray Computed Tomography and Reactive Transport Modeling. s.l.:Tesis Doctoral. Technical Universitu of Denmark.

Orsi, T. & Anderson, A., 1995. X-ray computed tomography of macroscale variability in sediment physical properties offshore Louisiana.. s.l.:In: John, C.J., Byrnes, M.R. (Eds.), Transactions of the Forty-Fifth Annual Convention of the Gulf Coast Association of Geological Societies. Gulf Coast Association of Geological Societies, New Orleans, pp. 475–480..

Orsi, T., Edwards, C. & Anderson, A., 1994. X-ray computed tomography: a nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores. s.l.:Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes 64 (3), 690–693..

Ortiz, A., Plata, J., Herrera, E. & Santos, N., 2015. CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA DE ROCAS POR MEDIO DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X. FUENTES - EL REVENTON ENERGETICO.

Pal, N. & Pal, K., 1993. A review on image segmentation techniques, Pattern Recognition. s.l.:s.n.

Pereira, Z. & Narváez, C., 2016. Metodología para la extracción de plug en núcleos preservados en mangas utilizando imágenes de tomografía axial computarizada.. Bucaramanga: Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

Pérez, A., 2005. MANUAL PARA EL CONTROL GEOLÓGICO EN LA PERFORACIÓN DE POZOS PRODUCTORES DE GAS Y PETRÓLEO MEDIANTE EL USO DE MICROPALAEONTOLOGÍA Y SEDIMENTOLOGÍA. Universidad Autonoma de San Luis Potosí ed. San Luis Potosí: s.n.

Peyton, R., Haeffner, B., Anderson, S. & Gantzer, C., 1992. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. s.l.:Geoderma 53, 329–340.

Pillado, C., 2016. TESIS - TECNOLOGÍAS PARA EL CORTE, MANIPULACIÓN, PRESERVACIÓN Y ANÁLISIS DE NÚCLEOS EN POZOS PETROLEROS. s.l.:UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO - FACULTAD DE INGENIERIA.

Pope, G. & Lake, L., 1978. Cation Exchange in Chemical Flooding: Part 1: Basic Theory without Dispersion. s.l.:SPE Jorunal, vol. 18, no 6, pp. 418-434.

Schlumberger, 2013. Los núcleos en la evaluación de formaciones. s.l.:Oil field review.

Schreurs, G. & Hanni, R., 1998. 4-D analysis of analogue model experiments.. s.l.:American Association of Petroleum Geologists Bulletin 82 (10), 1965..

Seeram, E., 1994. Computed Tomography-Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control. s.l.:s.n.

Sezgin , M. & Sankur, B., 2004. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. s.l.:s.n.

Siddiqui, S. a. K., 2004. Dual-Energy CT-Scanning Applications in Rocks Characterization. SPE, pp. 1-9.

TSID, 2017. TSID.net. [En línea]
Available at: <https://goo.gl/Uve8nq>

UIS & ANH, 2011. INFORME FINAL ANH CAUCA PATIA, CAUCA: s.n.

UNLP, 2017. UNLP. [En línea]
Available at: <https://goo.gl/tRJD4b>
[Último acceso: 05 2017].

Valentine, S. & Norbury, D., 2016. Measurement of total core recovery; dealing with core loss and gain. Geoscience World.

Walsh, M., Bryant, S., Schechter, R. & Lake, L., 1984. Precipitation and Dissolution of solids Attending Flow through Porous Media. s.l.:AIChE Journal, vol. 30, no. 2, pp. 317-328.

Wellington, S. & Vinegar, H., 1987. X-ray computerized tomography. s.l.:Journal of Petroleum Technology 39 (8), 885–898..

Withjack, E., 1988. Computed tomography for rockproperty rockproperty determination and fluid-flow visualization. s.l.:SPE Formation Evaluation 3 (4), 696–704..

Yeh, G. & Tripathi, V., 1989. A critical Evaluation of Recent Developments in Hydrogeochemical Transport Models of Reactive Multichemical Components. s.l.:Water Resources research, vol. 25, no. 1, pp. 93-108.

Zeng, Y., Gantzer, C., Peyton, R. & Anderson, S., 1996. Fractal dimension and lacunarity of bulk density determined with X-ray computed tomography. s.l.:Soil Science Society of America Journal 60, 1718–1724.

ANEXO I

PANORAMA LEGAL A NIVEL INTERNACIONAL Y NACIONAL

El análisis de núcleos juega un vital rol en el desempeño de programas de perforación, convirtiéndose en una actividad de gran relevancia para la caracterización estática de la roca. Los programas de perforación de campos bien concebidos y los procedimientos posteriores, proporcionan una base sólida para las estimaciones de reservas y modelización de yacimientos (Hansel, 1973; Coddling & Alwaler, 1986). Estas muestras pueden ser extraídas de distintas formas, una de ellas es mediante la extracción de núcleos de perforación. El corazonamiento de núcleos, es la operación de corte y remoción de una muestra cilíndrica de la roca del pozo, la cual puede o no ser parte del yacimiento. Aunque el corazonamiento es una operación muy costosa, la extracción de estos núcleos se realiza debido a que proporciona información relevante para el estudio del reservorio. En la mayoría de los casos, la manipulación y preservación de las muestras se hace siguiendo la norma API RP 40.

En algunos países el almacenamiento de las muestras extraídas del subsuelo está a cargo de un ente gubernamental, en otros, las empresas de servicios u operadoras son las encargadas del almacenamiento. En los países donde la entidad gubernamental es la encargada de almacenar las muestras existen regulaciones relacionadas con el tipo de información asociada a estas. Tal es el caso de la “AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS” en Brasil, la cual enmarca por medio de la resolución No. 30 de 2014 (ANP, 2014), en continuidad con la estipulada en la Portaria No.259 de 2000 (ANP, 2000), el “REGLAMENTO TÉCNICO DEL PLAN DE EVALUACIÓN DE DESCUBRIMIENTOS DE PETRÓLEO O GAS NATURAL Y DEL RESPECTIVO INFORME FINAL”, acerca de la documentación a disponer en un programa de perforación. Asimismo, se realizan recomendaciones referidas a los métodos de evaluación de las muestras, entre ellos, la Tomografía Computarizada, consignado en el Apartado 4: “PLAN DE EVALUACIÓN DE CONTENIDO”, en relación a los requerimientos mínimos que debe contener El plan de evaluación de descubrimiento de Petróleo y gas natural, sección 4.1.4: “Programa de evaluación, descripción de las actividades previstas para la evaluación del descubrimiento, tomando nota de compromisos en firme y compromisos contingentes”, código e: “otros métodos o técnicas que se harán durante la evaluación de descubrimiento (por ejemplo, **Tomografía Computarizada**, perfiles de resonancia sísmica, análisis AVO , etc.)”. En contraste, en Colombia, la entidad reguladora, la Agencia Nacional de Hidrocarburos, por medio de la resolución No. 183 de 13 de Marzo de 2013, adopta el Manual de Entrega de Información Técnica de Exploración y Producción. Asimismo, queda reglamentado el uso de Tomografía computarizada para la evaluación de las muestras de perforación, referido al anexo 3: “ENTREGA DE MATERIAL GEOLÓGICO A LA LITOTECA NACIONAL”, Apartado 2: “CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA”, sección 2.2: “Muestras obtenidas de la Perforación de Pozos”, numerales 2.2.1 y 2.2.2, lo cuales describen tanto para muestras de diámetros superiores, iguales e inferiores a 4 pulgadas la implementación CT: “...deberán someterse a un proceso de escaneo con **tomógrafos digitales de rayos X de alta resolución** que garanticen información en **dos niveles de energía** que permitan diferenciar **densidades absolutas y número atómico efectivo** en un rango **mayor a 1500 tomografías por metro lineal de corazón**”. En la **Tabla 2**, se relacionan algunos países que tienen una entidad reguladora.

Tabla 2. Países con regulación para la entrega de información de núcleos

País	Entidad Reguladora	Fuente	Observación
Canadá	Canada Government	https://goo.gl/MUu06u	No menciona el uso de CT
Brasil	AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS	https://goo.gl/lgpKDN	RESOLUCIÓN ANP No. 31 de 2011 : Recomenda implementar tomografía
Colombia	Agencia Nacional de Hidrocarburos	https://goo.gl/VzcAmG	RESOLUCIÓN No. 183 DE 13 MARZO DE 2013.

En la **Tabla 3** se relacionan los países que no tienen una entidad que regule el almacenamiento de núcleos y su respectiva información, por lo cual, no presentan una estandarización legal para el cumplimiento de las misma, siendo los entes privados los figurantes, de acuerdo con las necesidades del cliente.

PANORAMA EMPRESARIAL A NIVEL INTERNACIONAL Y NACIONAL

En la actualidad, diversas empresas de capital privado ofrecen servicios para la caracterización estática de la roca, por medio de CT, microCT, y SEM. En la **Tabla 4** se evidencian las empresas a nivel global que ofrecen los servicios anteriormente mencionados.

Tabla 3. Países sin regulación para la entrega de información de núcleos

País	Entidad Reguladora	Fuente
Abu Dhabi	Supreme Petroleum Council	https://goo.gl/wr7cZp
Francia	Total	https://goo.gl/80XERl
E.E.U.U. - Texas	Railroad Commission	https://goo.gl/GwQchP
E.E.U.U. - Oklahoma	Oklahoma Corporation Commission	https://goo.gl/rFYd4k
Reino Unido	Oil and Gas Authority Government	https://goo.gl/8YHd2o
Australia	National Offshore Petroleum, Enre Ejecutor	https://goo.gl/bhr8lt
	The Australian Petroleum Production & Exploration Association	https://goo.gl/xlZzNh
Argentina	Poder ejecutivo de la república, Ministerio de energía y minería.	https://goo.gl/N0URz3

Tabla 4. Panorama empresarial a nivel internacional y nacional

Empresas	Servicios			Sede	Fuente
	CT	MicroCT	SEM		
Weatherford	x	x	x	E.E.U.U.	https://goo.gl/rQnk8x
SLB	X			E.E.U.U., Canadá	https://goo.gl/mVoYQd
Corelab	x	x		E.E.U.U., Colombia, Abu Dhabi, Canadá, Escocia, Australia	https://goo.gl/4wgtlt
Ingrain	x	x	x	E.E.U.U., Brasil, Abu Dhabi	
FEI	X	X	X	E.E.U.U., Abu Dhabi, Australia, Singapur	https://goo.gl/WgeuuD
ALS	X			E.E.U.U., Reino Unido	https://goo.gl/8Lo4SE

Intertek x

Reino Unido

<https://goo.gl/6mtZp7>

En la **Figura 46** y **47**, se conceptualiza lo enmarcado en las anteriores tablas.



Figura 46. Panorama Legal internacional y nacional referente a la evaluación de núcleos.

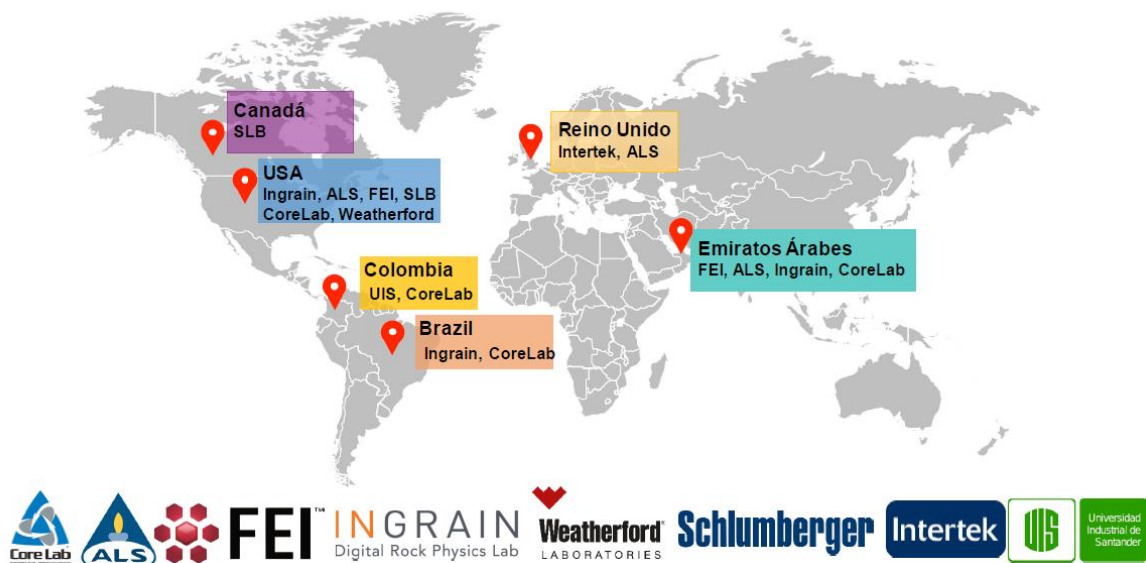


Figura 47. Empresas prestadoras de servicios de CT a nivel mundial.

ANEXO II

Tabla 5. Control Calidad de Imagen.

Pruebas de calibración	Mínimo/Máximo		Descripción
Número CT	-4,00	4,00	Promedio CT.
Uniformidad CT	-4,00	4,00	Máxima desviación CT en el centro del ROI.
Ruido	2,10	2,90	Desviación estándar CT.
Contraste de baja energía (mm)	3,00	5,00	Diámetro mínimo del pin en mm para contraste 0,3%.

Importante: Los parámetros para crear el protocolo dentro del aplicativo del tomógrafo son: Helicoidal, Voltaje: 120kV, 16 x 0,625, SW 10 mm, 0,75 segundos, 250mAs, resolución estándar, FOV: 250 mm.

ANEXO III

ESPECIFICACIONES DE LA CUNA

Se debe contar con una cuna construida con materiales de baja densidad (e.g. madera, policarbonato) de 120cm de largo, para posicionamiento de muestras/núcleos de roca. La cual contará con 3 fantasmas para adquisición, dispuestos de manera longitudinal (XZ), que deberán tener una longitud de 3 ft. Se debe garantizar que la muestra a escanear posea dichos fantasmas.

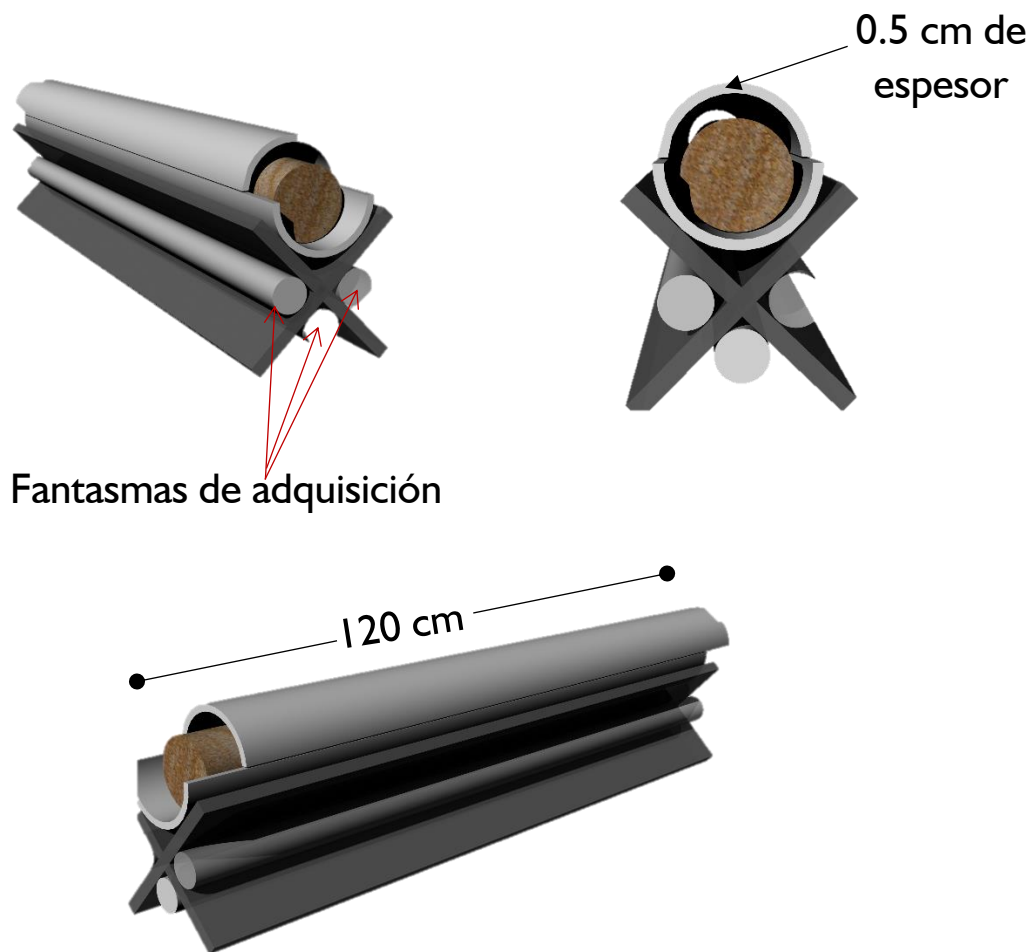


Figura 48. Planta y Perfil de la cuna.

GENERALIDADES DE LA TOMOGRAFIA COMPUTARIZADA: ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

La tomografía computarizada (CT) de rayos X es una tecnología establecida y en rápida evolución de valor probado para las investigaciones geológicas. Debido a su origen fuera de las ciencias de la tierra, el potencial para la aplicación de imágenes de CT a problemas relacionados con la caracterización estática de rocas ha despertado gran interés. Este informe proporciona una comprensión de los rudimentos de la CT de rayos X, la instrumentación y los métodos de exploración que se pueden optimizar para las tareas particulares en proyección de imagen, y los parámetros que influyen en el uso apropiado de los datos de la CT, junto con una descripción de varias aplicaciones geológicas implementadas y actuales de la CT de rayos X.

La CT proporciona visualización y caracterización tridimensional no destructiva, creando imágenes que mapean la variación de la atenuación de rayos X dentro de los objetos, que se relaciona estrechamente con la densidad. Debido a que las transiciones de densidad generalmente corresponden a los límites entre materiales o fases, estos datos son a menudo sencillos e intuitivos para que sean interpretados. Las imágenes son comúnmente análogas a los datos que se obtendrían de manera más tediosa y laboriosa con secciones en serie. Además, como los datos son digitales, el método se presta más fácilmente para el análisis cuantitativo (Ketcham & Carlson, 2001). Un ejemplo es proporcionado por estudios centrados en el análisis cuantitativo de texturas metamórficas. Desde los años sesenta, se ha reconocido que los tamaños y la disposición espacial tridimensional de los porfidoblastos en las rocas metamórficas, contienen información sobre los procesos a escala atómica, que controlan la nucleación y el crecimiento de los cristales (Kretz, 1966; Kretz, 1969). Kretz (1993) adquirió los datos requeridos sobre el tamaño de los cristales y las ubicaciones del granate por disección mecánica de una roca, usando un cincel y un cepillo de acero, mientras que registraba las posiciones de cada uno de los porfidoblastos encontrados. Se localizaron, midieron y analizaron un total de 91 cristales. En contraste, la tomografía computarizada de rayos X de alta resolución, también se ha utilizado para revelar la ubicación de los porfidoblastos de granate en varias rocas (Carlson & Denison, 1992; Denison, et al., 1997). Cada uno fue escaneado en pocas horas, y el análisis de los datos requirió sólo unas pocas semanas, una vez que el proceso computacional fue simplificado. El número de cristales medidos en una sola muestra osciló hasta 12,000; tales números son importantes, ya que los análisis de las pruebas estadísticas aplicadas a los datos indican que al menos 1000 cristales deben medirse para asegurar resultados precisos (Denison et al., 1997). Además, las rocas se mantuvieron disponibles para estudios adicionales, tales como análisis de microscopio electrónico de cristales seleccionados (e.g. Chernoff y Carlson, 1997, 1999).

La CT fue inicialmente desarrollada para el uso extenso en la medicina para la proyección de imagen de los tejidos blandos y del hueso, no obstante, la CT de la radiografía se amplió posteriormente y se adaptó a una variedad amplia de tareas industriales. Estos últimos desarrollos, que exigían imágenes de objetos más densos a través de un rango de tamaños y requisitos de resolución, proporcionaron avances claves que aumentaron considerablemente el potencial de aplicación de esta tecnología a las investigaciones geológicas. La tomografía conocida como el método de visualización por lamina/slice, de un cuerpo en lámina radio- filmica, fue propuesta por el italiano Alessandro a principios de 1900's. Los primeros laboratorios de CT datan de 1972 en Inglaterra con una resolución muy baja por pixel

de 80x80 (Filler. , 2009, July). En la **Figura 49**, se aprecia la evolución referida a la CT, en la reconstrucción de imágenes con mayores resoluciones.

Para obtener el mayor número de datos posibles, se utilizan detectores relativamente grandes (i.e. escala milímetro) y de alta eficiencia. Debido a que los sistemas de CT industriales no enfrentan limitaciones a la dosis de radiación aceptable, son capaces de aprovechar varias optimizaciones. Los rayos X para sistemas industriales pueden ser de mayor energía, y los tiempos de exposición no tienen un límite superior firme. Pueden utilizarse detectores más pequeños, lo que conduce a una mayor resolución, debido a que la disminución de la señal que acompaña a un área de superficie más reducida puede ser compensada por mayores intensidades de rayos X o tiempos de exposición. Finalmente, dado que los objetos escaneados son inanimados, es posible un posicionamiento más exacto y preciso.



Imagen Axial CT 1975
128x128



Imagen Axial ahora
512x512

Figura 49. Evolución en la resolución de la CT (Niu, 2010).

Los escáneres CT se pueden agrupar generalmente en cuatro categorías, basadas en su resolución espacial y en el tamaño de los objetos que son más adecuados para el escaneo. La clasificación propuesta se resume en la **Tabla 6** (Ketcham & Carlson, 2001).

Tabla 6. Clasificación general de la Tomografía computarizada. Adaptado de (Ketcham & Carlson, 2001)

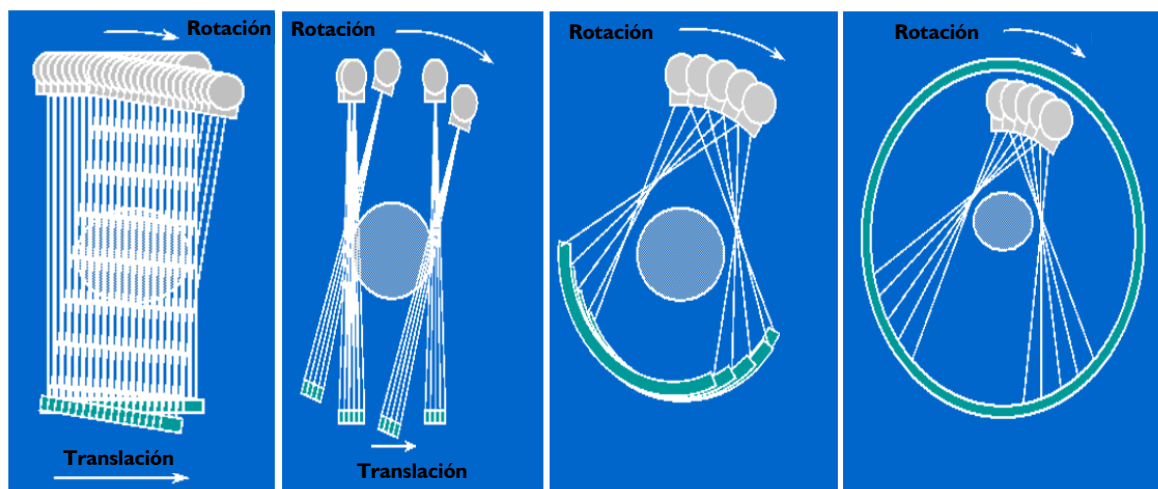
Tipo	Escala de Observación	Escala de Resolución
Convencional	m	mm
Alta resolución	dm	100 μ m
Ultra-alta resolución	cm	10 μ m
Microtomografía	mm	μ

En la industria de los hidrocarburos la CT ha permitido el estudio de: i) experimentos de desplazamientos de fluidos en litologías de yacimientos (Wellington & Vinegar, 1987; Withjack, 1988); ii) propiedades de flujo en núcleos de perforación, tanto a través de imágenes directas de experimentos de flujo de fluido (Anderson, et al., 1992; Hejis, et al., 1995) como por medio de la caracterización de la morfología de los poros del mismo (Peyton, et al., 1992; Zeng, et al., 1996); iii) determinación de la morfología para sedimentos marinos (Amos et al., 1996) y distribución de la densidad (Orsi, et al., 1994; Orsi & Anderson, 1995); iv) modelos escalares de fallas, los cuales han

llegado a ser lo suficientemente rápidos para permitir el análisis en tiempo real (Schreurs & Hanni, 1998). Hoy en día se conocen 4 generaciones de tomógrafos computarizados, clasificados según la disposición de sus piezas mecánicas y la manera de adquirir la información. Su clasificación depende del año en el cual salieron al mercado. En la **Figura 50** se evidencia una conceptualización de las configuraciones de estos, donde la parte gris refiere a la fuente, y la verde al detector.

- La primera generación de CT's está compuesta principalmente por un rayo de energía, y una celda de detectores, el rayo incide en el objeto en un único ángulo y se repite n cantidad de veces (Pope & Lake, 1978).
- La segunda generación de CT's, empezó a utilizar múltiples detectores, a razón de una mayor capacidad en la fuente para emitir rayos-x más amplios, en consecuencia, debía ser absorbido por un conjunto más extenso (Pope & Lake, 1978).
- La tercera generación de CT's, fue el inicio de la matriz de detectores con celdas de alta resolución espacial (i.e. 500-1000 detectores), que permite medir simultáneamente la proyección del rayo, y la reconstrucción por lamina/slice, sin la necesidad de un paso adicional (i.e. defecto de los de 1ra y 2da generación). Además, si algún detector resulta dañado, se verá un artefacto en el centro de la imagen (Walsh, et al., 1984). Estos CT's disponen de detectores de alta calidad de adquisición (Pope & Lake, 1978; Lake & Helfferich, 1978).
- Los CT's de cuarta generación, fueron generados con el fin de evitar los inconvenientes por artefactos, por lo cual, se implementó el aro de detectores y una fuente rotativa. El primero, cuenta con una gran cantidad de detectores de alta resolución, para mejorar la adquisición de imágenes por lamina/slice (Pope & Lake, 1978).

Para una descripción técnica más completa de CT, se recomienda la publicación ASTM E1441-92a (ASTM, 1992) como un excelente punto de partida. En Hendee (1979) y Newton y Potts (1981) se pueden encontrar sinopsis muy legibles, aunque algo anticuadas, de la CT médica y sus componentes y su historia; Newton & Potts (1981) proporcionan considerables detalles acerca de muchos aspectos fundamentales de la exploración tomográfica.



a) Primera generación b) Segunda generación c) Tercera generación d) Cuarta generación

Figura 50. Geometría de la fuente de rayos X y de los detectores en varias generaciones de CT. Adaptado de (KeCTham & Carlson, 2001).

PRINCIPIOS DE LOS RAYOS-X CT

Los rayos-X pasan a través de un objeto, su intensidad es reducida si este, es absorbido o dispersado. Es importante señalar que la atenuación que producen los materiales se debe fundamentalmente a dos fenómenos: el efecto fotoeléctrico, que es gobernado por la densidad y el número atómico del material y la energía del fotón, y el efecto Compton que depende sólo de la densidad y la energía (Hunt, et al., 1988).

Efecto fotoeléctrico.

Los fotones del rayo de luz tienen una energía característica determinada por la frecuencia de la luz. En el proceso de fotoemisión, si un electrón absorbe la energía de un fotón y este último tiene más energía que la función de trabajo, el electrón es arrancado del material. Si la energía del fotón es demasiado baja, el electrón no puede escapar de la superficie del material. Cuando un haz de rayos X o gamma penetra en un medio material, se observa una desaparición progresiva de los fotones que lo constituyen. Esta disminución del número de fotones incidentes denominada atenuación, se debe a la interacción de cierto número de ellos con los átomos que componen el medio. La atenuación de un haz de fotones considerada como la disminución progresiva del número de fotones que transporta el haz se debe tanto a los procesos de absorción como a los de dispersión (Yeh & Tripathi, 1989).

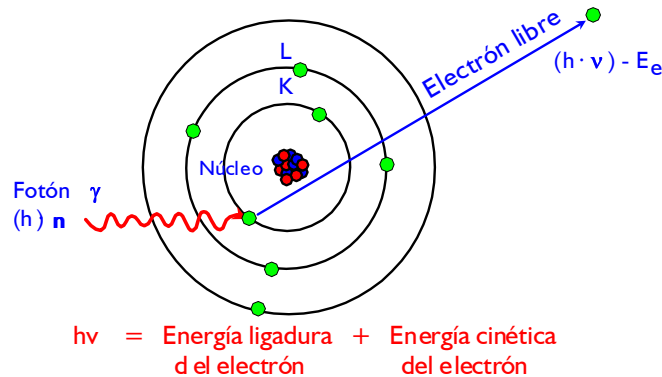


Figura 51. Efecto Fotoeléctrico. Adaptado de (UNLP, 2017).

Interacción Compton

Se trata de una interacción que se produce mayoritariamente entre el fotón y los electrones atómicamente poco ligados (los de las capas más externas). En la interacción Compton se produce un fotón dispersado, de menor energía que el incidente y un electrón con energía cinética prácticamente igual a la diferencia de energía entre ambos fotones (Yeh & Tripathi, 1989).

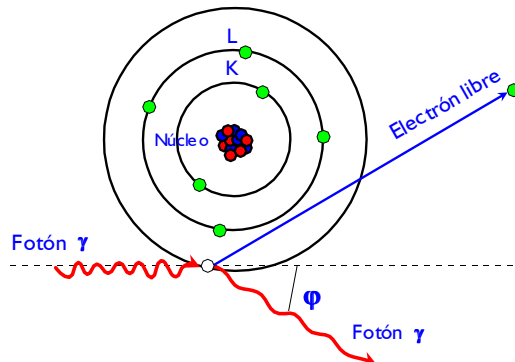


Figura 52. Interacción Compton. Adaptado de (UNLP, 2017).

La cantidad de energía que se transfiere al electrón varía con la energía del fotón incidente, siendo más importante a medida que aumenta la energía de éste. A bajas energías, el electrón se expulsa con muy poca energía, llevando el fotón dispersado casi toda la energía del incidente. El coeficiente de atenuación lineal Compton o la probabilidad de que se produzca una interacción Compton:

- Disminuye al aumentar la energía de los fotones (aproximadamente como $1/E$).
- Varía poco con el número atómico del material (Z).
- Es proporcional a la densidad atómica del medio, (ρ).

CALIDAD DE LA IMAGEN

Uno de los aspectos más importantes en el escaneo de la CT es asegurar una buena calidad en la imagen, para ello se deben seguir ciertos parámetros para evitar algunos artefactos.

Los artefactos por imagen son contrastes no generados por los cuerpos o materiales en estudio, este es el principal factor que reduce la calidad en las imágenes de la CT. Los artefactos de imagen son características, no presentes en el objeto original, sino en la imagen, producida por el procesamiento de esta. Este fenómeno es conocido como la diferencia entre el número CT y la imagen, lo cual da como resultado una atenuación errónea (Barret & Keat, 2004). En la **Figura 53** se evidencia el fenómeno de artefactos.

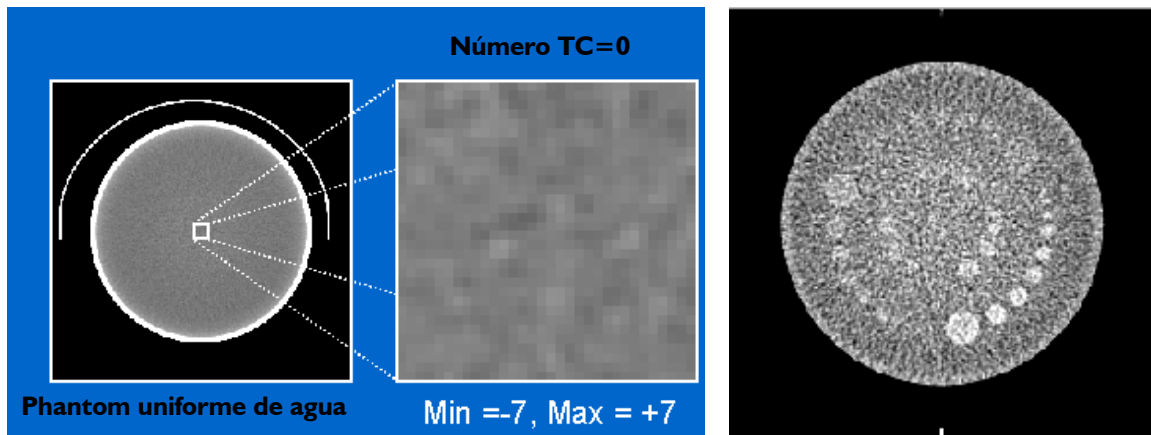


Figura 53. Artefactos y Ruido. Adaptado de (Ketcham & Carlson, 2001).

Beam Hardening (i.e. Corrección del rayo) es con frecuencia utilizada para corregir estas atenuaciones ya que los rayos-X de la CT son inicialmente policromáticos y con un espectro energético moderado. Estos rayos policromáticos se intensifican para pasar por el material, debido a que los fotones de baja energía presentan mayor atenuación, con el *beam hardening* se busca diferenciar qué absorbe mayor cantidad de rayos y qué logra atravesar con mayor facilidad hacia los detectores. Estos haces policromáticos se endurecen cuando se transmiten a través del material. Debido a que los fotones de baja energía son más fácilmente atenuados que los fotones de alta energía, el endurecimiento del haz es el proceso de extracción de rayos X de baja energía del haz, que se vuelve más duro y más penetrante. En la **Figura 54** se evidencia el efecto *Beam Hardening*. La cantidad de endurecimiento del haz depende del espectro de rayos X inicial y de la composición de la materia atravesada. Las imágenes afectadas por el endurecimiento del haz se caracterizan típicamente con coeficientes de atenuación altos alrededor de la periferia del objeto y bajos coeficientes de atenuación en el centro del objeto. Este artefacto también se conoce como "artefactos de corte" (Ortiz, et al., 2015).



Figura 54. Efectos del Beam Hardening. Tomado de (Ortiz, Plata, J., Herrera, E., & Santos, N., 2015).

Además del endurecimiento de haces, la inanición de fotones, que causa artefactos de rayas, también tiene una influencia significativa en la calidad de la imagen. Los artefactos de inanición de fotones surgen porque el ruido aparece en algunas partes de proyección individual debido a que los fotones insuficientes pasan por la parte más ancha de los materiales. Estos artefactos ocurren normalmente cuando el núcleo o soporte del núcleo se escanean verticalmente. En la práctica, se puede usar un filtro para reducir la influencia del endurecimiento del haz sobre la imagen.

ANEXO IV

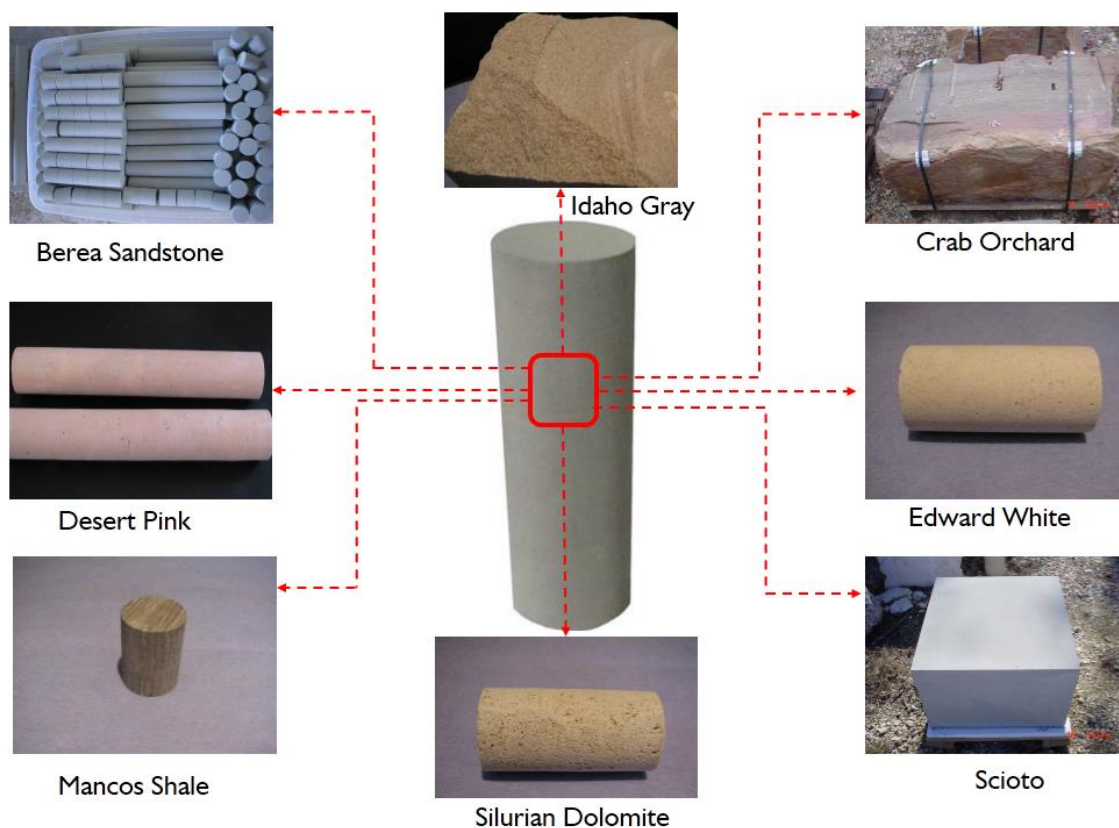


Figura 55. Imágenes del set de muestras distribuido por la empresa Kocurek Industries INC.

ANEXO V

PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN Y RESOLUCIÓN

Las herramientas CT han alcanzado mejoras sustanciales de una generación a otra, especialmente en resolución espacial, acortando la distancia interslice para obtener mayor cobertura de información. espacial (e.g. Tercera generación – 32 cortes, 1,25 mm; Cuarta generación – 64 cortes, 0,625 mm).

El uso de herramientas CT en las investigaciones geológicas requieren el desarrollo de procedimientos de escaneo especializados, esto debido a la gran variedad de materiales y requisitos de resolución, en contraste con los parámetros CT que se manejan en diagnósticos médicos, los cuales son más básicos. En general, el objetivo de la optimización es maximizar el contraste entre las características de interés, mientras se minimizan o eliminan artefactos que pueden interferir con el análisis.

Los requerimientos para una mejor resolución guían las decisiones hacia unos parámetros de exploración óptimos, que incluyen entre otros: combinación fuente-detector, espesor de los cortes, modo de escaneo, cantidad e intensidad de energía de los rayos X, tamaño del punto focal, filtración de haz, si la hay; y si la muestra debe ser escaneada en el aire o embalada; y material de la almeja (Ketcham, R. & Carlson, W., 2001).

El objeto de interés a escanear son rocas que divergen en litología y contenido mineralógico, que direccionan al uso de doble energía, considerando que los coeficientes de atenuación interaccionan de manera distinta a las dos energías en los diferentes materiales. Existen elementos mineralógicos que no se distinguen apropiadamente, al paso de rayos de alta energía, pero en conjunto con energías más bajas se logran diferenciar de una forma óptima.

Selección de Energía

Los principales parámetros seleccionables que contribuyen a la dosis de radiación son la corriente (mA), el voltaje (kV), el pitch o tono y el tiempo de ciclo del gantry (en segundos). La relación entre la corriente del tubo y la radiación es lineal. Disminuir la corriente del tubo en un 50% reducirá esencialmente la radiación en un 50%. En contraste con la relación entre corriente y radiación.

La radiación de rayos X está regulada por la cantidad de electrones emitidos y la potencia que se añade para moverlos, de manera que para obtener una buena resolución sin afectar ni exponer demasiado el tubo, es importante tener un balance correcto entre intensidad y el espectro de rayos X, interpretados por la corriente (mA) y el voltaje (kV) respectivamente.

El tono (i.e. definido como la distancia de mesa recorrida en una rotación de 360° / ancho colimado total del haz de rayos X) es inversamente proporcional a la radiación del objeto. Las emisiones más grandes reducen la dosis de radiación. La relación entre el tono y la dosis de radiación es lineal.

Específicamente, el aumento del tono de 1,0 a 1,5 reducirá la dosis de radiación del objeto en un 33%.

La disminución del tiempo de rotación del gantry disminuye la dosis de radiación de una manera lineal. Cuanto más rápida sea la rotación del pórtico, menor será la radiación. Aumentar la velocidad de rotación del ciclo de 1.0 a 0.5 segundos por rotación de 360°, reduce la radiación esencialmente en un 50%. Por supuesto, cuando estas variables se ajustan para disminuir la radiación, la compensación es un aumento en el ruido de la imagen (Coursey & Frush, 2008).

Parámetros que influyen en la resolución

Los parámetros de mayor relevancia que determinan la eficacia de una fuente de rayos X para una tarea en particular, son el tamaño del punto focal, el espectro de las energías de rayos X generadas, y la intensidad de los rayos X. El tamaño del punto focal define parcialmente la resolución espacial potencial de un sistema CT, determinando el número de posibles trayectos detectores-fuente que pueden intersectar un punto dado en el objeto que se está escaneando. Cuantas más rutas de detección de fuente haya, más borrosas serán las características del objeto. El espectro de energía define la capacidad de penetración de los rayos X, así como su atenuación relativa esperada a medida que pasan a través de materiales de diferente densidad. Los rayos X de energía más alta penetran más eficazmente que los de menor energía, pero son menos sensibles a los cambios en la densidad y composición del material. La intensidad de rayos X afecta directamente a la relación señal-ruido y, por tanto, a la claridad de la imagen. Las intensidades más altas mejoran las estadísticas de conteo subyacentes, pero a menudo requieren una mayor focalización.

Muchos tubos de rayos X convencionales tienen un filamento doble que proporciona dos tamaños de punto focal, con el tamaño de punto más pequeño, permitiendo imágenes más detalladas, pero a mayor intensidad (Ketcham, R. & Carlson, W., 2001).

Adicionalmente el uso de una almeja metálica a base de aluminio ayuda a disminuir el efecto *beam hardening*, pre-filtrando los rayos incidentes, mientras limita el espectro de energía de rayos X.

La huella digital de todo trabajo CT se puede apreciar en los archivos .dcm, y varía según los parámetros introducidos al momento de realizar la adquisición. Por esta razón es conveniente implementar una hoja de parámetros de adquisición que vendrá añadida a toda entrega a la ANH de los pozos escaneados con la información referida en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Huella de adquisición y digitalización CT.

ID DE ADQUISICIÓN Y DIGITALIZACIÓN CT		
Pozo:	Fecha:	
Profundidad Total Escaneada		
Tomógrafo, serie		
Tipo de preservación		
Dato de ventana		
Matriz de detectores		
Parámetro	Valor	
	Low	High
Corriente del tubo (mA)		
Voltaje del tubo (kV)		
Punto focal (mm)		
Resolución espacial (px/cm)		
Matriz de reconstrucción		
Colimación del haz		
Espesor mínimo de slice (mm)		
Espaciado interslice (mm)		
Tiempo de reconstrucción (s)		
Tiempo de escaneo de cada corte (s)		
Pitch		

Calidad de imagen

Al reconstruir los números CT de adquisición y transformarlos en imágenes, es importante considerar la calidad de la imagen, para de esta forma, si es necesario, modificar los parámetros de adquisición. Existen cuatro características que se le asignan magnitudes numéricas y a las cuales es posible realizar medición de la calidad de imagen: la resolución espacial, la resolución de contraste, la linealidad y el ruido.

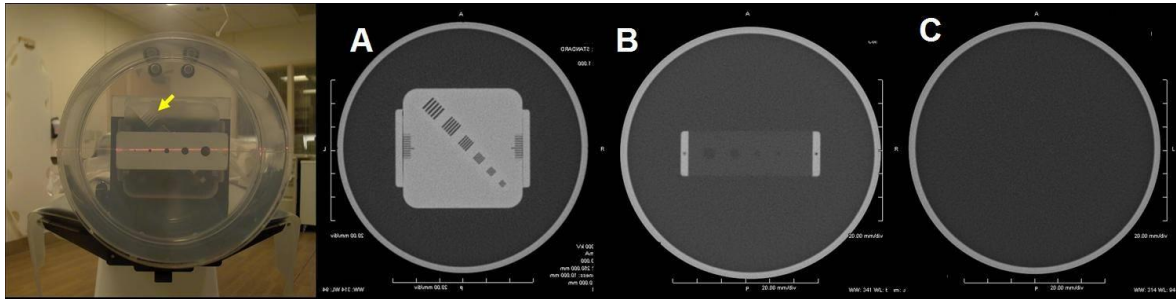


Figura 56. Fantasma CT (fotografía izquierda) utilizado para realizar imágenes para el control de calidad de la resolución. La imagen "A" se usa para resolución de alto contraste, escala de contraste, espesor de corte y precisión del láser. La imagen "B" se utiliza para medir la detectabilidad del bajo contraste. La imagen "C", para medir el ruido y la uniformidad del escáner. (Nicholas, 2010).

Resolución espacial

Es la capacidad que tiene la matriz numérica de un método de adquisición CT de discriminar en una imagen dos estructuras de tamaños pequeños, entre mayor sea el contraste mejor será la resolución espacial. El contraste en el punto de cambio de las dos imágenes es una representación de los valores CT en unidades HU, por lo cual se pueden dar valores numéricos a estas zonas de cambio para cuantificar la resolución espacial.

Depende de:

- Tamaño del pixel, a menor tamaño mayor resolución espacial.
- Espesor de corte (i.e. voxel, ver **Figura 57**), a más fino el espesor de corte mayor resolución espacial.
- Algoritmo de reconstrucción.

Resolución de contraste

Es la capacidad para distinguir estructuras de diferentes coeficientes de atenuación, sin importar su forma y su tamaño (ver **Figura 58**). Cada pixel posee un valor en unidades HU, lo cual los hace diferir de otro, así sean de densidades y composición similares.

Depende de:

- Tamaño y uniformidad del objeto.
- Ruido de fondo del equipo (es inherente).

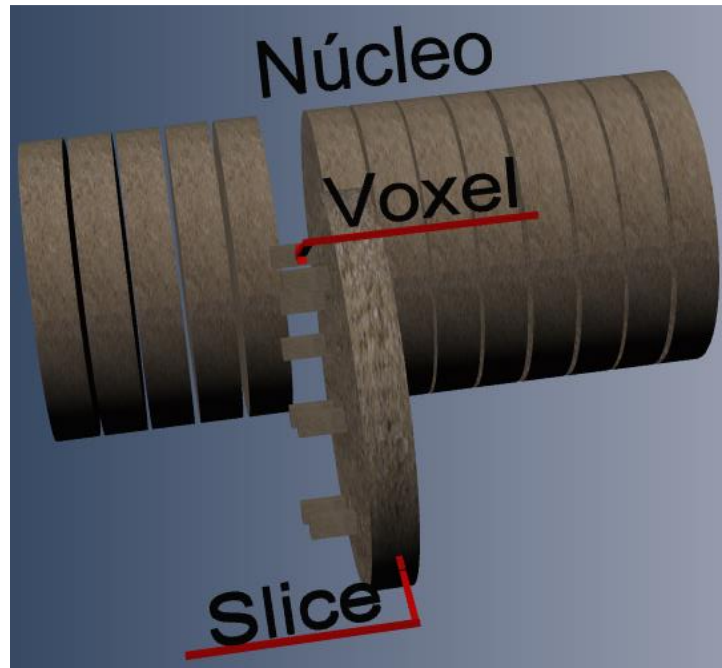


Figura 57. Esquema de voxel. Tomado de (Pereira & Narváez, 2016).

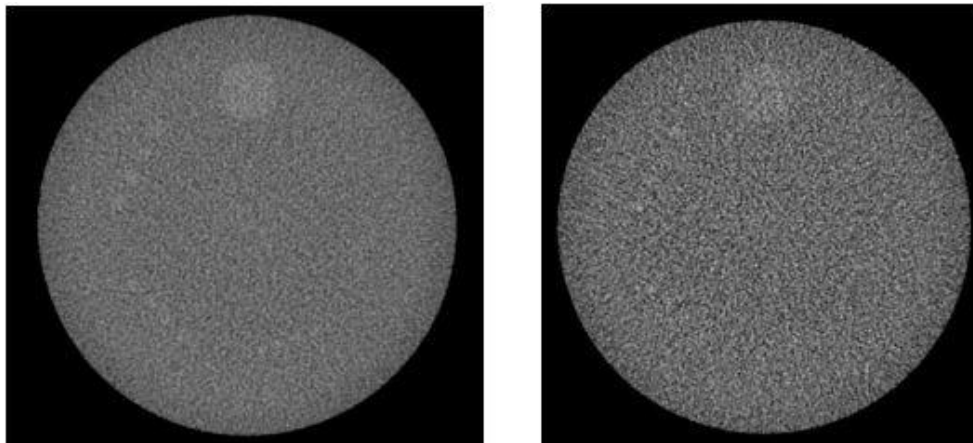


Figura 58. Diferencia en resolución de contraste al cambio de mAs. Tomado de (JAVINF, 2016).

Ruido del sistema

Es la inconsistencia de la resolución de contraste del sistema, cuando el número CT de un pixel está desfasado por encima o por debajo del cero en un sistema homogéneo de agua. Cuanto mayor sea la diferencia en estos valores, mayor será nivel de ruido que acompañará a la producción de las imágenes en un sistema dado.

El ruido es perceptible en la imagen final por la presencia de grano (ver **Figura 59**). Las imágenes producidas por sistemas de bajo ruido se ven muy lisas, mientras que en sistemas de niveles de ruido

elevados parecen manchadas. Por tanto, la resolución de objetos de bajo contraste está limitada por el ruido del equipo de TC.

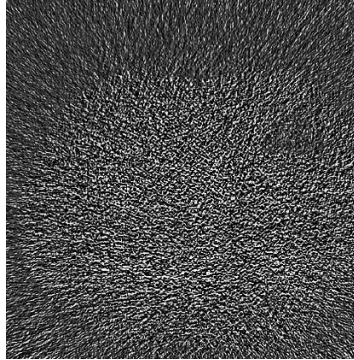


Figura 59. Imagen de ruido, nótese abundante moteado. Tomado de (Bartuschat, et al., 2009).

Depende de:

- Tensión de pico y filtración.
- Tamaño del pixel.
- Espesor de la sección.
- Eficacia de los detectores.
- Cantidad de radiación que recibe la muestra.

Linealidad

Se refiere a la calibración rutinaria que se debe realizar al equipo para comprobar que la imagen de un pixel de agua corresponda a un número CT igual a cero, y que otros materiales se representen con su valor adecuado.

La falta de linealidad indica que el equipo funciona mal o esta desalineado. Si la desviación es pequeña los valores numéricos de TC no serán precisos, pero el efecto sobre la imagen puede ser muy pequeño. No obstante, esta pequeña desviación puede afectar al análisis cuantitativo de la roca mediante los valores de atenuación de los píxeles en CT (TSID, 2017).

Recomendaciones de experiencias en campo

Para el desarrollo de una adecuada adquisición de datos durante el escaneo, es importante seguir algunas recomendaciones que tendrán una influencia directa en la calidad de los resultados e imágenes.

Calibración

La calibración diaria del sistema de detectores del aparato se realiza inmediatamente después de haber finalizado el calentamiento del tubo. Es un procedimiento técnico imprescindible para que el

aparato funcione correctamente. Si el aparato no ha sido calibrado, puede suceder que las imágenes sean de poca calidad (i.e. aparecen una serie de anillos concéntricos oscuros.) o que al imprimirlas no reproduzcan fielmente lo que se ve en la pantalla del monitor.

Ambiente óptimo

Es importante que la temperatura del entorno se mantenga en un rango que no afecte la vida útil del tubo, o que pueda sobrecalentar el sistema, considerando el calor generado por la máquina que incide en la temperatura del recinto donde se tiene el equipo. Esta temperatura debe estar en un rango nunca por encima de 23° C ni por debajo de 17,5 ° C.

Es recomendable que la humedad relativa este siempre entre 30% y 70%. Es posible que en algunas ocasiones sea necesario utilizar un deshumidificador para mantener la humedad relativa correcta.

Los ambientes de trabajo se han organizado para instituir tecnologías que permitan optimizar un flujo de trabajo dirigido a la conservación de las herramientas, y una rápida respuesta a las necesidades petrográficas que surgen día a día. Las experticias recopiladas por observación y ensayo han dado diversas causales para reducir los márgenes de error en la adquisición de datos e imágenes de alta calidad.

Vida útil del tubo

Para determinar la eficacia de la herramienta TC, se debe determinar ciertos parámetros técnicos que involucran la respuesta energética reflejada en la adquisición de imágenes TC, debido a que son directamente proporcionales a la respuesta de los materiales en la incidencia del rayo. Estos parámetros están ligados a la vida útil del tubo energético y a la calidad de los detectores.

La vida útil del tubo está dada en emisiones energéticas expresadas en mA/s, al igual que la cantidad de kVs transformados durante este proceso, por tanto, el tubo tendrá una vida útil dependiendo de la frecuencia con la que es utilizado.

El calentamiento del tubo debe realizarse todos los días antes de comenzar la jornada de trabajo. Algunos fabricantes recomiendan que se efectúe también cuando el aparato ha estado encendido y no se ha realizado ninguna exploración de Tomografía Computarizada durante dos o tres horas antes. Con eso se evita el calentamiento brusco que se produciría al comenzar una exploración. Si no se realizara este procedimiento, el disco del ánodo se agrietaría.

ANEXO VI

SEGMENTACION DE IMÁGENES POR TOMOGRAFIA COMPUTARIZADA

La digitalización de núcleos ha sido una herramienta que ha permitido la investigación no destructiva de los núcleos recuperados para posteriores estudios, en el campo de la tomografía computarizada ha permitido alcanzar resoluciones tridimensionales donde se puede visualizar el espacio poral, disposición mineralógica y la distribución de fluidos.

Sin embargo, para lograr entender el verdadero uso de esta herramienta, se debe entender cómo se relaciona un modelo físico, de un modelo computarizado. Para lograr interpretar las imágenes de la tomografía computarizada se debe entender que una vez adquiridos los archivos, .dcm, deben ser procesados a un formato de trabajo más comprensibles (i.e. .raw). Los archivos .raw son formatos corregidos en *beam hardening* para poder visualizar el umbral en escala de grises de las imágenes a procesar, a las cuales, se le puede añadir paletas de colores en función de los números CT (Iassonov, 2009).

Hay diversas metodologías de segmentación aplicadas dentro de la física de rocas digitales, una de las más habituales es el umbral universal, el cual consiste en definir un color en escala de grises o paletas de colores de la zona de interés, de acuerdo con datos de histograma (ver **Figura 60**).

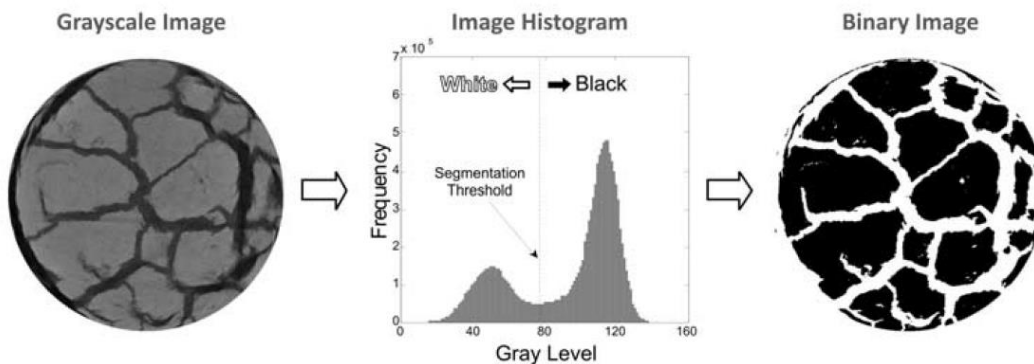


Figura 60. Ilustración de una binarización por histograma para una arena con fracturas rellenas de bentonita. Tomado de (Iassonov, 2009).

De acuerdo con la selección del umbral de grises óptimo para su corrección, estos podrían ser divididos en subcategorías. Estas subcategorías incluyen, forma del histograma, correlación de la entropía de los píxeles de fondo y superficie, la similaridad de atributos en escalas de grises y la distribución de imágenes binarizadas en correlación con imágenes de píxel. (Pal & Pal, 1993) (Sezgin & Sankur, 2004).

Los amplios crecimientos de métodos están basados en suponer que todos los voxel pertenecen a un objeto en particular y están conectados con sus similares. Algunos algoritmos genéricos tienen como base encontrar todos los voxel cercanos de una región de interés y utilizar esta sección en

específico (i.e. Voxel con escala de grises dentro del umbral de interés) para sumarlos a los pixeles cercanos (Gonzalez & Wood, 2002); (Ketcham, 2005).

Hoy en día muchos métodos están basados en algoritmos que han sido adaptados. A continuación, se listan los softwares más comunes en la industria del procesamiento de imágenes computarizadas por tomografías de uso comercial y gratuito.

Mango

Es un software para visualizar, editar y analizar imágenes médicas volumétricas, codificado en Java y distribuido libremente en versiones pre-compiladas para Linux, Mac OS y Microsoft Windows. Soporta formatos NIFTI, ANALYZE, NEMA y DCM. Es capaz de cargar y guardar imágenes 2D, 3D y 4D.

Mango proporciona herramientas para la creación y edición de regiones de interés (i.e. ROI) dentro de las imágenes, representación de superficies, apilamiento de imágenes (i.e. superposición), filtrado en el dominio espacial y análisis de histogramas, entre otras funciones que se pueden utilizar en el análisis de neuro-imágenes. El software consigue ampliarse con funciones definidas por el usuario (i.e. plug-ins), que pueden crearse utilizando el lenguaje Java y la API* de Mango (ver **Figura 61 & Figura 62**).

Image j

ImageJ es un programa de procesamiento de imagen digital de dominio público programado en Java; desarrollado en el National Institutes of Health.

Fue diseñado con una arquitectura abierta que proporciona extensibilidad vía plugins y macros (i.e. macroinstrucciones) grabables. Se pueden desarrollar plugins de escaneo personalizado, análisis y procesamiento usando el editor incluido o un compilador Java.

Los plug-ins escritos por usuarios hacen posible resolver muchos problemas de procesado y análisis de imágenes, desde visualizaciones en tiempo real de las células en tres dimensiones, hasta sistemas automáticos de hematología. La arquitectura de plugins y entorno de desarrollo integrados de ImageJ lo han convertido en una plataforma popular para enseñar procesamiento de imagen. (Ver **Figura 63**).

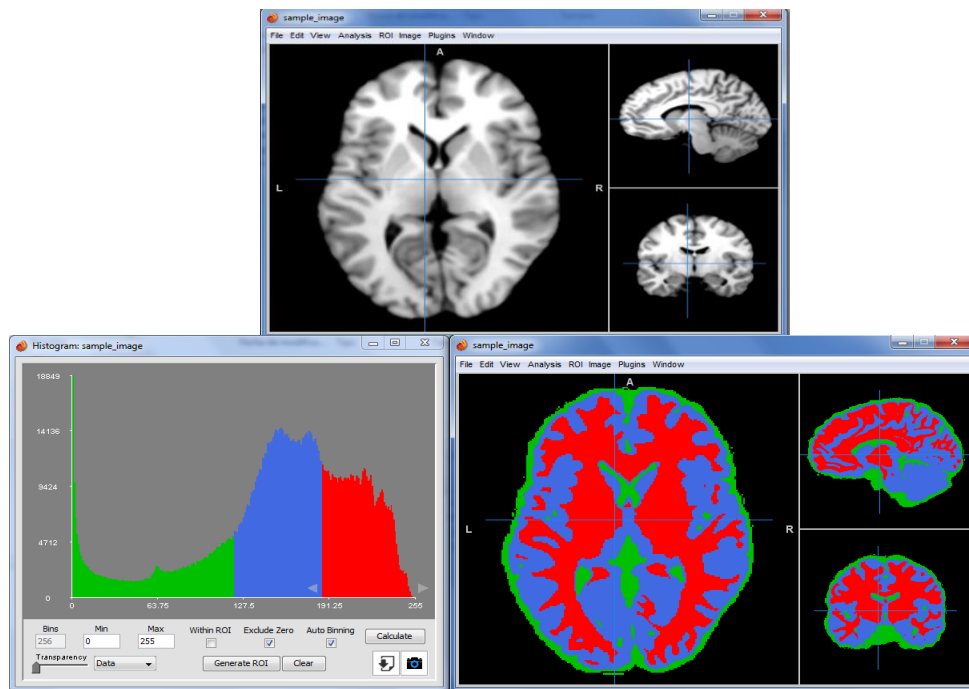


Figura 61. Ejemplo de una imagen medica tomada del programa, donde se realiza una selección por medio del histograma, segmentando los valores en la escala de grises, el color verde son los valores más oscuros, el rojo los valores blancos o de mayor absorción y el azul el resto del tono de gris.

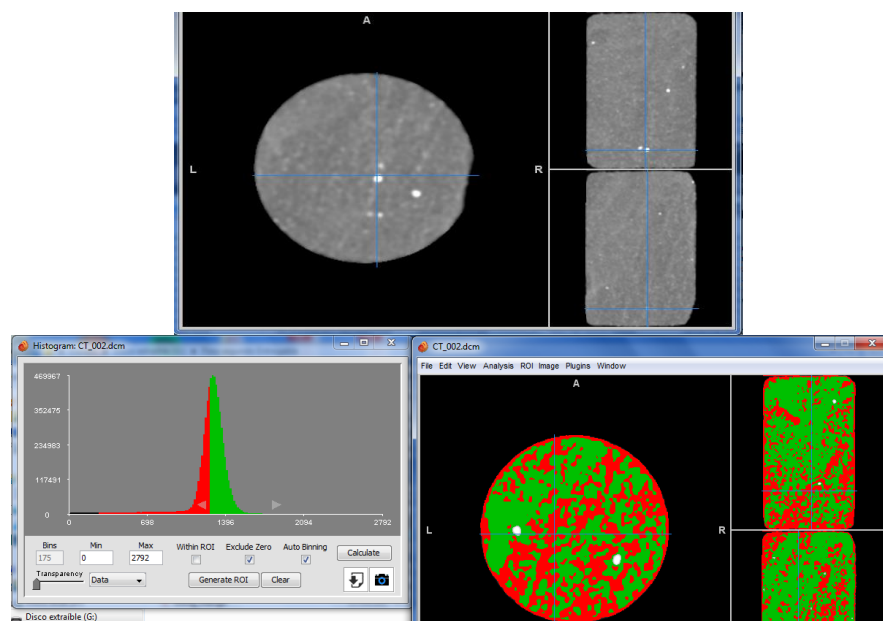


Figura 62. Ejemplo de una muestra de roca, sección de un núcleo, en la cual se aplica la segmentación por medio del histograma, los valores tomados por el color rojo corresponden a valores representados por el negro.

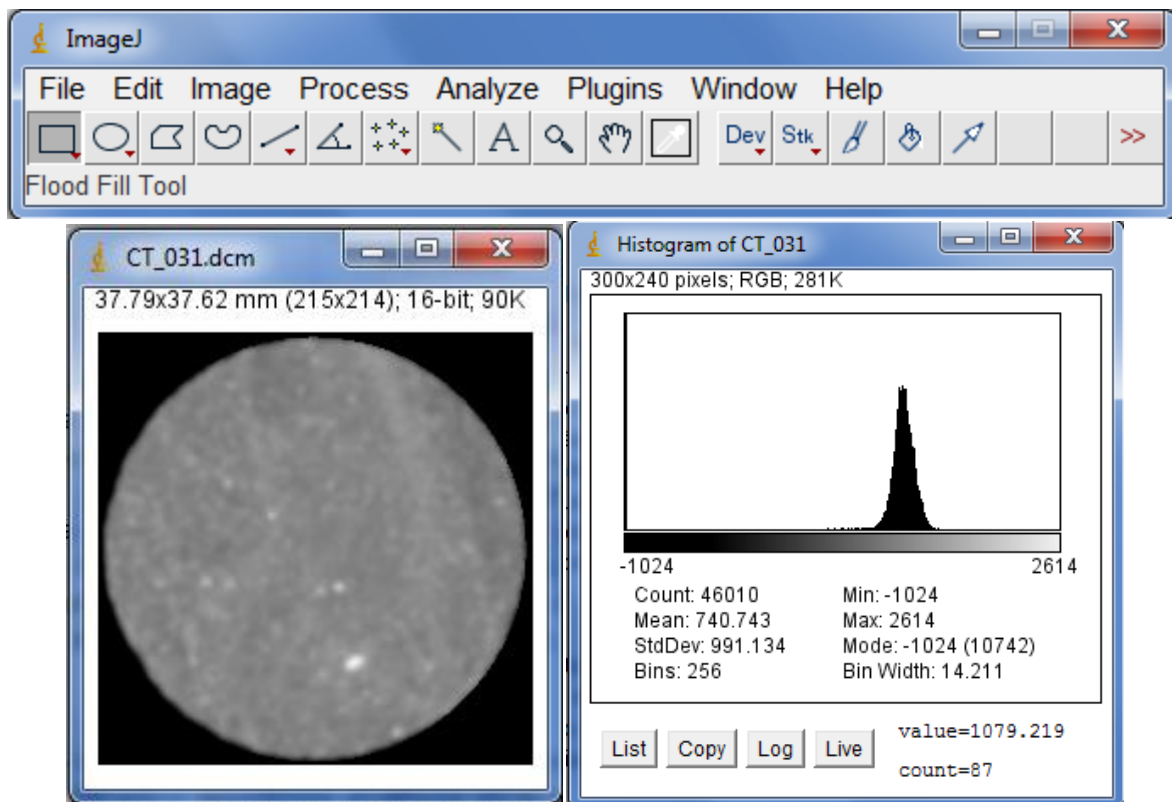


Figura 63. Ejemplo de material geológico cargado en el software gratuito imagej.

PerGeos

Diseñado para Petróleo y Gas, PerGeos, de FEI es el primer software de la industria esbozado para ayudar a los geocientíficos a interpretar rápidamente las imágenes de roca, en forma digital para que el personal capacitado pueda obtener eficiente y fácilmente datos significativos y procesables. Su visualización, procesamiento y análisis de imágenes de los núcleos en forma digital 2D y 3D permiten una mejor evaluación de la calidad del yacimiento, y una comprensión más alífera de las propiedades de las rocas estáticas y dinámicas que afectan la producción (Ver **Figura 64**).

El software PerGeos se compone de un conjunto de herramientas para eliminación de artefactos, filtrado y algoritmos analíticos en el mercado. Puede utilizarse como una plataforma de software independiente o combinarse con una variedad de aplicaciones para personalizar la experiencia del usuario con funcionalidades adicionales para el análisis de núcleo digital.



Figura 64. Escaneo del núcleo completo y segmentado para determinar las propiedades de porosidad y contenido mineralógico. (Software PerGeos).

El software PerGeos proporciona a los geólogos potentes algoritmos para soportar el análisis de imágenes, la segmentación y la automatización incorporada que les ayudarán a agregar peso estadístico a sus observaciones a partir del material del núcleo (Ver **Figura 65**). Las capacidades de análisis del software PerGeos ayudan a los geólogos a extraer y medir cuantitativamente datos tales como:

- Laminaciones.
- Densidad y orientación de la fractura.
- Porosidad orgánica versus inorgánica.
- Características de deposición.

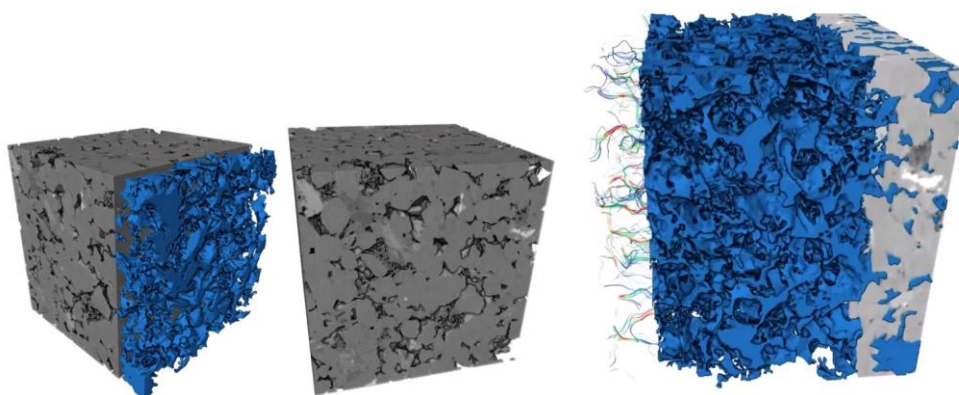


Figura 65. Representación tridimensional de una sección de interés, donde se realiza la segmentación y la conectividad de la porosidad.

El software es de uso comercial y ofrece una variedad de herramientas para la interpretación de datos de tomografía, ya que está diseñado para interpretaciones geológicas.

Dragonfly

Dragonfly proporciona a los usuarios simplicidad para contar, medir y caracterizar las particularidades de la imagen (Ver **Figura 66**). La inspección visual interactiva con el color del objeto y el resaltado significa que los usuarios siempre representarán su análisis de manera significativa (Ver **Figura 67**).

Es un software comercial que ofrece una versión de prueba para que los usuarios interactúen con las herramientas y de esta manera poder decidir si se adapta a sus necesidades, posee una interfaz sencilla de manejar y muy intuitiva, con una gama de posibilidades que satisfacen a diferentes tipos de materiales procesados, ya que no solo se utiliza en la física digital de rocas sino en otros tipos de industrias.

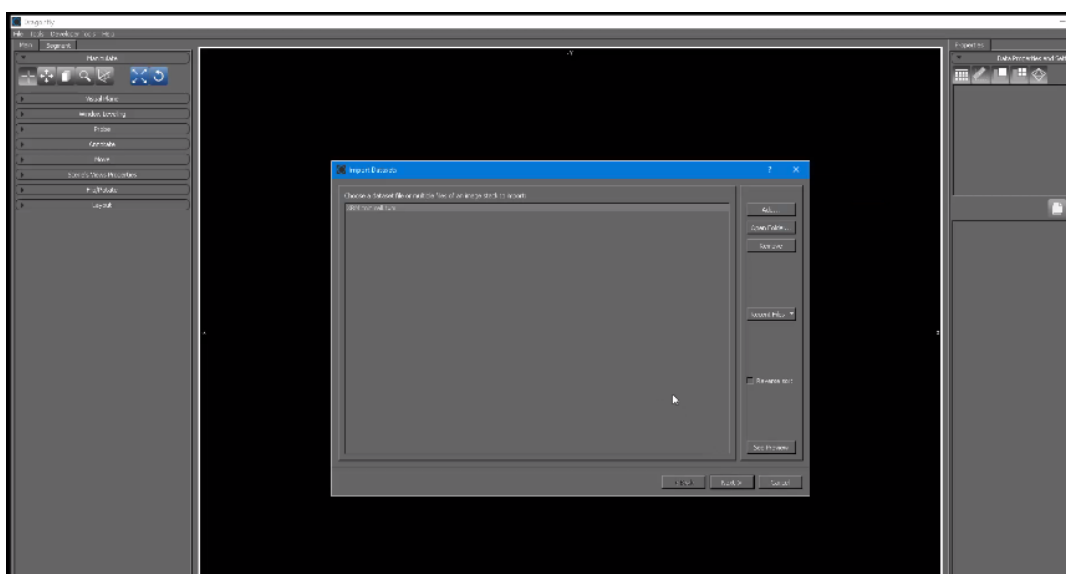


Figura 66. Interfaz de inicio del software Dragonfly, muy intuitiva y con una gran variedad de herramientas para poder trabajar de forma interactiva con las muestras que se analicen.

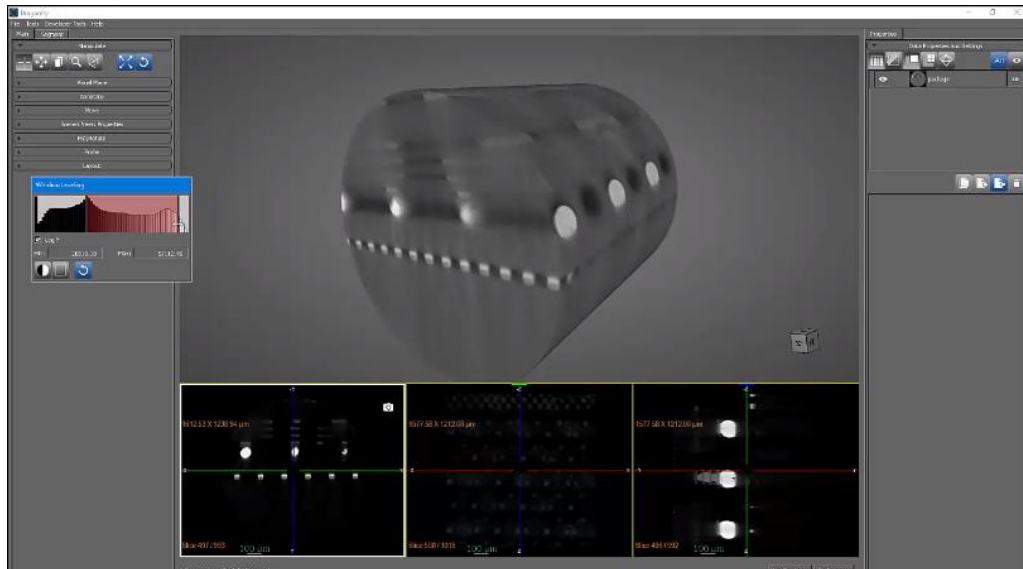


Figura 67. Carga de información al software, muestra geológica tipo plug, se inicia la interacción con la visualización en volumen completo de la roca y queda a disposición del usuario las herramientas para realizar los análisis pertinentes.

En la **Figura 68**, se aprecia la utilidad del mismo, implementando un histograma como base para distinguir solo los materiales de interés, en este caso fueron seleccionados los elementos de mayor densidad. Se establece un color para dicha selección, y se procede a generar una transparencia para dejar visible solo los materiales de interés y poder otorgarles un color, para una visualización más dinámica.

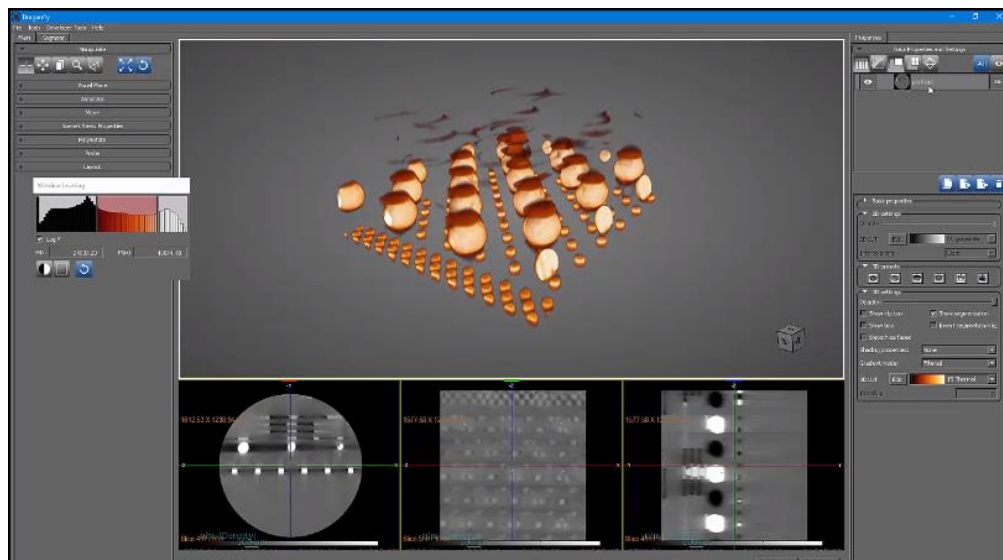


Figura 68. Ejemplo de los primeros pasos en segmentación

ANEXO VII

VERIFICACION DE LOS REQUISITOS Y ENTREGABLES

```

\---Nombre del Proyecto
  \---Reporte final
    | CP_ANH_WELLNAME.pdf
    |
    +---Cilindrica (1800-2500)
      | 0,9-3,9.PNG
      |
      +---Tomografia
        | +---Anexo 1 (Películas)
        | | 01_CP_CXXX_SXXX_1.00-4.00_T.mpg
        | |
        | +---Anexo 2 (Log Data)
        | | Tomografia_LogData.prn
        | | Tomografia_LogData.txt
        | | Tomografia_LogData.xlsx
        | |
        | +---Anexo 3(Log Data Individual)
        | | 01_CP_CXXX_SXXX_1.00-4.00_Log.txt
        | |
        | \---Anexo 4(Visualizador)
      \---Vertical (1800-2500)
        +---XZ
        | 0,9-3,9.PNG
        |
        \---YZ
          0,9-3,9.PNG
  
```

Figura 69. Árbol de información con datos ejemplificados.

ANEXO VIII

INSTRUMENTACIÓN TECNOLÓGICA PARA LABORATORIO DE CT

El Laboratorio de Tomografía Digital de Rocas (LTDR) está direccionado básicamente hacia la adquisición de imágenes CT y la obtención e interpretación de datos petrofísicos (i.e. densidad y zeff) de forma no destructiva, con volúmenes de trabajo desde el análisis de una pequeña muestra hasta la digitalización de gran cantidad de pies de roca obtenidas de pozo. Por lo tanto, es necesario que el laboratorio cuente con una serie de herramientas e instrumentos mínimos para el desarrollo de un flujo y/o volumen de trabajo apto para sus actividades.

Equipo de adquisición: El desarrollo de tecnologías en la industria petrolera y la optimización de recursos hace necesario que el LTDR tenga como mínimo un tomógrafo de rayos X, de cuarta generación en adelante, que tenga las siguientes especificaciones:

64 cortes – AL aumentar los cortes aumenta la resolución espacial del equipo, reducción de artefactos, mayor cantidad de información y reduce el tiempo de adquisición.

Helicoidal – Se adquieren los datos mientras la muestra se mueve sobre el eje Z.

4ta Generación – Los equipos de 4ta Generación en adelante contienen propiedades que mejoran la precisión interslice, las velocidades de adquisición y cobertura.

Sistema Reconstructor: Después de la adquisición de los datos, debe existir un sistema que los procese y convierta en imágenes. Por lo cual, consta de un sistema para transmitir los datos y un software que convierte las señales de atenuación en imágenes.

Sistema de transferencia de .dcm: Cuando se reconstruye la imagen, los datos quedan almacenados en un formato diferente al que se necesita para realizar procesamiento y cálculo de propiedades (i.e. RHOB y PEF). Este proceso debe ser realizado en una estación de trabajo diferente a la del reconstructor. Por lo tanto debe existir un sistema que se encargue de llevar los datos de imagen hasta la estación de trabajo de procesamiento en formato .dcm. Esto se logra por medio de un software de transferencia y una IP específica para cada equipo.

Pantallas Full HD: Para el procesamiento de las imágenes se deberá utilizar una pantalla de resolución mínima Full HD (1920×1080px), con el objeto de realizar capturas de pantalla de los planos correspondientes.