



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL EN  
CONDICIONES DE ALTA TEMPERATURA Y ALTA PRESIÓN PARA  
EVALUAR ÁNGULO DE CONTACTO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**MOISÉS VARGAS ROJAS**



**MÉXICO, CDMX.**

**2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>LUIS MIGUEL TREJO CANDELAS</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>MARÍA CRISTINA TORRES LOMELI</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>SIMÓN LÓPEZ RAMÍREZ</b>
<b>1er. SUPLENTE:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>JOSÉ LUIS LÓPEZ CERVANTES</b>
<b>2° SUPLENTE:</b>	<b>Profesor:</b>	<b>FEDERICO DANIEL SANDOVAL IBARRA</b>

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, EDIFICIO F2 LABORATORIO L-105. FQ, UNAM**

### **ASESOR DEL TEMA:**

**SIMÓN LÓPEZ RAMÍREZ**

### **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**CECILIA DE LOS ÁNGELES DURÁN VALENCIA**

### **SUSTENTANTE:**

**MOISÉS VARGAS ROJAS**

## **Dedicatoria**

Para Dios por todo lo que ha hecho en mi vida, porque siempre me has apoyado, en tu voluntad estuvo en concederme unos padres ejemplares, en tu voluntad me permitiste entrar en la Universidad Nacional Autónoma de México, en tu voluntad y gracia propicio a que yo llegara a este punto de mis estudios de nivel licenciatura, nada pude haber hecho con mis propias fuerzas, ya que soy débil. Todo esto tú lo has hecho, por misericordia. Y te doy las gracias por cuanto haces en mi vida, lo cual es mucho.

A mis padres Moisés y Ana Julia, por su dedicación conmigo en todas las etapas de mi vida, al cuidarme, al guiarme, al apoyarme y al amarme, su presencia en mi vida fue, es y será de lo más importante, ustedes se esforzaron al máximo para que yo hiciera cuanto he logrado, tuve tropiezos, sin embargo en esas situaciones me tendieron la mano y me animaron a seguir para no rendirme. Mucho agradezco, aunque la palabra se queda corta para expresar lo que siento de que sean mis padres. Los amo.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme estudiar en el Colegio de Ciencias y Humanidades, y posteriormente en la Facultad de Química, por todas las cosas que me enseñó apreciar y a valorar durante mi trayectoria como estudiante de la máxima casa de estudios.

A la Facultad de Química por formarme profesionalmente durante 5 años, en los cuales disfrute de una experiencia maravillosa en sus aulas, laboratorios, auditorios y demás instalaciones.

Al proyecto SENER-CONACYT No. 185183 y a la Unidad de Servicios para la Industria Petrolera (USIP) por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Rogelio Quiñones y al Lic. Carlos Pérez León por sus observaciones de este trabajo.

A los Ingenieros Rodrigo Galicia Pérez y Misael Alonso Pérez por su ayuda en la construcción del equipo.

Al Dr. Simón López Ramírez por su asesoría, tiempo, paciencia y ayuda, en la elaboración de este trabajo.

A la Dra. Cecilia de los Ángeles Durán Valencia por su apoyo en la revisión de este trabajo.

## **Contenido**

Objetivo .....	9
Resumen .....	9
Introducción .....	11
Problemática .....	11
Justificación .....	13
1. Marco teórico .....	15
1.1. Recuperación mejorada de petróleo .....	15
1.2. Mojabilidad .....	16
1.3. Ángulo de contacto.....	17
1.3.1. Medición del ángulo de contacto .....	19
1.3.2. Parámetros de influencia .....	20
1.4. Caliza .....	22
1.5. Tensoactivo.....	23
1.6. Ácidos carboxílicos.....	25
1.7. Par iónico .....	27
2. Metodología .....	29
2.1. Metodología para la determinación del ángulo de contacto .....	34
2.2. Procedimiento 01: Fluorescencia de rayos X. ....	35
2.3. Procedimiento 02: Corte de las placas.....	36
2.4. Procedimiento 03: Acondicionamiento de las placas. ....	36
2.5. Procedimiento 04: Llenado de balas contenedoras .....	38
2.6. Procedimiento 05: Limpieza y preparación de la celda .....	39
2.7. Procedimiento 06: Medición del ángulo de contacto .....	41
2.8. Procedimiento 07: Añejamiento de la roca.....	47

2.9. Procedimiento 08: Tratamiento de la roca con tensoactivo .....	48
3. Resultados y análisis.....	49
3.1. Fluorescencia de rayos X.....	49
3.2. Medición del ángulo de contacto .....	50
3.2.1. Superficie limpia .....	50
3.2.2. Superficie añejada con Laurato de sodio.....	53
3.2.3. Superficie tratada con tensoactivo.....	54
Conclusiones.....	58
Bibliografía .....	60
Anexo I. Hoja de seguridad del Tolueno .....	64
Anexo II. Hoja de seguridad del 1-Metil-2-Pirrolidona .....	68
Anexo III. Hoja de seguridad del N-Decano .....	70
Anexo IV. Hoja de seguridad de la Etilendiamina.....	72

## **Lista de Ilustraciones**

Ilustración 1. Recuperación secundaria de petróleo.....	12
Ilustración 2. Efecto de la mojabilidad en la recuperación mejorada de petróleo..	13
Ilustración 3. Recuperación terciaria o mejorada de petróleo. ....	16
Ilustración 4. Ángulo de contacto en un sistema L-S-L. ....	17
Ilustración 5. Ángulo de contacto en un sistema L-S-G.....	18
Ilustración 6. Mojabilidad sobre una superficie plana. ....	19
Ilustración 7. pH vs potencial Z, de una roca caliza. ....	23
Ilustración 8. Estructura de los tensoactivos. ....	24
Ilustración 9. Tensoactivos iónicos.....	24
Ilustración 10. Composición de ácidos carboxílicos en equilibrio. ....	26
Ilustración 11. Adsorción de un tensoactivo aniónicos sobre una superficie cargada positivamente. ....	26

Ilustración 12. Desorción de ácidos carboxílicos.....	27
Ilustración 13. Equipo de medición de ángulo de contacto. ....	31
Ilustración 14. Foto del equipo de medición de ángulo de contacto.....	32
Ilustración 15. Diagrama de flujo para la determinación del ángulo de contacto...	33
Ilustración 16. Fluorescencia de rayos X.....	35
Ilustración 17. Sistema de extracción Soxhlet.....	37
Ilustración 18. Estructura de la bala contenedora. ....	39
Ilustración 19. Celda para la medición del ángulo de contacto.....	40
Ilustración 20. Pistón y porta objetos de la celda. ....	41
Ilustración 21. Bomba manual.....	42
Ilustración 22. Microbomba dosificadora. ....	44
Ilustración 23. Cámara de alta definición. ....	45
Ilustración 24. Software SCA20_U®. ....	46
Ilustración 25. Medición del ángulo de contacto por medio de un software SCA20_U®.....	47
Ilustración 26. Gota de n-decano formada sobre superficie limpia de caliza en ambiente saturado por agua.....	51
Ilustración 27. Tiempo vs ángulo de contacto con superficie sin tratar. ....	52
Ilustración 28. Gota de n-decano formada sobre superficie añejada de caliza en ambiente saturado por agua.....	54
Ilustración 29. Gotas formadas sobre caliza con superficie tratada con tensoactivo. ....	55
Ilustración 30. Tiempo vs ángulo de contacto con superficie tratada. ....	57

## **Lista de Ecuaciones**

Ecuación 1. Número capilar (Nc).....	15
Ecuación 2. Ecuación de Young.....	18
Ecuación 3. Ecuación de Washburn.....	19
Ecuación 4. Ecuación del ángulo de contacto aparente.....	21



## Lista de Tablas

Tabla 1. Componentes del equipo.....	29
Tabla 2. Lista de sustancias utilizadas.....	30
Tabla 3. Dimensiones de las placas.....	36
Tabla 4. Volúmenes de los diluyentes para la mezcla de aminas.....	38
Tabla 5. Resultados de la fluorescencia de rayos X.....	50
Tabla 6. Estabilización de la gota en superficie no tratada.....	51
Tabla 7. Ángulo de contacto de los tres experimentos en superficie no tratada....	53
Tabla 8. Estabilización de la gota en el 1° experimento.....	56
Tabla 9. Estabilización de la gota en el 2° experimento.....	56
Tabla 10. Estabilización de la gota en el 3° experimento.....	56

## Objetivo

Desarrollar el equipo y la metodología experimental para determinar el ángulo de contacto del sistema caliza-agua-aceite a condiciones de alta temperatura y alta presión, en presencia de tensoactivos.

## Resumen

En el presente trabajo se aborda la construcción de un equipo que permite medir el ángulo de contacto a alta presión y temperatura, así como la metodología desarrollada para un sistema de agua-roca-aceite. La medición del ángulo de contacto establece el tipo de mojabilidad predominante en un sistema, es decir mojabilidad por el agua o por el aceite.

Este desarrollo experimental permite seleccionar tensoactivos para ser aplicados como agentes modificantes o remediantes de la mojabilidad en la recuperación mejorada de crudo en yacimientos maduros; en los cuales es imposible continuar la extracción de crudo remanente que se encuentra atrapado en los poros de la roca del yacimiento por efecto de fuerzas capilares, por lo que es necesario la utilización de agentes químicos para alterar el comportamiento físicoquímico del sistema roca-fluidos.

El equipo consiste de:

1. Una celda de alta presión y alta temperatura, en la que se confina el sistema y cuenta con dos ventanas que permiten que la cámara pueda realizar la captura.
2. Una chaqueta de calentamiento para aumentar la temperatura del sistema.
3. Un controlador de temperatura.
4. Un medidor de presión.

5. Una cámara de alta definición, la cual realizar capturas del sistema analizado con zoom.
6. Una computadora que cuenta con el software, que identifica el contorno de la gota a partir de la cual se mide el ángulo de contacto.
7. Una fuente de iluminación para definir el contorno de la gota.
8. Dos balas que desplazarán los fluidos a la celda.
9. Válvulas de paso y de 3 vías, para realizar la purgar de las líneas de conexión, hacer vacío en la celda, saturación del medio continuo y presurización del sistema, las que trabajan a una presión máxima de 10000 psi.
10. Bomba manual, la cual se usa para la saturación del medio continuo y la presurización del sistema, su presión máxima de trabajo es de 10000 psi.
11. Microbomba, la que se encarga de dosificar el volumen de aceite para la formación de la gota, su presión máxima de trabajo es de 7400 psi.

La metodología desarrollada consiste en evaluar la mojabilidad de la roca a través del ángulo de contacto y el efecto que tiene la presencia del tensoactivo; de manera general la metodología se divide en seis etapas:

1. Identificar a través de análisis de fluorescencia de rayos X el tipo de roca.
2. Lavar la roca.
3. Medir el ángulo de contacto inicial.
4. Someter a la roca en contacto con ácidos carboxílicos.
5. Medir el ángulo de contacto con la roca añejada.
6. Someter a la roca en presencia de tensoactivos y medir el ángulo de contacto.

Todo esto se realiza en condiciones de temperatura y presión alta.

## Introducción

### Problemática

La gran demanda del sector petrolero es producto del consumo energético a nivel mundial, donde el hidrocarburo es el principal insumo. Esto establece una de las principales razones, por la cual a diario se libra una lucha industrial por poner el mayor número de barriles posibles en la superficie. De ahí la importancia de investigar posibilidades de optimización en el proceso de extracción de hidrocarburos, dando a la industria petrolera la connotación de promotor importante en materia de investigación, generando desarrollos tecnológicos que subsanan los diferentes retos de producción y explotación de hidrocarburos. Se hace la distinción entre dos períodos durante la explotación de un yacimiento: la recuperación primaria y la recuperación secundaria. Se considera además una eventual recuperación terciaria, y/o una recuperación mejorada<sup>23</sup>.

Durante la recuperación primaria, el petróleo se drena naturalmente hacia los pozos bajo el efecto del gradiente de presión existente entre el fondo de los pozos y el seno del yacimiento<sup>23</sup>. El período de recuperación primaria tiene una duración variable ya que permite recabar numerosas informaciones sobre el comportamiento del yacimiento, las cuales son de importancia para la planificación de la explotación. El porcentaje de recuperación primaria del crudo originalmente en sitio es en promedio del orden de 10-15%<sup>23</sup>.

Anteriormente se explotaba el yacimiento por recuperación primaria hasta que los gastos de explotación se volvían prohibitivos, en cuyo caso se procede a los métodos de recuperación secundaria. Hoy en día se inician las operaciones de recuperación secundaria mucho antes de llegar a este punto, y la preferencia del método de explotación en un yacimiento o en una parte de un yacimiento obedece exclusivamente a criterios de optimización<sup>23</sup>.

Los métodos de recuperación secundarios consisten en inyectar dentro del yacimiento un fluido menos costoso que el petróleo, con el propósito de mantener un gradiente de presión. Estos fluidos se inyectan en ciertos pozos y desplazan o arrastran una parte del petróleo<sup>23</sup>.

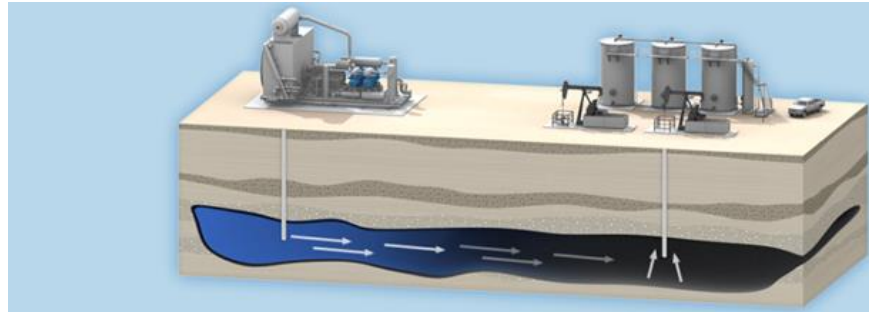


Ilustración 1. Recuperación secundaria de petróleo<sup>34</sup>.

Hasta inicios de la década de los 70, el bajo precio del crudo hacía que los únicos fluidos viables económicamente, para inyección, eran el agua, y en ciertos casos, el gas natural (Ilustración 1). El drenaje por agua permite elevar la recuperación del aceite originalmente en sitio hasta un promedio de 25-30%, con variaciones desde 15 hasta 40% según los casos<sup>23</sup>.

Con el aumento del precio del crudo, en la década de los 70, se volvió económico inyectar otros elementos diferentes al agua con el propósito de aumentar la recuperación final y se realizaron numerosas investigaciones en este sentido; a este proceso, en el que se busca mejorar la eficiencia de recuperación con la inyección de sustancias, se le conoce como recuperación terciaria o mejorada<sup>23</sup>.

La inyección de agua seguirá siendo la opción más recurrente debido a su disponibilidad, sin embargo su desempeño como alternativa para incrementar la extracción de hidrocarburos en yacimientos carbonatados es bajo, lo cual motiva el desarrollo de nuevos procesos para incrementar su eficiencia<sup>7</sup>. La recuperación mejorada o asistida es la tercera y última etapa que se realiza para la

recuperación de petróleo original en sitio. En esta etapa se trata de recuperar la mayor cantidad de petróleo en sitio que queda en el yacimiento después de las primeras dos recuperaciones (Recuperación Primaria-Recuperación Secundaria), evitando pérdidas económicas y el posible abandono del pozo<sup>10</sup>.

## Justificación

Ya que la mayoría de yacimientos mexicanos se encuentran en su etapa madura de explotación, de los cuales la mayor parte han sido sujetos a la inyección de agua como proceso secundario de extracción, es necesario la implementación de procesos de recuperación mejorada de petróleo para incrementar el factor de recuperación. Es por eso que se realizó el estudio del efecto de cambio de mojabilidad para ser utilizado en yacimientos carbonatados, con el objetivo de seleccionar tensoactivos como agentes modificantes de la mojabilidad (Ilustración 2).

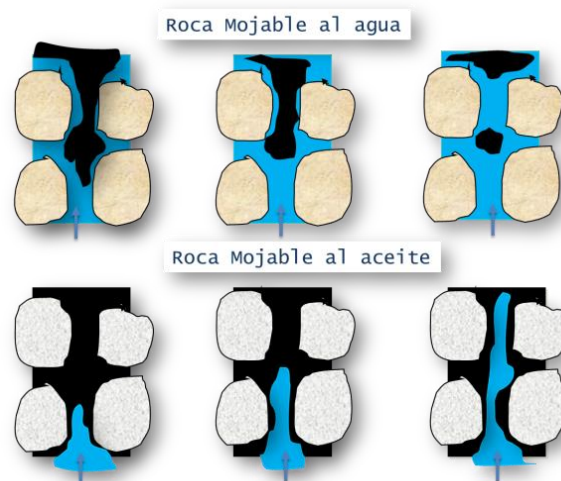


Ilustración 2. Efecto de la mojabilidad en la recuperación mejorada de petróleo.

Para realizar el estudio de cambio de mojabilidad fue necesario implementar la construcción de un equipo, así como la metodología de este, el cual permite medir el ángulo de contacto a alta presión y temperatura, con el propósito de simular condiciones de un yacimiento, para disminuir los efectos que puedan ocasionar sobre la medición de ángulo de contacto, tomando en cuenta que dichos efectos pueden afectar la efectividad esperada de la recuperación de crudo.

## 1. Marco teórico

En este capítulo se hace una recopilación de los temas y conceptos que son importantes para comprender la parte experimental, con el fin de ser usada en la recuperación mejorada de petróleo, al estudiar el cambio de mojabilidad, los factores que influyen en este proceso, la forma de remediar esto para aumentar el factor de recuperación en yacimientos de superficie carbonatadas que ya han sido sujetos a inyección de agua y sólo se ha aprovechado hasta el 40% en la recuperación del crudo.

### 1.1. Recuperación mejorada de petróleo

La recuperación mejorada de petróleo EOR (del inglés: Enhanced Oil Recovery) se refiere a todos los procesos utilizados para recuperar una mayor cantidad de crudo en un yacimiento del que se lograría por métodos primarios y secundarios. En su mayoría consiste en inyección de gases o químicos líquidos y/o en el uso de energía térmica. Entre los químicos líquidos se incluyen polímeros y tensoactivos<sup>14</sup> (Ilustración 3). En este proceso se busca reducir las fuerzas capilares que atrapan el crudo en el espacio poroso del yacimiento<sup>10</sup>. Para comparar estas fuerzas, se utiliza el número capilar ( $N_c$ ) que es la relación entre las fuerza viscosa y fuerza capilar<sup>26</sup> (Ecuación 1). Este número es directamente proporcional al factor de recuperación del crudo, por lo que es muy importante la disminución de las fuerzas capilares.

$$N_c = \frac{v\mu_w}{\sigma_{ow} \cos \theta} = \frac{\text{Fuerza Viscosa}}{\text{Fuerza Capilar}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}^{26}$$



Donde  $v$  es la velocidad de la salmuera,  $\mu_w$  es la viscosidad de la salmuera,  $\theta$  es ángulo de contacto y  $\sigma_{ow}$  es la tensión interfacial agua/crudo.

Los químicos inyectados interactúan con el sistema roca-crudo debido a mecanismos físicos y químicos. Tales interacciones pueden ser o dar lugar a una disminución de la tensión interfacial, hinchamiento del crudo, reducción de su viscosidad, modificación de la mojabilidad o comportamiento de fases favorables<sup>14</sup>. Lo que permite un aumento del número capilar para crear condiciones favorables en la recuperación del crudo.



Ilustración 3. Recuperación terciaria o mejorada de petróleo<sup>33</sup>.

## 1.2. Mojabilidad

La mojabilidad define la interacción en un sistema sólido-líquido. Es función del tipo de fluido y de la superficie sólida, cuando el ángulo de contacto es  $<90^\circ$ , el fluido moja al sólido y se llama fluido mojante, mientras que si el ángulo es  $>90^\circ$ , el fluido se denomina no mojante<sup>1</sup>. En el caso de más de un fluido, también se define como tendencia de un sólido para preferir a un fluido sobre otros. Por ejemplo

considerando un sistema de dos líquidos (Ilustración 4), si el ángulo de contacto es muy pequeño el fluido 2 moja al sólido, pero si el ángulo es cercano o superior a los 90° el fluido 1 moja al sólido<sup>4</sup>. El perfil que adopta la gota es el resultado del balance entre las fuerzas de la superficie y de la interfase, que tienden a minimizar la energía superficial libre del sistema<sup>6</sup>.

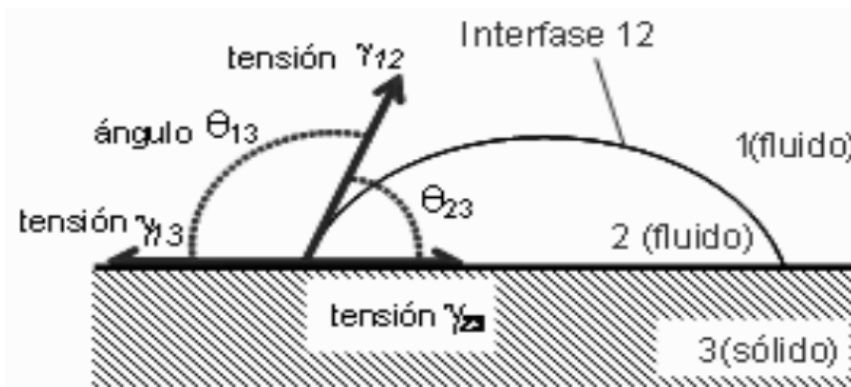


Ilustración 4. Ángulo de contacto en un sistema L-S-L<sup>4</sup>.

Una gota de un fluido preferentemente mojante desplazará a otro fluido; o en un caso extremo se dispersará por toda la superficie. Por el contrario, si un fluido no mojante se deja caer sobre una superficie cubierta por el fluido mojante, se formarán gotas, minimizando su contacto con el sólido<sup>10</sup>.

### 1.3. Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es una propiedad superficial que cuantifica su tendencia a la hidrofobicidad, el cual analiza los mecanismos de interacción entre la fase sólida y líquida, y define la retención del crudo remanente en los yacimientos<sup>4</sup>.

Se constituye como el ángulo formado entre la superficie plana y la línea tangente al punto de contacto entre la gota de líquido con la superficie (Ilustración 5)<sup>5</sup>. La medición de esta propiedad se aplica a sistemas líquido-sólido-gas y líquido-sólido-líquido, en las que influyen las interacciones moleculares y sus fuerzas de cohesión, que suscitan efectos entre las interfaces.

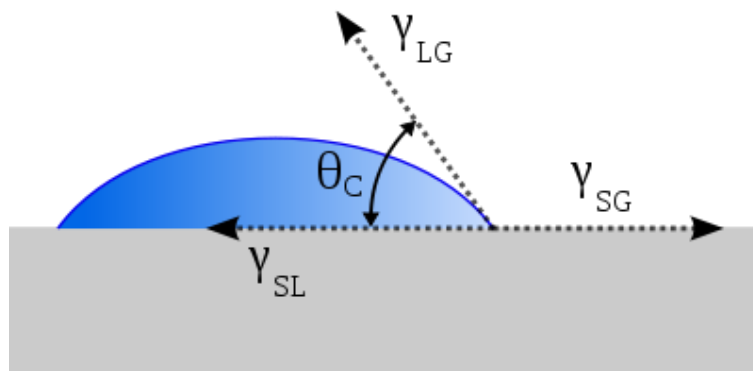


Ilustración 5. Ángulo de contacto en un sistema L-S-G.<sup>6</sup>

El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación existente entre las fuerzas adhesivas del líquido, del sólido y las fuerzas cohesivas del propio líquido. El ángulo de contacto está relacionado con las tres tensiones  $\gamma_{SG}$ ,  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LG}$  de las interfases sólido/gas, sólido/líquido y líquido/gas, respectivamente, a través de la ecuación de Young (Ecuación 2)<sup>6</sup>.

$$\gamma_{LG} * \cos \theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}^6$$

Por ejemplo en la Ilustración 6 se muestra una gota de petróleo (verde) rodeada de agua (azul), sobre una superficie mojabla por agua (izquierda), forma un ángulo de contacto ( $\theta$ ) que es aproximadamente igual a cero. En una superficie mojabla

por petróleo (derecha) la gota se dispersa, generando un ángulo de contacto de aproximadamente  $180^\circ$  (equivalente a  $\gamma_{sw} > \gamma_{so}$ ). Una superficie con una mojabilidad intermedia (centro) también forma una gota, pero el ángulo de contacto está dado por el equilibrio de fuerzas resultantes de la interacción de tres tensiones interfaciales: las que existen entre petróleo y la superficie ( $\gamma_{so}$ ), entre el agua y la superficie ( $\gamma_{sw}$ ) y entre el petróleo y el agua ( $\gamma_{ow}$ )<sup>10</sup>.

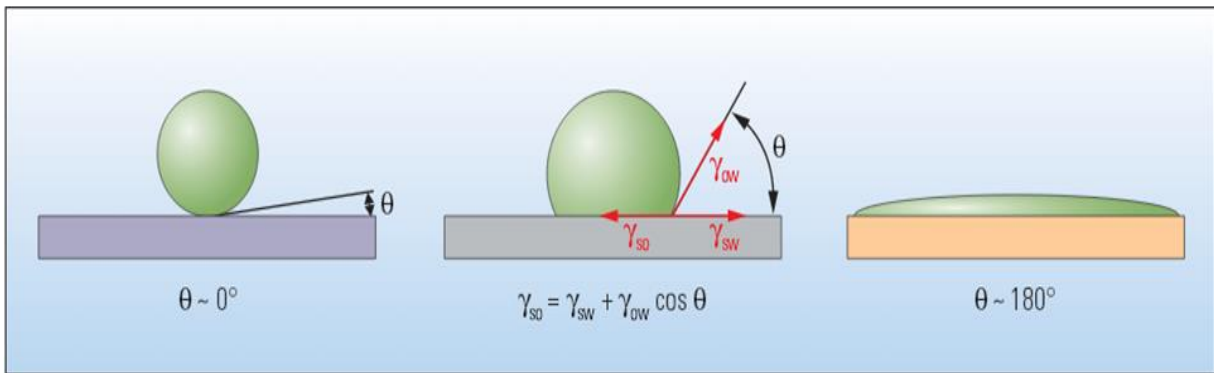


Ilustración 6. Mojabilidad sobre una superficie plana<sup>10</sup>.

### 1.3.1. Medición del ángulo de contacto

Existen algunos métodos para realizar la medición del ángulo de contacto, los cuales comprenden:

**Ascenso capilar:** Se basan en la utilización de la ecuación de Washburn (Ecuación 3).

$$L^2 = \frac{\gamma_{LV} r^* t \cos \theta}{2\eta} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}^4$$

Esta ecuación presenta la relación entre las características de un líquido que asciende por capilaridad a través de un lecho de material, el ángulo de contacto formado en la interfase ( $\theta$ ) y la velocidad a la cual ocurre el ascenso, representada por la relación entre la distancia recorrida ( $L$ ) y el tiempo transcurrido ( $t$ ).

Las características del líquido son su viscosidad ( $\eta$ ) y tensión superficial en la interfase líquido/vapor ( $\gamma_{LV}$ ). El parámetro  $r^*$  corresponde al tamaño medio de poro del lecho formado por el material a caracterizar<sup>4</sup>.

Uno de los métodos que utiliza esta ecuación es la de mojabilidad de capas delgadas, la cual se utilizan para medir el ángulo de contacto sobre materiales finos<sup>4</sup>.

**Ángulo de contacto:** Mide el ángulo formado por una gota, que descansa sobre la superficie del sólido, anteriormente la medición del ángulo era realizada con ayuda de un goniómetro, sin embargo hoy en día existen software que procesan una imagen digital de la gota, la cual al fijar la línea de la superficie, permita identificar el contorno de la gota, y así establecer tres puntos del contorno para obtener la ecuación de la circunferencia, que permite determinar el radio y la cuerda que une los extremos del perfil de la gota. Con estos parámetros (radio y cuerda) y mediante el uso de relaciones trigonométricas se determina el ángulo de contacto, dicho método se empleó para realizar las mediciones experimentales del presente trabajo<sup>32</sup>.

### 1.3.2. Parámetros de influencia

Existen parámetros que pueden afectar el ángulo de contacto. Esto se debe a las características del sistema que se estudia.

El ángulo de contacto depende de la **temperatura** puesto que la tensión interfacial también depende de ésta. En general; el ángulo de contacto crece al aumentar la temperatura<sup>27</sup>; por lo tanto es importante el estudio de esta propiedad a temperatura de yacimiento controlando la misma durante las experimentaciones de selección de tensoactivos en la recuperación mejorada de petróleo.

La **presión** es otro de los factores que influye, ya que esta puede intervenir en el equilibrio de las fases y en la estabilidad de la gota, además de que la tensión interfacial disminuye al aumentar la presión, produciendo un aumento del ángulo de contacto a presiones más altas, sin embargo el equipo cuenta con un controlador de presión para evitar el efecto de cambios de presión durante la experimentación<sup>6</sup>.

Otro de los factores que afectan en la medición es el **volumen de la gota**, ya que en gotas más grandes presentan un ángulo de contacto mayor, provocando la dispersión de las mediciones, por lo que se cuidó el volumen de la gota durante las experimentaciones para obtener una gota simétrica, por dicha razón se prefiere que la gota sea lo más pequeña posible<sup>6</sup>.

**Preparación de la roca utilizada**, ya que los núcleos son traídos desde yacimientos, los cuales no son limpiados de impurezas que pueden afectar durante el experimento de medición del ángulo de contacto, es necesario mitigar estas alteraciones con el acondicionamiento de los núcleos, eliminando las impurezas que pueda tener la roca en su superficie.

La **rugosidad** es otro de los factores que afectan, ya que la mojabilidad aumenta con el incremento de la rugosidad de la superficie, como se representa en la Ecuación 4:

$$\cos \phi = \left( \frac{A_r}{A_\alpha} \right) \cos \theta \dots \dots \dots Ecuación 4^6$$

Donde  $\theta$  es ángulo de contacto,  $\phi$  es el ángulo de contacto aparente,  $A_r$  es el área del sólido ( $m^2$ ) y  $A\alpha$  es el área aparente del sólido ( $m^2$ )<sup>6</sup>.

A mayor temperatura se reduce la influencia de la rugosidad, sin embargo este efecto varía dependiendo de la naturaleza del líquido<sup>6</sup>.

#### 1.4. Caliza

Ya que el propósito de este trabajo es el estudio de la mojabilidad sobre superficies carbonatadas, es muy importante saber que son, cuáles son sus propiedades y sus características, para identificarla y entender los efectos que se suscitaran en la superficie durante el cambio de mojabilidad. La caliza representa la roca de yacimientos carbonatados, son rocas sedimentarias, provenientes de esqueletos carbonatados de seres vivos que se depositaron a lo largo del tiempo en los fondos de los océanos, que a través de acciones químicas, permitieron la formación del yacimiento<sup>2</sup>, la caliza contiene por lo menos 50% de minerales de calcita ( $CaCO_3$ ) y dolomita ( $Ca,Mg(CO_3)$ ), predominando la calcita. Cuando prevalece la dolomita se denomina dolomía.

La caliza es aglomerante, neutralizante y escorificante, fundente<sup>3</sup>, se disuelve en las aguas aciduladas por lo que el agua de lluvia y ríos (ligeramente ácidas) provoca la disolución de la caliza, creando un tipo de meteorización característica denominada kárstica o cárstica<sup>11</sup>. La superficie de caliza puede poseer carga positiva por debajo de un pH de 9,5 como se puede observar en la Ilustración 7, de manera que pueden adsorber los iones con cargas negativas<sup>10</sup>.

La carga que presenta sobre su superficie la caliza es la que propicia una adsorción bajo condiciones de fuerza iónica constante, se caracteriza por la existencia de interacciones electrostáticas entre el agente tensoactivo iónico y la superficie sólida de carga opuesta, lo que puede provocar un cambio en la mojabilidad<sup>22</sup>.

Como se mencionó anteriormente para realizar la identificación de la roca se usa la fluorescencia de rayos X, la cual es una técnica espectroscópica de emisión, sus principales aplicaciones se relacionan directamente con la identificación y cuantificación elemental de distintos tipos de materiales<sup>13</sup>.

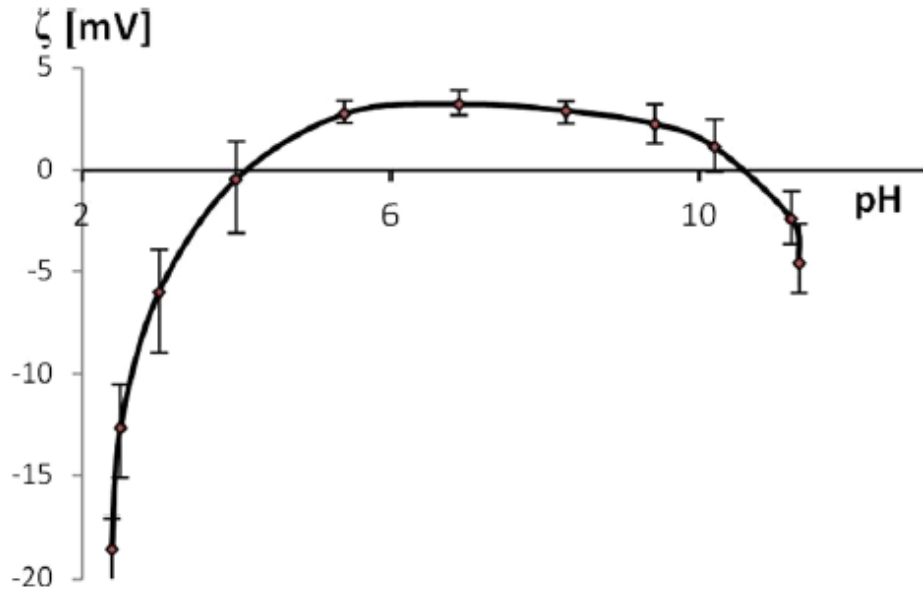


Ilustración 7. pH vs potencial Z, de una roca caliza<sup>21</sup>.

### 1.5. Tensoactivo

Los tensoactivos son moléculas con doble afinidad, ya que presenta una parte polar (hidrofílica) y así como una apolar (hidrofóbica) (Ilustración 8). Este tipo de estructura suelen ser absorbidas en la interfaces, forma agregados, que se asocian en disoluciones acuosas<sup>19</sup>.

La parte polar o hidrofílica de la molécula puede llevar o no una carga, lo que define al tensoactivo en iónico o no iónicos respectivamente, aquellos tensoactivos que poseen una carga positiva son catiónicos, mientras que aquellos que presentan una carga negativa son aniónicos<sup>19</sup>.





Ilustración 8. Estructura de los tensoactivos<sup>31</sup>.

Los tensoactivos catiónicos son aquellos que en solución forman iones (Ilustración 9), provocando la formación de una carga positiva en el grupo hidrofílico de la molécula; en general son compuestos cuaternarios de amonio o una amina grasa en medio ácido. La mayoría de los tensoactivos catiónicos están constituidos por una cadena larga de sales de amonio cuaternarios o sales de alquilaminas<sup>24</sup>.

Los tensoactivo aniónico están constituidos por una cadena alquílica lineal o ramificada. En solución ionizan, pero considerando el comportamiento de sus grupos en solución (Ilustración 9), el grupo hidrofílico queda cargado negativamente<sup>25</sup>.

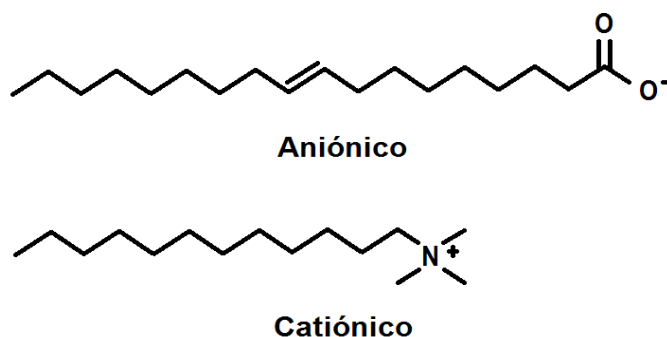


Ilustración 9. Tensoactivos iónicos

Los compuestos aniónicos muestran una adsorción sustancialmente mayor, en comparación con los catiónicos en estudios realizados en superficies de caliza, bajo las mismas condiciones, debido a la carga positiva que se distribuye por la superficie de la roca<sup>20</sup>.

Los tensoactivo no iónico son aquellos que sin ionizarse, se solubilizan mediante un efecto combinado de un cierto número de grupos solubilizantes débiles (hidrófilos) que presentan enlaces tipo éter o grupos hidroxilos en su molécula. Estos tensoactivos no se ven afectados por la dureza del agua y son compatibles con todos los tipos de tensoactivos<sup>25</sup>.

Finalmente los tensoactivos anfóteros contienen ambas cargas aniónicas y catiónicas. La carga negativa la lleva usualmente un grupo carboxilo y la carga positiva un grupo amino. El pH de la solución afecta el comportamiento del tensoactivo y adquieren características diferentes. A un pH bajo domina el comportamiento catiónico mientras que a alto pH el comportamiento prevaleciente es aniónico. Entre estos dos extremos en el pH habrá una condición en la que ambas cargas serán iguales este punto se conoce como punto isoeléctrico y es reversible subiendo o bajando el pH y la molécula se conoce como un Zwitterion, la cual no se comporta como un tensoactivo y precipita en disolución<sup>25</sup>.

## **1.6. Ácidos carboxílicos**

El crudo al ser una mezcla de hidrocarburos, puede presentar en su composición un agente tensoactivo natural como lo son los compuestos que contienen al grupo carboxilo, los que son llamados ácidos carboxílicos. Los ácidos carboxílicos se clasifican de acuerdo con el sustituyente unido a su grupo carboxilo. Estos compuestos hierven a temperaturas muy superiores que los alcoholes, cetonas o aldehídos de pesos moleculares semejantes. Los puntos de fusión también son altos en el caso de cadenas superiores de 8 átomos de carbono. Forman puentes de hidrógeno con el agua, y los de peso molecular más pequeños son miscibles

en agua. A medida que aumenta la longitud de la cadena de carbono, disminuye la solubilidad en agua; los ácidos con más de diez átomos de carbono son esencialmente insolubles. La mayoría de los ácidos carboxílicos son bastante solubles en solventes no polares, porque el ácido continúa existiendo en la forma dimerica en el solvente no polar. Un ácido carboxílico cede protones por ruptura heterolítica del enlace O-H dando un protón y un ion carboxilato (Ilustración 10)<sup>17</sup>, lo que los hace perfectos candidatos para la adsorción de la superficie de la caliza.

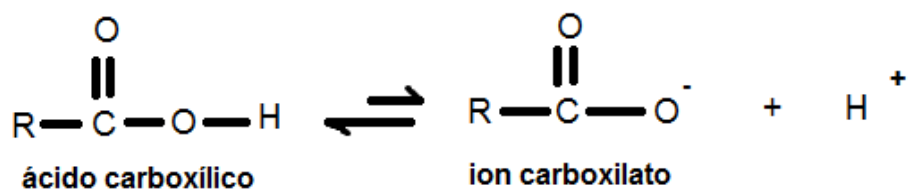


Ilustración 10. Composición de ácidos carboxílicos en equilibrio<sup>17</sup>.

Los ácidos carboxílicos alteran la mojabilidad de los yacimientos carbonatados<sup>10</sup>. Ya que la superficie de la caliza inicialmente positiva adsorbe aniones (ion carboxilato) llegando a un punto de carga cero, la adsorción se propaga hasta la saturación<sup>21</sup> (Ilustración 11). Este proceso es el principal responsable de que los yacimientos carbonatados sean mojables por el aceite, dificultando la extracción del crudo remanente.

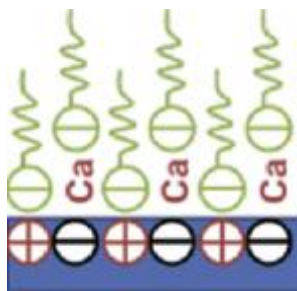


Ilustración 11. Adsorción de un tensoactivo aniónicos sobre una superficie cargada positivamente<sup>20</sup>.

## 1.7. Par iónico

El efecto de formación del par iónico se puede implementar en la remediación de la mojabilidad de la caliza, utilizando un tensoactivo catiónico para estabilizar la carga del ion carboxilato provocando su desorción de la superficie para proporcionar mayor superficie mojabla por el agua<sup>20</sup> (Ilustración 12).

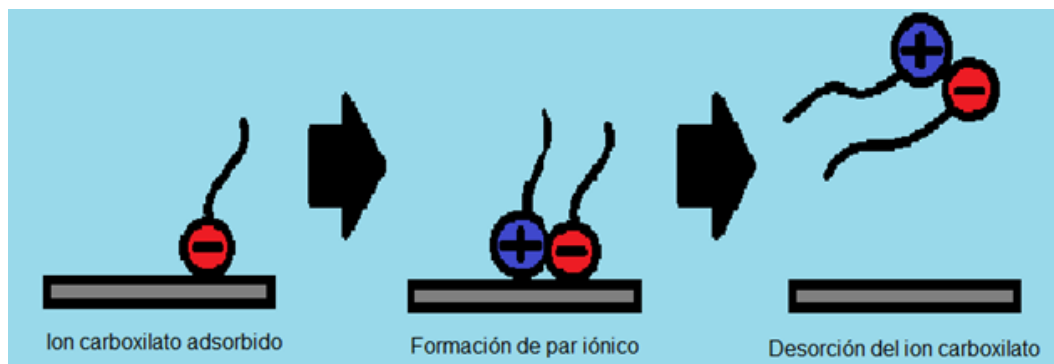


Ilustración 12. Desorción de ácidos carboxílicos.

El par iónico es una especie constituida por lo menos por un catión y un anión que se mantienen unidos por fuerzas electrostáticas. En solventes menos polares que el agua, los iones se encuentran formando pares iónicos<sup>28</sup>.

La carga que presenta uno de los iones es compensada por un contraion, manteniéndose un equilibrio químico entre las diferentes especies que dependerá de las concentraciones del ion y su contraion. No son necesarias concentraciones de contraion muy elevadas (generalmente con 0,003 a 0,005 M es suficiente), pero si suficientes para desplazar el equilibrio, ya que esta concentración es la responsable de mantener la unión del par iónico.

Los dos iones pueden estar conectados en cierto grado. En un par iónico fuerte o íntimo o de contacto, no hay moléculas de solvente entre los dos iones. Cuando se incrementa la solvatación el enlace iónico disminuye y resulta en un par iónico separado por el solvente.<sup>29</sup>

## 2. Metodología

En este capítulo se muestra la descripción gráfica y la metodología del equipo construido para la medición de ángulo de contacto, así como sus componentes y el procedimiento utilizado durante el desarrollo experimental de este trabajo, el cual se centra en el estudio del cambio de mojabilidad en superficies carbonatadas a nivel laboratorio para la selección de tensoactivos en el posible uso en yacimientos carbonatados.

El equipo desarrollado consiste de los siguientes componentes (Tabla 1):

Tabla 1. Componentes del equipo.

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Presión Max. (Psi)</b>	<b>Volumen (ml)</b>
Recipiente	1	-----	500
Válvula de paso	5	10000	-----
Válvula de 3 vías	5	10000	-----
Bomba manual	1	10000	250
Microbomba	1	7400	2,5
Celda	1	5000	39
Bala contenedora	2	5000	250 y 500
Cámara de alta definición	1	-----	-----

Los componentes antes mencionados se ensamblaron como se muestra en la Ilustración 13 y 14, con el propósito de controlar:

- La purga del equipo
- La presión dentro del equipo
- El volumen de la gota de aceite
- La visibilidad del sistema

Para realizar la experimentación fue necesario hacer uso de los reactivos que se muestran en la Tabla 2

Tabla 2. Lista de sustancias utilizadas.

<b>ID</b>	<b>Sustancia</b>
Q473-I	Agua desionizada
Q015-I	N-Decano
Q620-I	Disolución de tensoactivo
Q012-I	Tolueno
Q001-I	Etilendiamina
Q002-I	1-Metil-2-Pirrolidona
Q735-I	Disolución de laurato de sodio

Como medida de seguridad debe hacerse uso de los siguientes materiales:

- Bata de algodón
- Guantes de nitrilo
- Lentes de seguridad
- Calzado de seguridad

La metodología se desarrolló considerando el sistema constituido por:

- Roca:
  - Caliza lavada con tolueno y aminas para eliminar material orgánico e impurezas
- Agua:
  - Tipo I, desionizada (no presenta concentraciones de iones interferentes y tiene una resistividad de 18,2 MΩ·cm)
- Fase orgánica:
  - N-Decano, 99,4 % pureza
- Tensoactivo:
  - Q620-I, Mezcla de tensoactivos Catiónico + Anfotérico, al 0,1 % w
- Disolución de laurato de sodio
  - Concentración de 1,5% w, con un pH de 10
- Condiciones
  - P=500 psi y T=60°C

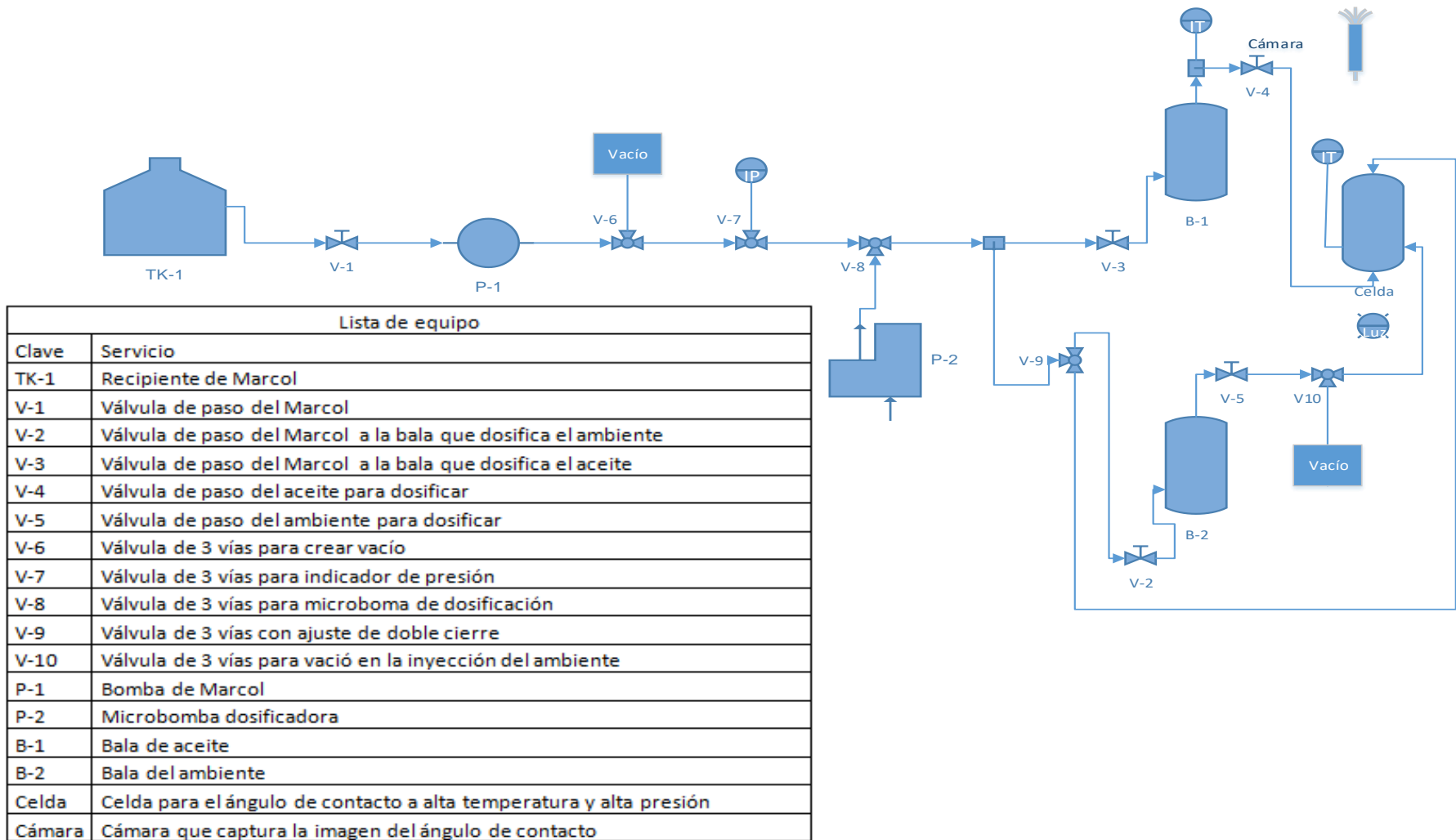


Ilustración 13. Equipo de medición de ángulo de contacto.



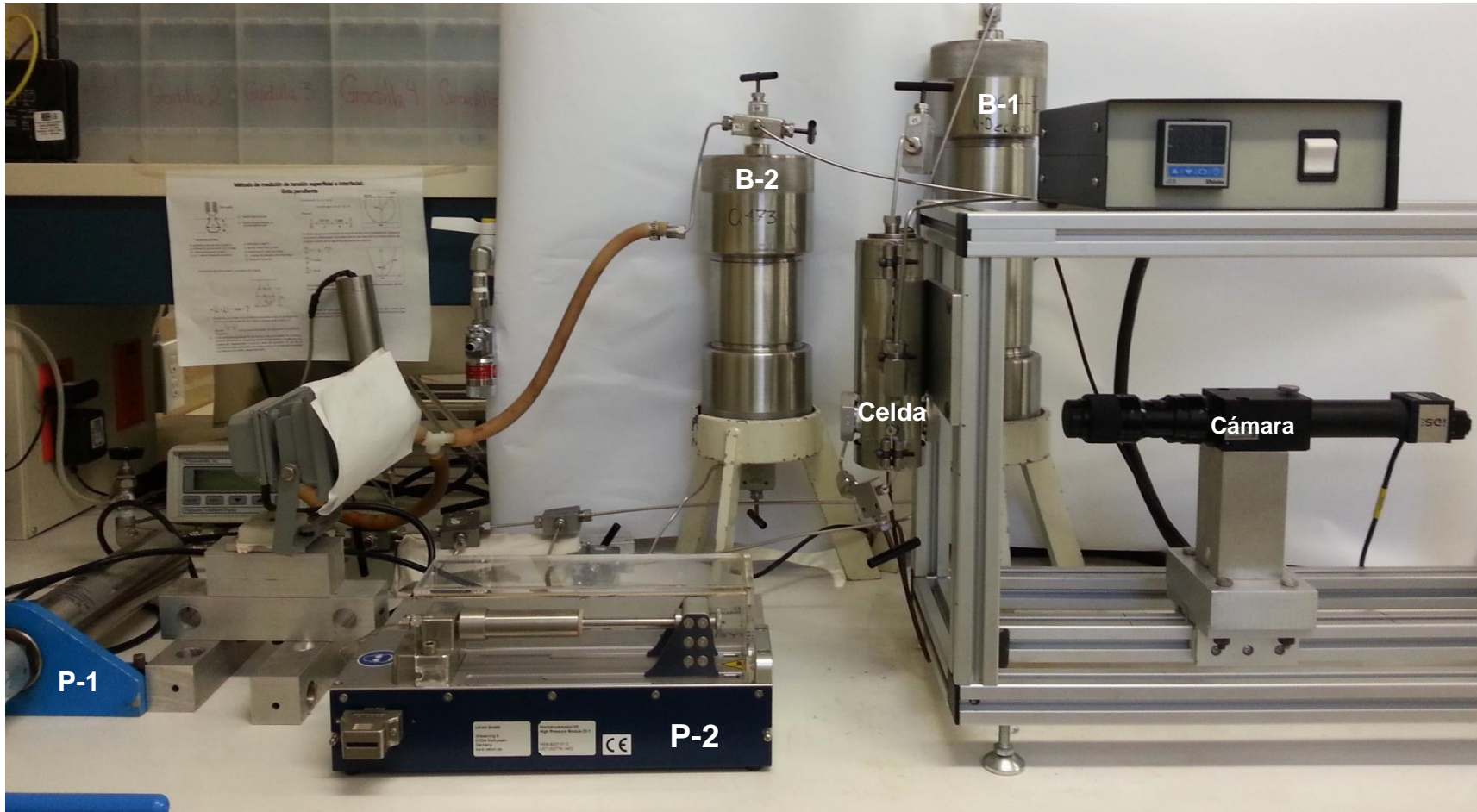


Ilustración 14. Foto del equipo de medición de ángulo de contacto.

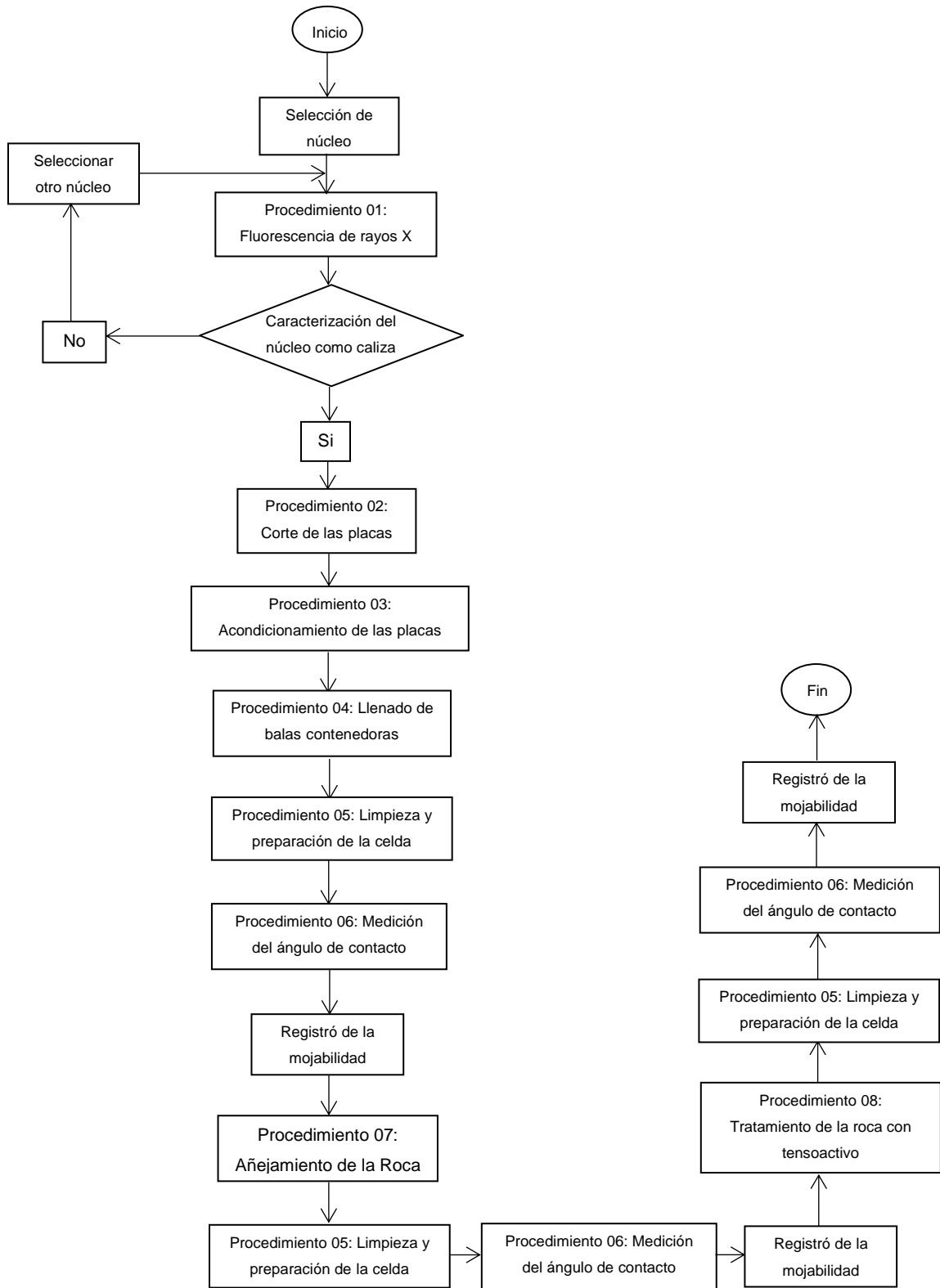


Ilustración 15. Diagrama de flujo para la determinación del ángulo de contacto.

## **2.1. Metodología para la determinación del ángulo de contacto**

Para determinar el ángulo de contacto se caracteriza el núcleo por medio de fluorescencia de rayos X, la cual determinara si presenta características de una roca caliza de acuerdo a su composición, una vez que se llega a la conclusión de que la roca es caliza se procede a cortarla en placas, posteriormente se acondicionan con el propósito de eliminar las impurezas de la superficie, y se procede al llenado de las balas para la inyección de los fluidos a estudiar ( N-Decano y Agua desionizada), así mismo se realiza la limpieza y preparación de la celda para realizar la inyección de dichos fluidos, una vez realizado lo anterior se procede a la medición del ángulo de contacto de una gota de n-decano sobre una superficie limpia de caliza en un ambiente saturado por agua.

Se realiza la limpieza y preparación de la celda para un segundo experimento, donde se lleva acabo el acondicionamiento de la placa utilizada en la primera experimentación sometiéndola a añejamiento con una disolución de laurato de sodio para inducir a un cambio de mojabilidad de la roca por el aceite, realizar la medición del ángulo de contacto en la superficie después de ser añejada durante 24 horas, una vez finalizado dicho experimento se procede a realizar la limpieza y preparación de la celda para un tercer experimento donde la placa utilizada anteriormente se somete a añejamiento en una disolución de tensoactivo durante 24 horas, y se procede a la medición del ángulo de contacto sobre una superficie remediada con tensoactivo, se realiza un registró de los resultados de esta en cada una de las mediciones realizadas así como un registro fotográfico.

## 2.2. Procedimiento 01: Fluorescencia de rayos X.

- I. Caracterizar el núcleo (roca) a través del análisis composicional, proporcionados por el equipo de difracción de rayos X, para esto se utilizó el equipo Termo Scientific Niton XL3t XRFAnalyzer® (Ilustración 16).



Ilustración 16. Fluorescencia de rayos X.

El equipo realiza el análisis en 4 ciclos los cuales son:

- 1° Ciclo “Main Filter”: Tiempo de duración 30 segundo, en el cual se mide lo siguiente: Sn, Sb, Ag, Balance, Mo, Nb, Zr, Sr, Rb, Bi, As, Se, Au, Pd, W, Zn, Cu, Re, Ta, Hf, Ni, Co, Pb, Fe, Mn, Cr, V, Ti.
- 2° Ciclo “Low Filter”: Tiempo de duración 30 segundos, en el cual se mide lo siguiente: Cr, V, Ti, Ca, K.
- 3° Ciclo “High Filter”: Tiempo de duración 30 segundos, en el cual se mide lo siguiente: Ba, Sb, Sn, Cd, Pd, Ag.

- 4° Ciclo "Light Filter": Tiempo de duración 45 segundos, en el cual se mide lo siguiente: Al, P, Si, Cl, S, Mg.

### 2.3. Procedimiento 02: Corte de las placas.

- I. Cortar las placas conforme a las dimensiones que se mencionan en la Tabla 3:

Tabla 3. Dimensiones de las placas.

<b>Dimensiones de placas</b>		
<b>Especificación</b>	<b>Medida</b>	<b>Unidad</b>
Espesor	0,3	cm
Longitud	1,3	cm
Ancho	0,7	cm

### 2.4. Procedimiento 03: Acondicionamiento de las placas.

- I. Colocar las placas en el cartucho de extracción Soxhlet.
- II. Poner el cartucho de extracción con las placas en la trampa tipo soxhler.
- III. Colocar en el matraz de bola con fondo plano el fluido diluyente que se utiliza en el primer lavado (Q012-I).
- IV. Lubricar las juntas esmeriladas con grasa, considerando que no habrá interacción química con la muestra.
- V. Montar el equipo que se utiliza para el acondicionamiento de las placas como se muestra en la Ilustración 17.
- VI. Calentar el matraz bola de forma constante hasta llegar a punto ebullición del fluido diluyente.

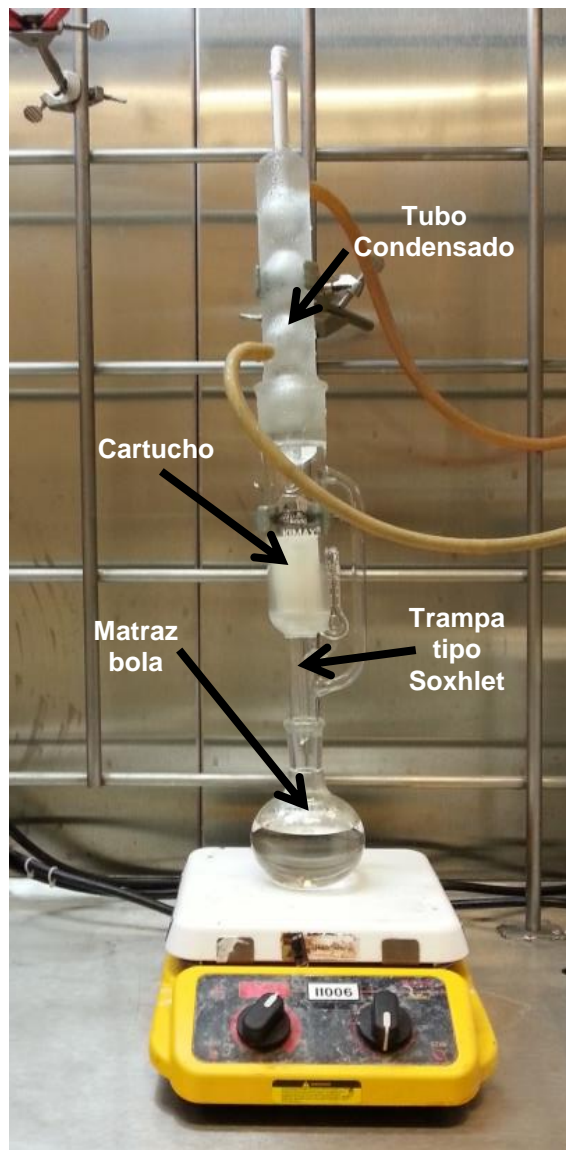


Ilustración 17. Sistema de extracción Soxhlet.

- VII. Tomar el tiempo y regular el desfogue, para que se realicen 4 ciclos en 8 horas, esto se hace por medio de aumento o disminución de temperatura (el desfogue ocurre cuando el fluido llega al tope del extractor soxhlet).
- VIII. Dejar que el sistema de extracción y el líquido diluyente en el matraz se enfríen.

- IX. Retirar las placas del sistema de extracción.
- X. Secar las placas en un horno con vacío, a 90°C y 390mb de presión de vacío (se utilizó el horno marca Memmert modelo UF75 plus®), hasta obtener peso constante.
- XI. Cambiar el líquido diluyente que está en el matraz de bola de fondo plano, por una mezcla de aminas (los diluyentes y sus volúmenes para la elaboración de la mezcla, están detalladas en la Tabla 4).

Tabla 4. Volúmenes de los diluyentes para la mezcla de aminas.

<b>Producto químico</b>	<b>Cantidad (ml)</b>
Q012-I	200
Q001-I	65
Q002-I	35

- XII. Repetir desde el paso II hasta el X, para el segundo lavado con la mezcla de aminas.
- XIII. Cambiar el líquido diluyente que está en el matraz de bola de fondo plano, por Tolueno (Q012-I).
- XIV. Repetir desde el paso II hasta el X para el tercer lavado con Tolueno.

#### **2.5. Procedimiento 04: Llenado de balas contenedoras**

- I. Desarmar la parte superior de la bala (Ilustración 18).
- II. Llenar la bala con el fluido asignado.
- III. Armar la parte superior de bala.
- IV. Colocar la bala en el lugar asignado de acuerdo a la Ilustración 13.



Ilustración 18. Estructura de la bala contenedora.

## 2.6. Procedimiento 05: Limpieza y preparación de la celda

### Limpieza de la celda

- I. Desarmar pistón.
- II. Realizar lavado de los componentes del pistón (4 veces):
  - **Lavar con Cloruro de metileno.**
  - **Posteriormente lavar con Acetona.**
  - Lavar con agua y con jabón todas las piezas del pistón.
  - **Finalmente lavar las piezas del pistón con acetona.**
  - Secar todas las piezas del pistón.
- III. Realizar Lavado de paredes, ventanas, tapas y empaques de la celda (4 veces):

Nota: las letras en negritas son los lavados en los cuales no se incluyen los o´ring y los empaques, ya que las sustancias utilizadas los dañan.



- **Lavar con Cloruro de metileno.**
- **Posteriormente lavar con Acetona.**
- Lavar con agua y con jabón todas las piezas.
- **Finalmente lavar las piezas con acetona.**
- Secar las paredes, ventanas, tapas y empaques de la celda.

IV. Armar pistón de la celda.

V. Montar la celda en el lugar asignado de acuerdo al diagrama del equipo.

#### Preparación de la celda

I. Quitar la tapa superior de la celda (Ilustración 19).

II. Quitar la tapa inferior de la celda.

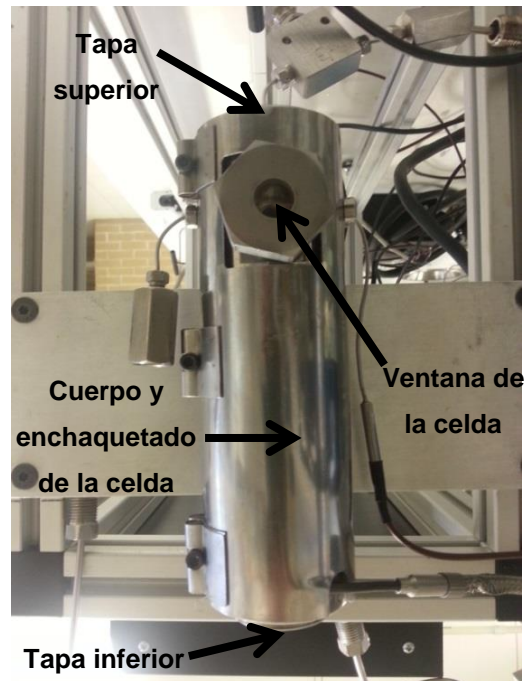


Ilustración 19. Celda para la medición del ángulo de contacto.

Nota: las letras en negritas son los lavados en los cuales no se incluyen los o´ring y los empaques, ya que las sustancias utilizadas los dañan.

- III. Sacar pistón de la celda sin dañar las paredes (Ilustración 20).
- IV. Pegar la placa en el porta objeto.



Ilustración 20. Pistón y porta objetos de la celda.

- V. Colocar el pistón en el interior de la celda.
- VI. Armar la celda, colocando los empaques y sus tapas.
- VII. Montar la celda en el equipo de medición de ángulo de contacto.

## **2.7. Procedimiento 06: Medición del ángulo de contacto**

### Preparación del equipo para la medición

- I. Verificar que todas las líneas hidráulicas estén conectadas como se muestra en la Ilustración 13 del equipo para la medición del ángulo de contacto.
- II. Llenar la bomba manual P-1 de Marcol (Ilustración 21), esto se hace al abrir la válvula V-1 (verificar que la V-7 este abierta siempre para medir

la presión del sistema) y accionando el mecanismo de la bomba P-1, moviendo las manivelas en sentido anti-horario.

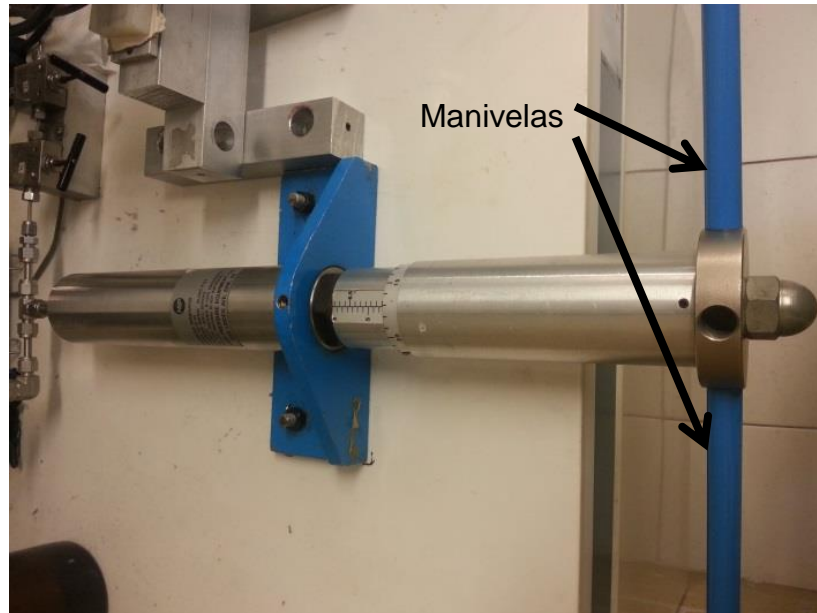


Ilustración 21. Bomba manual.

- III. Realizar purgado de las líneas del fluido hidráulico con la bomba de Marcol P-1, manteniendo todas las válvulas cerradas y girar las manivelas de la P-1, en sentido horario.
- IV. Conectar las líneas del medio de saturación y del aceite, a la celda.
- V. Hacer vacío por 2 horas en el interior de la celda, abriendo únicamente la válvula V10.
- VI. Llenar nuevamente la bomba P-1 como se hizo en el paso II.
- VII. Mover el pistón de la celda, abriendo las válvulas V-7 y V-9, mientras se mantienen todas las demás cerradas y moviendo las manivelas de la bomba P-1 en sentido horario, lo que ocasiona que el pistón se mueva junto con la placa.
- VIII. Mover la placa (que se encuentra en la parte superior de la celda) lo suficientemente cerca del capilar dosificador cuidando no tocarlo.
- IX. Llenar nuevamente la bomba P-1 como se hizo en el paso II.

- X. Hacer purga de la línea del líquido de saturación, dicho líquido se encuentra contenido en la bala B-2, para dosificarlo es necesario mover el pistón interno de la bala, el cual se moverá con el fluido hidráulico, por lo que se mantendrán abiertas solo las válvulas V-9 y V-2. Posteriormente se moverá el Marcol con ayuda de la bomba P-1, moviendo las manivelas en sentido horario.
- XI. Llenar nuevamente la bomba P-1 como se hizo en el paso II.
- XII. Llenar el ambiente con el líquido de saturación, de la misma forma como se hizo en el purgado de las líneas de saturación en el paso IX, con la única diferencia de que también se abrirá la válvula V-5.
- XIII. Utilizar el controlador de la temperatura de la celda, para llevarla y mantenerla a 60°C.
- XIV. Llenar nuevamente la bomba P-1 como se hizo en el paso II.
- XV. Realizar purga de la línea del aceite, el cual se encuentra en la bala B-1, dicho procedimiento es semejante al de la línea de saturación, con la diferencia de que en este proceso se abren solo las válvulas V-7 y V-3.
- XVI. Conectar la Micro bomba (Ilustración 22) dosificadora a la computadora que contiene el software que permite inyectar los fluidos.
- XVII. Llenar la Micro bomba dosificadora, esto se hace abriendo las válvulas V-1 y V-8 y utilizando el software para retraer el embolo de la micro bomba.
- XVIII. Llenar nuevamente la bomba P-1 como se hizo en el paso II.
- XIX. Igualar presión de la bala de aceite y la micro bomba con la celda, esto se hace abriendo las válvulas V-3, V-8, V-9, V-2 y V-5, después se moverá el Marcol® con ayuda de la bomba P-1 al mover sus manivelas en sentido horario.
- XX. Dosificar el aceite para la formación de la gota, a la que se le medirá el ángulo de contacto, para esto solo se mantendrán abiertas las válvulas V-8, V-3 y V-4, ya que se necesita un control del volumen inyectado a la gota. Por diferencia de densidades, el aceite tenderá a ascender, con ayuda de la micro bomba dosificadora (P-2), a la que se le puede fijar el

volumen y la velocidad de inyección por medio del software (Ilustración 22).

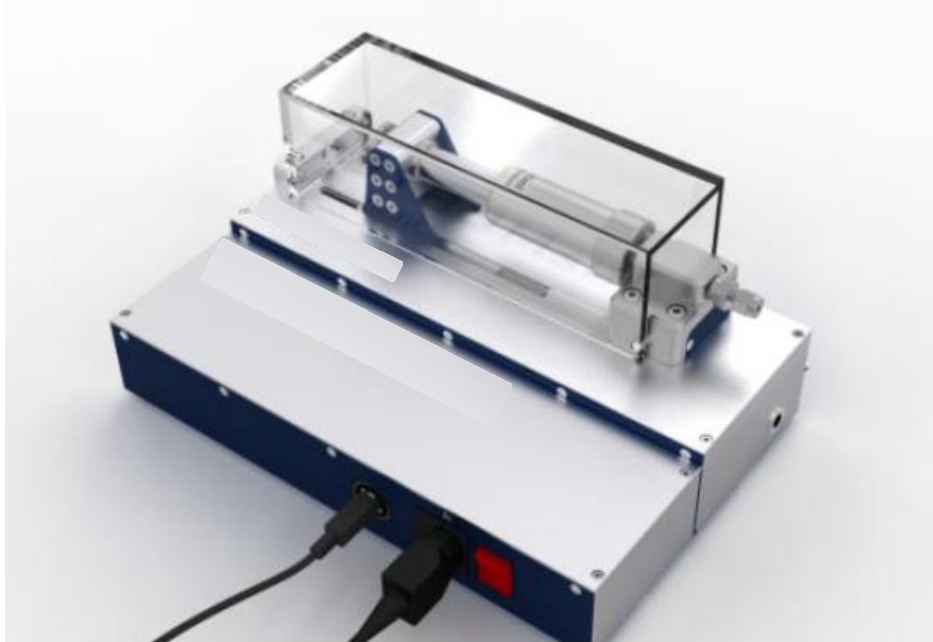


Ilustración 22. Microbomba dosificadora<sup>30</sup>.

- XXI. Alejar la placa del capilar, para la creación de la gota de aceite, esto se hace mediante la abertura de la válvula V-9, y retrayendo el Marcol de la celda con la ayuda de la Bomba P-1, al girar sus manivelas en sentido anti-horario, la placa se moverá lo suficiente para crear la gota y sea posible observar a través de la ventana de la celda.
- XXII. Verificar que la bomba P-1 este llena, en caso de estar vacía, llenar de acuerdo al paso II.
- XXIII. Presurizar el sistema, abriendo únicamente las válvulas V-9, V-2 y V-5.
- XXIV. Dosificar líquido de saturación moviendo las manivelas de la Bomba P-1 en sentido horario, esto se hace hasta alcanzar una presión de 500 psi.
- XXV. Conectarla la cámara del sistema, a la computadora con el software SCA20\_U® (Ilustración 23).

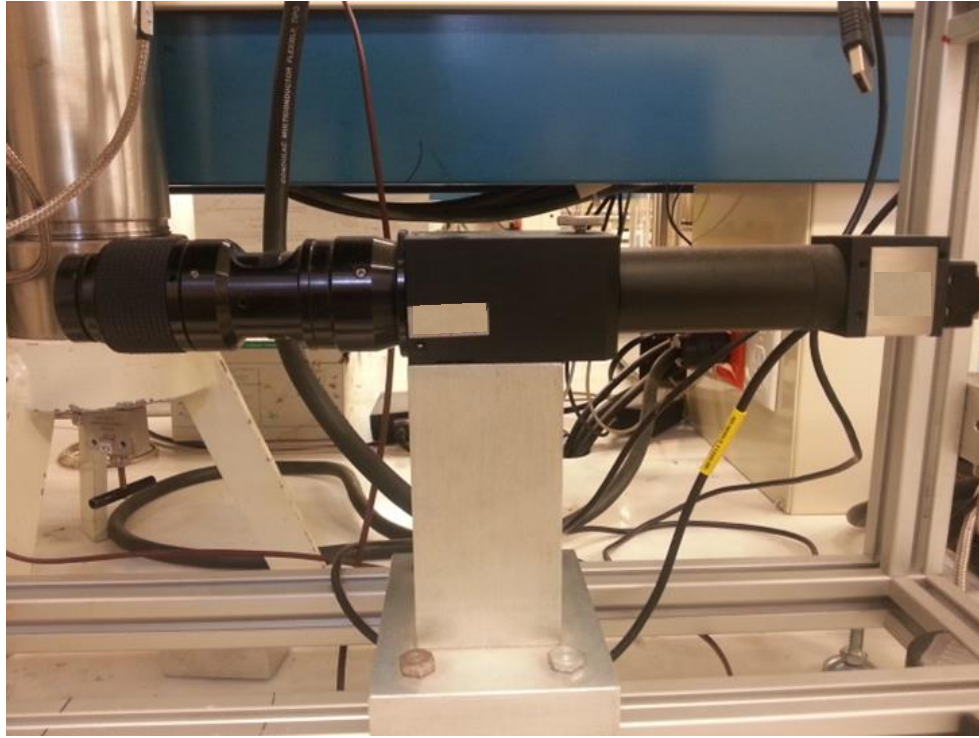


Ilustración 23. Cámara de alta definición.

#### Medición del ángulo de contacto

- I. Abrir un nuevo archivo en el software SCA20\_U® para la medición de ángulo de contacto.
- II. Ajustar el enfoque de la cámara y la iluminación para tener el contorno de la gota bien definido.
- III. Hacer zoom con la cámara, con la finalidad de tener una mejor apreciación de la gota.
- IV. Realizar la captura de la imagen de la gota para la medición del ángulo de contacto (Ilustración 24).

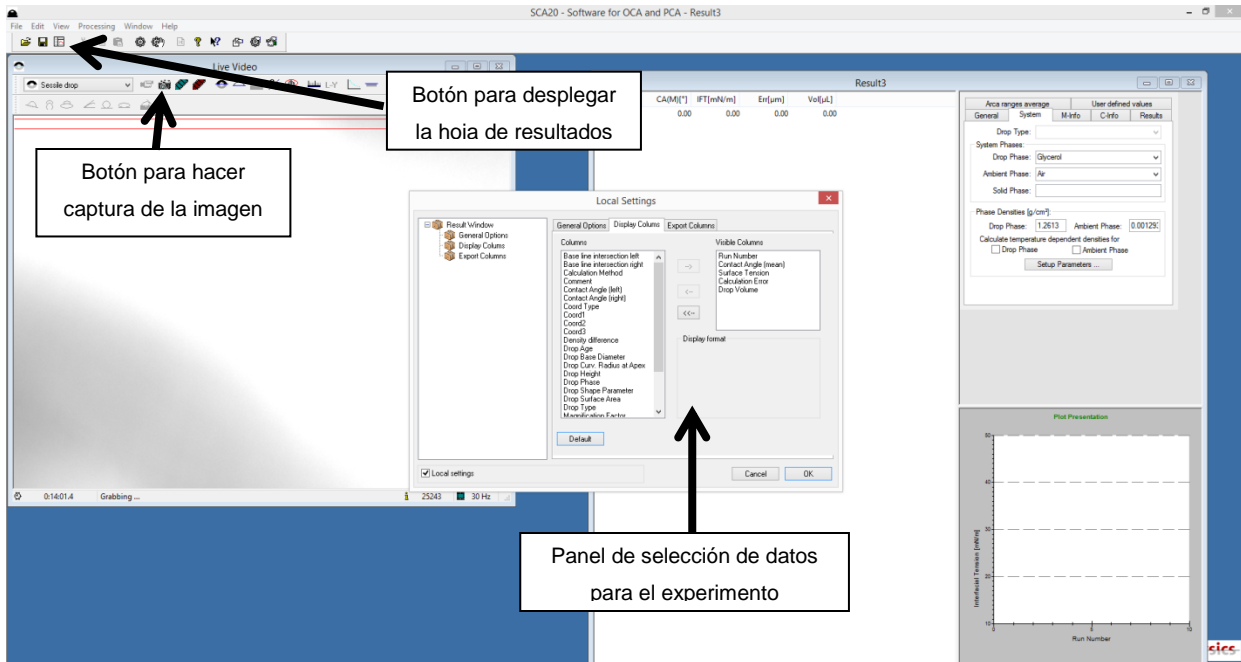


Ilustración 24. Software SCA20\_U®.

- V. Colocar el software SCA20\_U® en la opción de medición de ángulo de contacto.
- VI. Abrir una hoja de resultados (Ilustración 24).
- VII. Seleccionar los datos que se necesiten registrar para la experimentación (Ilustración 25).
- VIII. Ajustar la línea que delimita la superficie de la roca de la gota (Ilustración 25).
- IX. Medir ángulo de contacto del experimento en el tiempo 0 (Ilustración 25).
- X. Dejar que se establezca la gota por un periodo de 4 horas.
- XI. Realizar una captura de imagen de la gota después de las 4 horas.
- XII. Reajustar la línea que delimita la superficie de la roca con gota, en caso de que el ángulo de contacto se mantenga, continuar con el paso XIII.
- XIII. Abrir la hoja de resultados que se utilizó en la primera medición.
- XIV. Medir el ángulo de contacto nuevamente.
- XV. Guardar la hoja de resultados y capturas de las imágenes de la gota.

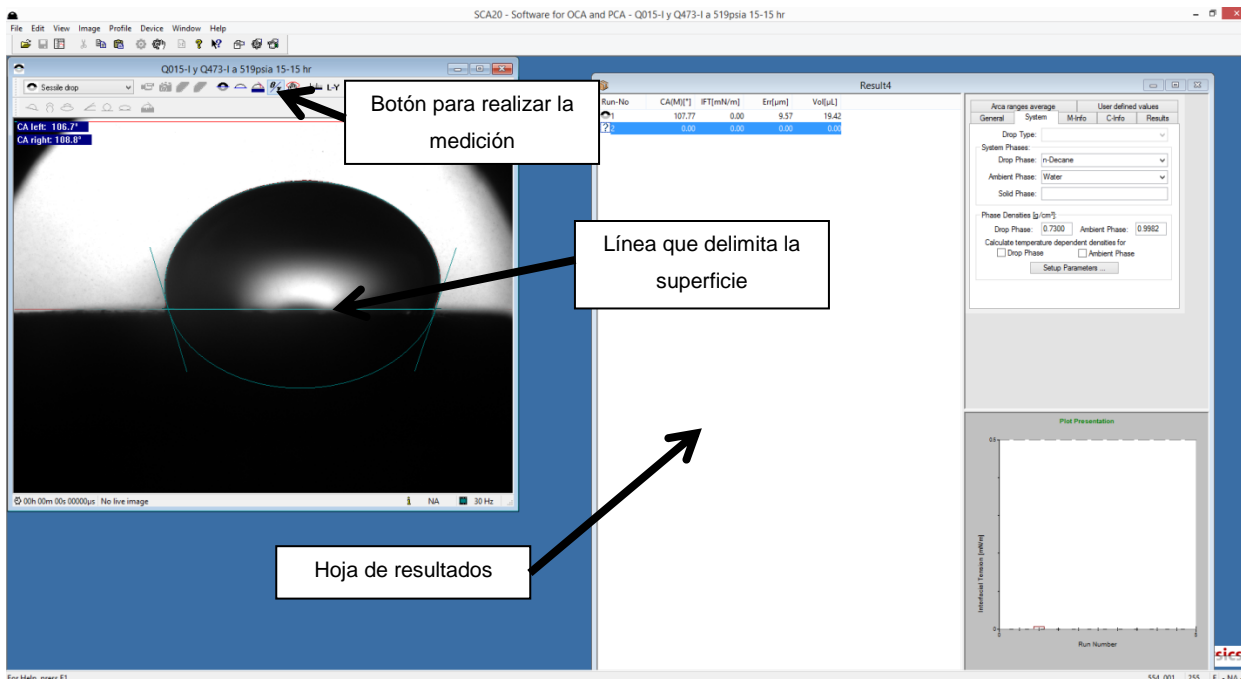


Ilustración 25. Medición del ángulo de contacto por medio de un software SCA20\_U®.

## 2.8. Procedimiento 07: Añejamiento de la roca

- I. Lavar la placa con agua desionizada en un vaso de precipitados, hasta que ésta no presente turbidez.
- II. Colocar en un vaso de precipitados 3 ml de una disolución de Laurato de sodio a 1,5% w, con un pH de 10.
- III. Poner la placa en el vaso de precipitados, que contiene la disolución de Laurato de sodio.
- IV. Dejar la placa añejando durante 24 horas.
- V. Realizar medición del ángulo de contacto



## **2.9. Procedimiento 08: Tratamiento de la roca con tensoactivo**

- I. Introducir la placa en un vaso de precipitados al cual se le colocó 3 ml de una disolución de tensoactivos a una concentración de 0,1 % w.
- II. Dejar placa añejando por 24 horas.
- III. Realizar medición del ángulo de contacto.

### **3. Resultados y análisis**

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante el proceso experimental, lo cual comprende tanto la caracterización del núcleo, como los resultados que se obtuvieron en la medición del ángulo de contacto sobre superficies carbonatadas, con el propósito de estudiar el efecto de cambio de mojabilidad, y los factores que intervienen en este.

#### **3.1. Fluorescencia de rayos X**

La caracterización del núcleo es de gran importancia para el desarrollo de los experimentos en la medición del ángulo de contacto. Esto se debe a que el objetivo es ver los efectos de cambio de mojabilidad en superficies carbonatadas para su aplicación en esos yacimientos. Es por lo que se presentan los resultados obtenidos en la fluorescencia de rayos X, con ayuda del equipo Termo Scientific Niton XL3t XRFAnalyzer<sup>®</sup> mostrando los iones que se identificaron en el núcleo y la cantidad en porcentaje que hay de ellos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del núcleo utilizado, el cual mostro una composición mayor de iones de  $\text{Ca}^{2+}$ , como se puede observar en la Tabla 5, donde se registra una concentración del 43,58 % w. Dicho valor confirma una de las características principales en una roca caliza así como una distribución de carga positiva.

Después de caracterizar el núcleo, se procedió al acondicionamiento del mismo para la medición de ángulo de contacto (dicho acondicionamiento es presentado en el Capítulo 2, apartado 2.6.) esto comprende el corte de las placas y el acondicionamiento con Tolueno y Aminas.

Tabla 5. Resultados de la fluorescencia de rayos X

<b>Resultados de la fluorescencia de rayos X</b>		
<b>Elemento</b>	<b>% w</b>	<b>Error</b>
Ba <sup>2+</sup>	0,026	0,005
Bal	54,27	0,232
Sr <sup>2+</sup>	0,013	0,001
Fe <sup>3+</sup>	0,086	0,007
Ca <sup>2+</sup>	43,58	0,278
Cr <sup>3+</sup>	0,008	0,003
Ti <sup>4+</sup>	0,122	0,016
Si <sup>4+</sup>	0,591	0,059
Cl <sup>1-</sup>	0,025	0,002
S <sup>2-</sup>	1,272	0,029

### **3.2. Medición del ángulo de contacto**

Se realizó la medición de ángulo de contacto para determinar la mojabilidad inicial de la roca, ya que esta propiedad puede ser alterada por componentes del mismo crudo. Para este experimento se utilizó N-Decano para la formación de la gota simulando la fase orgánica, mientras que la saturación del ambiente se ocupó agua destilada a condiciones de presión y temperatura de 500 psi y 60°C. Se utilizó pegamento epóxico para la adherencia de la placa sobre el porta objetos, dejando reposar durante 5 horas.

#### **3.2.1. Superficie limpia**

En la Ilustración 26 se muestra la evolución de la primera gota inyectada sobre la superficie de caliza limpia, donde se observa que conforme aumentó el tiempo, se presentó la variación del ángulo de contacto. Estas variaciones se reportan en la Tabla 6 e Ilustración 27, donde se observa la estabilidad de la medición.

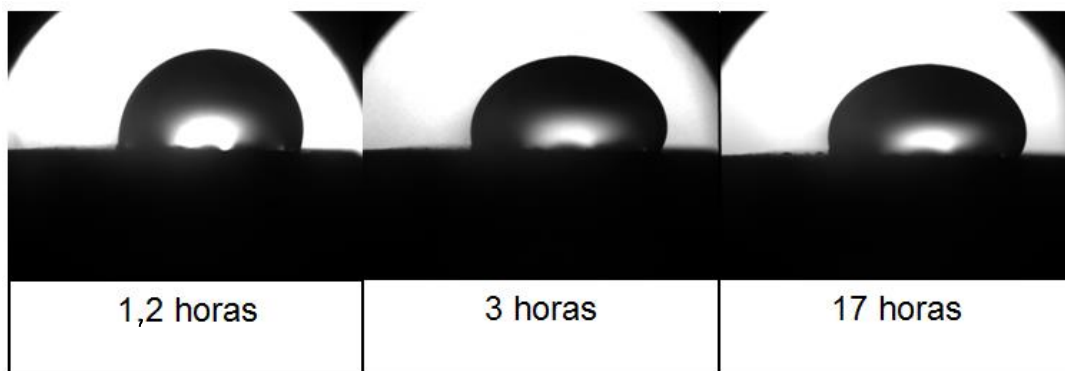


Ilustración 26. Gota de n-decano formada sobre superficie limpia de caliza en ambiente saturado por agua.

Se observa que durante las primeras 3 hrs se presenta un cambio de ángulo de contacto de  $11^\circ$ , después de las 17 horas el cambio se mitiga, con una variación de  $0,2^\circ$ , esto se puede observar en la Ilustración 25, donde del tiempo 0 a 3 hrs se presenta un cambio de ángulo de contacto de  $81^\circ$  a  $70^\circ$ , sin embargo después de haber transcurrido 17 hrs se observa que el ángulo se mantiene en  $70^\circ$ , por lo que se estableció que el tiempo requerido en la estabilización del sistema es de 3 horas, lo cual se aplicó en los siguientes experimentos que se realizaron con una superficie limpia.

Tabla 6. Estabilización de la gota en superficie no tratada.

Tiempo (horas)	Ángulo de contacto ( $^\circ$ )	Volumen ( $\mu$ l)
0,0	80,985	2,603
1,2	80,321	2,651
3,0	69,730	2,652
17,0	69,555	2,642
24,5	69,708	2,667

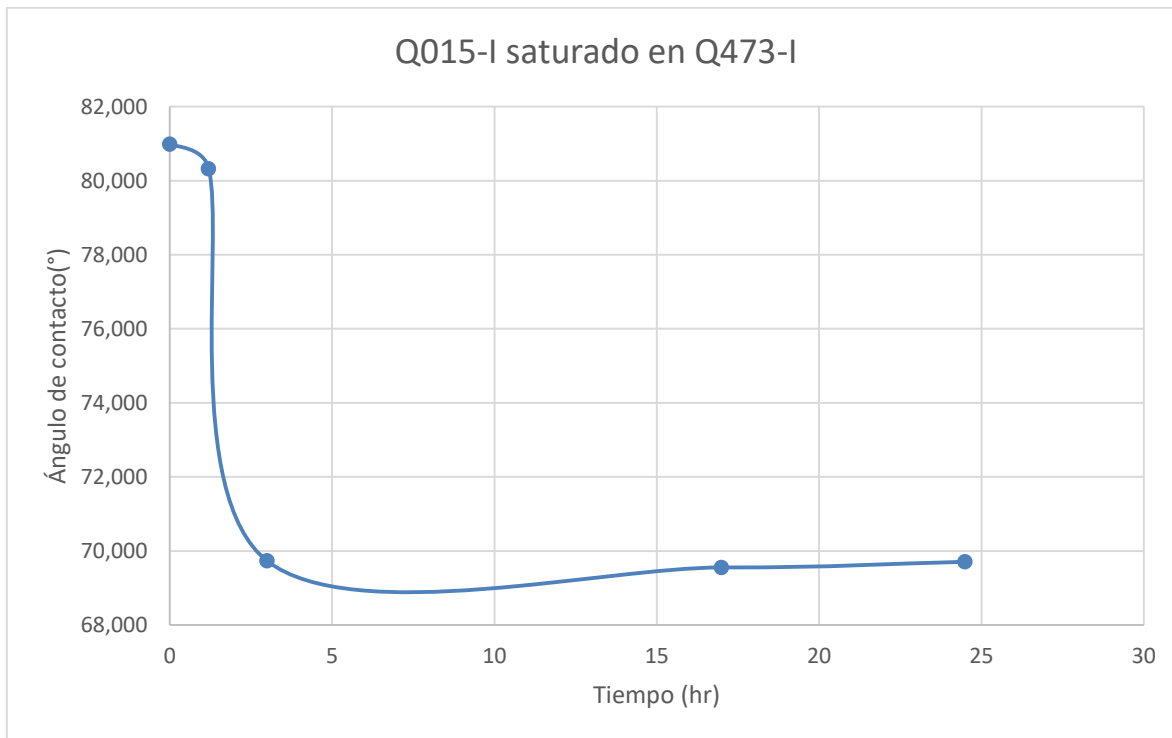


Ilustración 27. Tiempo vs ángulo de contacto con superficie sin tratar.

De acuerdo al ángulo obtenido ( $70^\circ$ ) se infiere que la mojabilidad de la roca es hacia el agua, lo que se espera al analizar una roca limpia, sin embargo es necesario tener en cuenta que el crudo es una mezcla de compuestos orgánicos, los cuales pueden tener un efecto sobre la superficie de la roca cambiando su afinidad.

Otro de los aspectos que se buscó fue el grado de dispersión de las mediciones de los experimentos, por lo que la medición del ángulo de contacto se repitió tres veces en diferentes placas del mismo núcleo (Tabla 7), tanto para las placas antes de añejar, añejadas y tratadas con disolución de tensoactivo.

A continuación, se presentan las mediciones para las placas antes de ser añejadas por la disolución de Laurato de sodio, dichos resultados presentan una desviación estándar de 0,155 y una varianza de 0,024.

Tabla 7. Ángulo de contacto de los tres experimentos en superficie no tratada.

Repeticiones	Experimento	Ángulo de contacto (°)
1	Q620-I	69,730
2	Q620-I	69,944
3	Q620-I	70,032
<b>Ángulo de contacto promedio (°)</b>		<b>69,902</b>

### 3.2.2. Superficie añejada con Laurato de sodio

En yacimientos carbonatados el cambio de la mojabilidad hacia el aceite recae en los ácidos carboxílicos, que por la carga superficial de la roca se adsorben, y ocasiona un problema, ya que el aceite a nivel de poro permanece atrapado.

El experimento se realiza sobre una superficie añejada con una disolución de Laurato de sodio a una concentración de 1,5% w, los cuales simulan los ácidos carboxílicos del crudo, ya que estos compuestos poseen un ion carboxilato en su estructura por lo que son adsorbidos. Debido a esto se sumergen las placas en la disolución, por 24 horas para asegurar que los iones se adsorban en la superficie, se utilizó un pH de 10 con el propósito de que la roca no se disuelva.

En este experimento se observó que la gota formada sobre la superficie presenta un cambio más rápido en su ángulo de contacto por presentar una afinidad favorable con el sólido, ya que se estabilizó a los 12 segundos después de hacer la inyección del N-Decano (Ilustración 28).

Se realizaron 3 mediciones sobre las placas añejadas, así como se hizo con las superficies limpias.

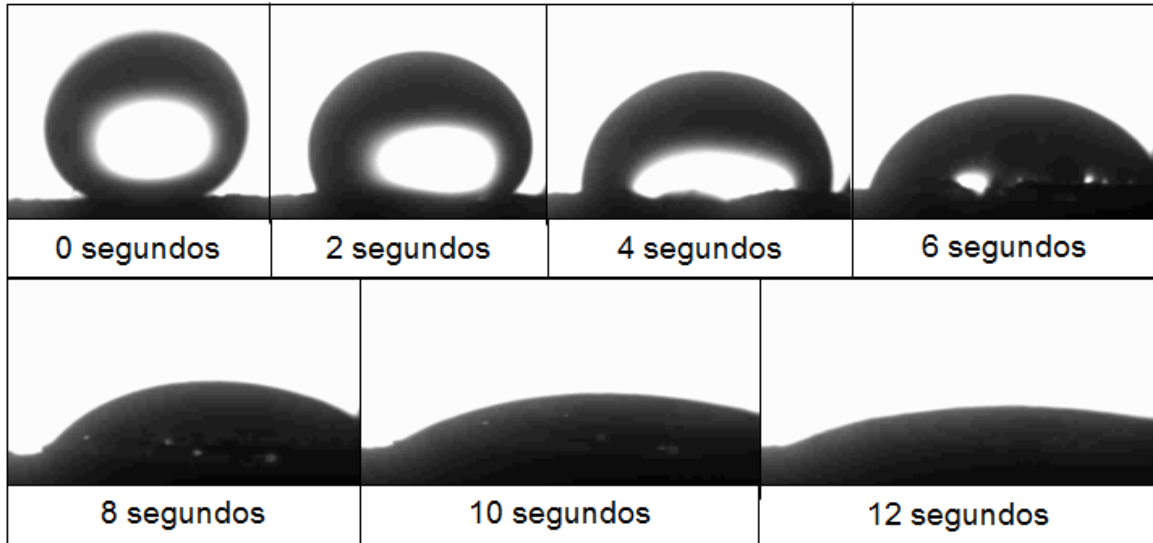


Ilustración 28. Gota de n-decano formada sobre superficie añejada de caliza en ambiente saturado por agua.

Los experimentos permiten comprobar que el Laurato de sodio que se adsorbió en la superficie caliza, provocó una alteración de la mojabilidad inicial de la roca, pasando de una mojabilidad por el agua a una por el aceite, dicho resultado favorece el aumento de las fuerzas capilares, por lo que la inyección de agua no podrá recuperar todo el crudo remanente del yacimiento, lo que requerirá la adición de un producto químico, el cual remedie la mojabilidad inicial de la caliza.

### 3.2.3. Superficie tratada con tensoactivo

En estos experimentos se trata las placas añejadas con una disolución de tensoactivo, con el propósito de remediar la mojabilidad de la roca, en este proceso se utilizó una mezcla de tensoactivos, catiónico y anfótero (Q620-I), esta disolución se preparó con agua desionizada (Q473-I), a una concentración de 0,1 % w. La placa se sumergió en la solución por 24 horas, para asegurarse de que el

tensoactivo interaccione con los iones de carboxilatos que se adsorbieron en la superficie de la caliza.

Los resultados permiten comprobar que la disolución de tensoactivo, propició la remediación de la mojabilidad original de la roca, al formar un par iónico con los compuestos carboxilatos que poseen una carga negativa en su estructura, que se encuentran adsorbidos por interacciones electrostáticas en la superficie de la caliza provocando una mojabilidad por el aceite, la interacción con el tensoactivo catiónico le proporcionará un nivel más bajo de energía y mayor estabilidad, lo que provocará la desorción de los ácidos, dando como resultado una disminución de las fuerzas capilares, facilitando la extracción del crudo remanente que se encuentra atrapado en los poros de los yacimientos carbonatados. Esta remediación de la mojabilidad por tensoactivos catiónicos puede ser de gran utilidad en procesos de recuperación mejorada de yacimientos para incrementar el factor de recuperación de crudo remanente.

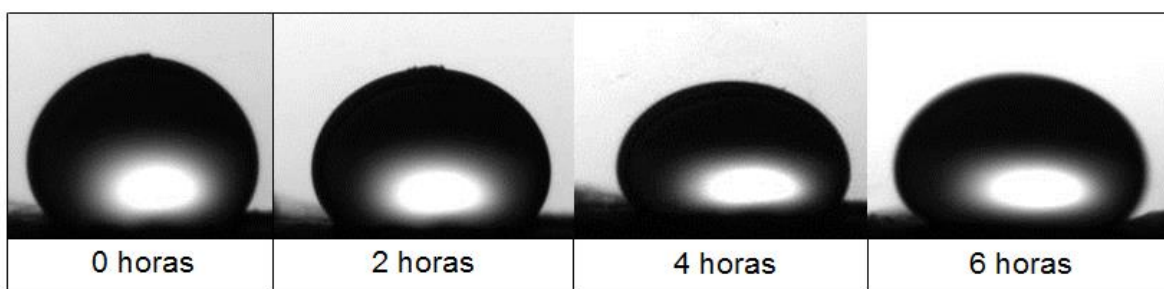


Ilustración 29. Gotas formadas sobre caliza con superficie tratada con tensoactivo.

En la Ilustración 29 se observa la evolución de una de las 3 gotas de los experimentos, en la cual se puede ver una pequeña variación en función del tiempo, esta variación se reporta en las siguientes Tablas 8, 9 y 10 e Ilustración 30, en donde se observó que la gota tarda 5 horas en estabilizarse, ya que la variación que presenta después de ese lapso es casi imperceptible, por lo que los experimentos se midieron durante 5 horas.



Tabla 8. Estabilización de la gota en el 1° experimento.

<b>Experimento 1</b>		
<b>Tiempo (hr)</b>	<b>Ángulo de contacto (°)</b>	<b>Volumen (μl)</b>
0	58,437	2,741
1	63,240	2,742
2	64,100	2,742
3	65,249	2,741
4	65,310	2,742
5	65,272	2,742

Tabla 9. Estabilización de la gota en el 2° experimento.

<b>Experimento 2</b>		
<b>Tiempo (hr)</b>	<b>Ángulo de contacto (°)</b>	<b>Volumen (μl)</b>
0	58,443	2,464
1	62,228	2,559
2	64,925	2,562
3	65,302	2,543
4	65,296	2,592
5	65,262	2,616

Tabla 10. Estabilización de la gota en el 3° experimento.

<b>Experimento 3</b>		
<b>Tiempo (hr)</b>	<b>Ángulo de contacto (°)</b>	<b>Volumen (μl)</b>
0	58,425	2,478
1	62,209	2,505
2	63,165	2,503
3	65,315	2,502
4	65,287	2,515
5	65,279	2,522

En la Ilustración 30 se muestra el cambio en el valor del ángulo de contacto de los diferentes experimentos, siendo su media aproximadamente de  $65,271^\circ$ , con una pequeña desviación estándar de  $0,009$  y una varianza de  $7,3 \times 10^{-5}$ .

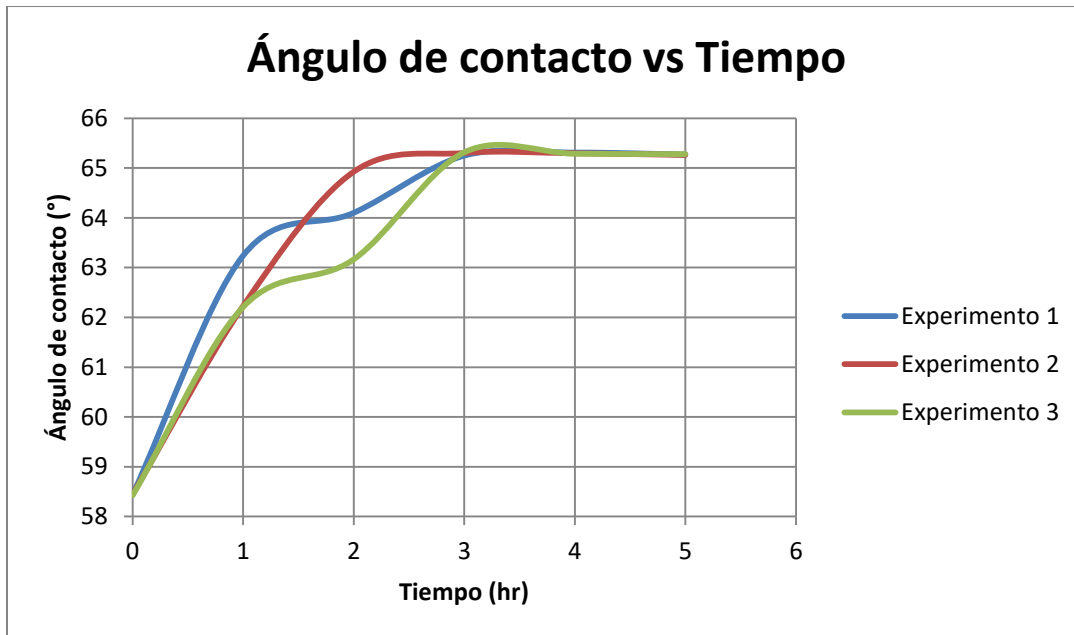


Ilustración 30. Tiempo vs ángulo de contacto con superficie tratada.

## Conclusiones

Se cuenta con un equipo experimental y la metodología; para condiciones de alta temperatura y alta presión, que permite medir el ángulo de contacto del sistema agua-caliza-aceite, útil para evaluar el efecto de tensoactivos que modifican la mojabilidad de la roca. El sistema desarrollado permite obtener mediciones reproducibles. La medición del ángulo de contacto durante la evaluación de los tensoactivos depende del número ácido del aceite, el tipo de roca, la salinidad del medio, la presión y la temperatura.

Los puntos clave del proceso son:

- La caracterización de la roca, es de relevancia, ya que las propiedades superficiales pueden provocar fenómenos que alteren la mojabilidad de la superficie mineral.
- El acondicionamiento de la roca, se debe a que puede presentar sustancias que alteren la afinidad inicial de la roca, es importante limpiarla de toda impureza para determinar la función del tensoactivo.
- El añejamiento con laurato de sodio, permite simular el efecto el cambio de mojabilidad de la caliza que tendría la presencia de iones carboxilatos. Este proceso se lleva a cabo durante 24 horas, con el propósito de asegurar la adsorción de esta sustancia.
- La restauración de la mojabilidad con tensoactivo, mediante la desorción del laurato de sodio, se lleva a cabo añejando la superficie mineral con la disolución de tensoactivo seleccionado para tal fin, también por 24 horas.
- El volumen de la gota es importante, dado que puede generar cambios en la medición del ángulo de contacto. Una gota de mayor tamaño se ve afectada por la gravedad, mientras que las pequeñas se estabiliza más rápido, por lo que el contorno de su circunferencia se define mejor.

El resultado de las mediciones del ángulo de contacto de la superficie limpia de caliza, muestran un ángulo mayor a  $90^\circ$ , lo cual indica que la roca presenta una mojabilidad inicial preferente al agua. Mientras que el resultado que se obtuvo con las rocas añejadas con el ácido carboxílico, indican que éstas se adsorben, produciendo un cambio de mojabilidad preferente al aceite. Otro de los aspectos que se observaron fue la restauración de la mojabilidad inicial de la superficie de la caliza con ayuda de una disolución de tensoactivo (una mezcla de tensoactivo catiónico-anfotérico), donde la remediación se produce cuando el tensoactivo catiónico presenta un efecto de par iónico con los carboxilatos adsorbidos en la roca, esta interacción vence las fuerzas iónicas que mantienen a los iones carboxilatos en la superficie de la roca cargada positivamente, lo cual provoca la desorción de los ácidos carboxílicos recuperando la superficie mojabla por el agua, lo que disminuye las fuerzas capilares y facilita la extracción del crudo remanente en yacimientos carbonatados.

Las recomendaciones que se hacen para futuros estudios de este tema, es evaluar el impacto que tiene el aumento de la temperatura en la mitigación de los efectos de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto. El equipo y la metodología desarrollada se pueden utilizar para:

- La evaluación de otras superficies y crudos, útil en el desarrollo de procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos.
- Definir con precisión la hipótesis de formación del par iónico, responsable de la restauración de mojabilidad de la roca.

## Bibliografía

- <sup>1</sup>Lucio Carrillo Barandiarán, “Presión capilar-mojabilidad y saturación”, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería de Petróleo, 8 de mayo del 2000, Pág. 8
- <sup>2</sup>Alejandra López, Yani Carolina Araujo, “Determinación de coeficientes de esparcido en superficies de sílice con mojabilidad controlada”, Maracaibo, Venezuela, Ciencia 13(4), 2005, Pág. 498-504
- <sup>3</sup>Coordinación General de Minería, “Perfil de mercado de la caliza”, Diciembre del 2014, Dirección General de Desarrollo Minero, Pág. 1
- <sup>4</sup>Gustavo Neira Arenas, Luz Adriana Cañas, “Procedimiento para medir ángulos de contacto en sólidos particulados finos”, Scientia et Technica Año XIII, N° 36, septiembre de 2007, Pág. 836
- <sup>5</sup>Fabricio Javier Castañeda Chiliza, Marcos Joaquin Cadena Balon, “Programa computacional para predecir el comportamiento de un yacimiento sometido a inyección de agua por el método de Craig, Geffen and Morse”, Guayaquil-Ecuador, 2012, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Pág. 29
- <sup>6</sup>Álvaro Rodríguez García, “Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales”, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, octubre 2010, Pág. 7-15
- <sup>7</sup>Lucio Carrillo Barandiarán, “Optimización de la recuperación”, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería de Petróleo, 8 de mayo del 2000, Pág. 1
- <sup>8</sup>I. Aranberri, B.P. Binks, “Elaboración y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensoactivos”, Revista Iberoamericana de Polímeros, Volumen 7(3), agosto de 2006, Pág. 6
- <sup>9</sup>Ricardo C. Pasquali, Carlos Bregni, “Geometría de micelas y otros agregados de sustancias anfifílicas”, acta farmacéutica bonaerense, Buenos Aires, Argentina, vol. 24 n°1 - año 2005, Pág. 19-30

- <sup>10</sup>Wael Abdallah, Jill S. Buckley, “Los fundamentos de la mojabilidad”, Oilfield Review, Otoño de 2007, Pág. 48-51
- <sup>11</sup>Meléndez Hildamaro, Rodón Jairo, “Efectos del tiempo de inmersión de superficies de SiO<sub>2</sub> en silano sobre la determinación de un mojado intermedio mediante la medición de ángulos de contacto”, Avances en Química, 5(1) Pág. 73-78(2010).
- <sup>12</sup>Jean-Louis Salager, “Uso de los surfactantes en la industria petrolera”, Escuela de Ingeniería química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, Ciencia e ingeniería Vo. XVIII. Pág.85 a 102 (1986).
- <sup>13</sup>M. I. LITTER, M. A. Armienta, “Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en agua y suelos”, CYTED, Octubre 2009, Argentina, Pág.155.
- <sup>14</sup>Magdalena Paris de Ferrer, “Inyección de aguas y gas en yacimientos petrolíferos”, 2001, Astro Dala S. A., Maracaibo, Venezuela.
- <sup>15</sup>M.A. Álvarez Valenzuela, J.A. Díaz García, “Análisis de la sensibilidad a las vibraciones del método de medición de tensión superficial mediante gota suspendida”, Agosto 2010, REVISTA MEXICANA DE FÍSICA 56 (4), Pág. 334–338.
- <sup>16</sup>José Alberto Díaz García, “Caracterización de los factores que afectan a la exactitud y a la precisión en el resultado de la medida de tensión superficial con instrumentos basados en el método ADSA”, Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2012, Vol. 16, N.º2, Pág. 29-39.
- <sup>17</sup>L. G. Wade. JR, “Química organica”, Segunda edición,
- <sup>18</sup>Josefina Viades Trejo, “Fisicoquímica de alimentos”, UNIDAD 3. Fenómenos de superficie, 12 de marzo de 2013, Pág.514.
- <sup>19</sup>Alexandra Avilán Ayala, “Implementación de surfactantes como método de tratamiento para aguas subterráneas contaminadas con DNAPLs”, UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA, BOGOTÁ D.C., 2007, Pág.30.
- <sup>20</sup>Mahvash Karimi, Rashid S. Al-Maamari, “Mechanistic study of wettability alteration of oil-wet calcite: The effect of magnesium ions in the presence

- and absence of cationic surfactant”, Elsevier, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 482 (2015), Pág.403–415.
- <sup>21</sup>Agustín Durán-Álvarez, Mauricio Maldonado Domínguez, “Experimental–Theoretical Approach to the Adsorption Mechanisms for Anionic, Cationic, and Zwitterionic Surfactants at the Calcite–Water Interface”, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química/USIP, Ciudad Universitaria, México, Langmuir 2016, vol. 32, Pág2608–2616.
  - <sup>22</sup>P. Somasundaran, S. Krishnakumar, “Adsorption of surfactants and polymers at the solid-liquid interface”, ELS EVIER, Physicochemical and Engineering Aspects 123-124 (1997), Pág.491-513.
  - <sup>23</sup>Jean-Louis Salager, “Recuperación mejorada del petróleo”, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, Lab. Formulación, Interfases, Reología y Procesos, Mérida-Venezuela (2005), Pág. 2-4.
  - <sup>24</sup>J.Falbe. [1987]. “Surfactants in consumer products”, Germany: Springer-Verlag Heidelberg.
  - <sup>25</sup>Erick Gálvez Martínez, “Desarrollo de formulaciones de RSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE QUÍMICA detergentes líquidos para ropa y su evaluación de desempeño”, UNIVE, Ciudad Universitaria, CD. MX. (2016), Pág. 7-13.
  - <sup>26</sup>Rifaat Al-Mjeni, Shyam Arora, Pradeep Cherukupalli, “¿Llegó el momento para la tecnología EOR?”, Oilfield Review, Vol. 22, N° 4, 2011.
  - <sup>27</sup>J. G. Li, J. Am. Ceram. Soc, 75. 1992. 11, p. 3118.
  - <sup>28</sup>Raymond Chang, “Química”, Mc Graw Hill, Décima edición.
  - <sup>29</sup>Winstein, S.; Clippinger, E, “Salt Effects and Ion Pairs in Solvolysis and Related Reactions”, Common Ion Rate Depression and Exchange of Anions during Acetolysis 78 (2). pp. 328-335.
  - <sup>30</sup>Cetoni GmbH”Manual and Reference hardware nemesys high-pressure”, Pág. 17.

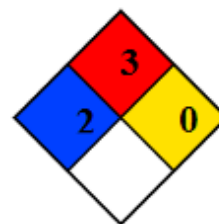
- <sup>31</sup><http://erikapaolar.blogspot.mx/2013/06/la-limpieza-el-jabon-y-los-tensoactivos.html>.
- <sup>32</sup> Menéndez Diego, “Determinación del ángulo de contacto de un líquido sobre un sólido mediante una técnica de digitalización de imagen”, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 5° Jornada de desarrollo e innovación, noviembre de 2004, Pág. 1.
- <sup>33</sup><http://www.firp.ula.ve/site/es/bienvenidos/lineas-de-trabajo/que-es-rmp>.
- <sup>34</sup>Ana Laura Pacheco, “Ángulo de contacto de disoluciones acuosas de tensoactivos etoxilados en superficies de asfalto”, Facultad de Química, UNAM, 2016, Pág. 14-20.



## Anexo I. Hoja de seguridad del Tolueno

FORMULA:  $C_7H_8$ ,  $C_6H_5-CH_3$ .

PESO MOLECULAR: 92.13 g/mol



### GENERALIDADES:

El tolueno es un líquido incoloro con un característico olor aromático. Es menos denso que el agua, inmisible en ella y sus vapores son más densos que el aire.

Es utilizado en combustibles para automóviles y aviones; como disolvente de pinturas, barnices, hules, gomas, etil celulosa, poliestireno, polialcohol vinílico, ceras, aceites y resinas, reemplazando al benceno. También se utiliza como materia prima en la elaboración de una gran variedad de productos como benceno, ácido benzoico, fenol, benzaldehido, explosivos (TNT), colorantes, productos farmacéuticos (por ejemplo, aspirina), adhesivos, detergentes, monómeros para fibras sintéticas, sacarinas, saborizantes y perfumes.

Es producido, principalmente, por reformación catalítica de las fracciones de petróleo ricas en naftenos.

NUMEROS DE IDENTIFICACION

CAS: 108-88-3

UN: 1294

NIOSH: XS 525000

RCRA: U220

NOAA: 4654

STCC: 4909305

RTECS: XS5250000

NFPA: Salud: 2 Reactividad: 0 Fuego: 3

HAZCHEM CODE: 3 YE

El producto está incluido en: CERCLA, 313.

MARCAJE: LIQUIDO INFLAMABLE

SINONIMOS:

En inglés:

METIL-BENCENO	TOLUENE
FENIL-METANO	ANTISAL 1A
Otros idiomas:	CP 25
TOLUEEN (HOLANDES)	METHACIDE
TOLUEN (CHECOSLOVACO)	NCI-C07272
TOLUOLO (ITALIANO)	TOLU-SOL

#### PROPIEDADES FISICAS Y TERMODINAMICAS:

Punto de ebullición: 111°C

Punto de fusión: -95°C

Densidad: 0.87 g/ml (a 20°C), 0.8623 ( a 25°C)

Densidad de vapor: 3.14

Presión de vapor (a 30°C): 37.7 mm de Hg

Indice de refracción (a 20°C): 1.4967

Punto de inflamación en copa cerrada (Flash point ): 4°C

Temperatura de autoignición: 530- 600°C

Límites de explosividad: 1.27- 7 % (en volumen en el aire)

Solubilidad: muy poco soluble en agua (0.05 g/100 ml), miscible con éter, acetona, etanol, cloroformo, ácido acético glacial, disulfuro de carbono y aceites

Temperatura crítica: 318.64°C.

Presión crítica: 40.55 atm

Volumen crítico: 0.317 l/mol

Calor de combustión (a 25°C y presión constante): 934.5 Kcal/mol

Calor de vaporización (a 25°C): 9.08 Kcal/mol.

Capacidad calorífica (cal/g K) : 0.2688 (gas ideal), 0.4709 (líquido a 1 atm)

Tensión superficial (mN/m): 27.92 (a 25°C)

Calor de formación (Kcal/mol) : 11.950 (gas), 2.867 (líquido).

Energía libre de formación (Kcal/K): 22.228 (gas), 27.282 (líquido)

#### PROPIEDADES QUIMICAS:

Productos de descomposición: monóxido y dióxido de carbono.

Se ha informado de reacciones explosivas durante la nitración de este producto químico con ácido nítrico y sulfúrico, cuando las condiciones no son controladas cuidadosamente. Reacciona de la misma manera con una gran cantidad de oxidantes como trifluoruro de bromo (a -80°C), hexafluoruro de uranio, tetróxido de dinitrógeno, perclorato de plata, 1,3-dicloro-5,5-dimetil-2,4-imidazolin-2,4-diona y tetranitrometano.

En general, es incompatible con agentes oxidantes.

#### NIVELES DE TOXICIDAD:

RQ: 1000

IDLH: 2000ppm

LD<sub>50</sub> (en ratones): 5300 ppm.

LD<sub>50</sub> (en piel de conejos): 14000 mg/Kg.

LD<sub>50</sub> (oral en ratas): 7.53 ml/Kg, 5000 mg/ Kg.

LDLo (oral en humanos): 50 mg/Kg.

LC<sub>50</sub> (por inhalación en ratones): 5320 ppm/8 h

Niveles de irritación a ojos: 300 ppm (humanos); 0.87 mg, leve y 2 mg/24 h, severa (conejos).

Niveles de irritación a piel de conejos: 435 mg, leve; 500 mg, moderada

México:

CPT: 375 mg/m<sup>3</sup> (100 ppm)

CCT: 560 mg/m<sup>3</sup> (150 ppm. Se absorbe a través de la piel).

Estados Unidos:

TLV TWA: 375 mg/m<sup>3</sup> (100 ppm)

TLV STEL: 560 mg/m<sup>3</sup> (150 ppm)

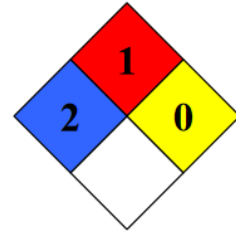
Riesgos a la salud:

La toxicología de este producto es similar a la del benceno, sin embargo el tolueno no genera los trastornos crónicos a la sangre que se han presentado con el uso del primero. Su toxicidad es moderada. Su principal metabolito es el ácido benzoico, el cual se conjuga con la glicina en el hígado y se excreta por medio de la orina como ácido hipúrico. El seguimiento de este último producto, sirve para determinar niveles de exposición de trabajadores. El abuso de este producto provoca daño al hígado, pulmones y disfunción cerebral. El consumo de alcohol, potencializa los efectos narcóticos del tolueno.

## Anexo II. Hoja de seguridad del 1-Metil-2-Pirrolidona

FORMULA: C<sub>5</sub>H<sub>9</sub>NO

PESO MOLECULAR: 99.1 g/mol



### PROPIEDADES FISICAS Y TERMODINAMICAS:

Punto de ebullición: 202°C

Punto de fusión: -24°C

Densidad relativa (agua = 1): 1.027

Solubilidad en agua: muy elevada Presión de vapor, Pa a 25°C: 66

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.42

Punto de inflamación: 91°C

Temperatura de autoignición: 270°C

Presión de vapor: 0,32 hPa (a 20°C)

Viscosidad, dinámica: 1,80 mPa.s (a 20°C)

### PROPIEDADES QUIMICAS:

La sustancia se descompone al calentarla intensamente por encima de 315°C produciendo humos tóxicos. Reacciona con ácidos fuertes. Ataca al aluminio.

Líquido higroscópico, entre incoloro y amarillo claro, de olor característico.

#### NIVELES DE TOXICIDAD:

LD<sub>50</sub> Rata: 4.150 mg/kg

LC<sub>50</sub> Rata: > 5,1 mg/l; 4 h; aerosol

LD<sub>50</sub> Rata: > 5.000 mg/kg, cutánea aguda

Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 0.99%-3.9%

#### Riesgos a la salud:

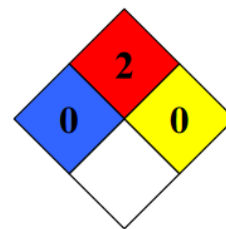
La sustancia irrita el tracto respiratorio. La sustancia puede tener efectos sobre los pulmones, médula ósea y sistema linfático, a muy elevadas concentraciones.

La sustancia se puede absorber por inhalación y a través de la piel. Provoca irritación cutánea e irritación ocular grave.

### Anexo III. Hoja de seguridad del N-Decano

FORMULA:  $C_{10}H_{22}/CH_3(CH_2)_8CH_3$

PESO MOLECULAR: 142.3 g/mol



#### PROPIEDADES FISICAS Y TERMODINAMICAS:

Punto de ebullición: 174.2°C

Punto de fusión: -29.7°C

Densidad relativa (agua = 1): 0.7

Solubilidad en agua: Ninguna

Presión de vapor, kPa a 25°C: 0.17

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 4.9

Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.02

Punto de inflamación: 46°C (c.c.)°C

Temperatura de autoignición: 210°C

Viscosidad cinemática: <7 mm<sup>2</sup>/s (a 40°C)

#### PROPIEDADES QUIMICAS:

Líquido incoloro, de olor característico, puede reaccionar con materiales oxidantes.

#### NIVELES DE TOXICIDAD:

LD<sub>50</sub> Rata: >5000 mg/kg

Riesgos a la salud:

Poco toxico, ingestión de grandes cantidades, puede causar irritación del sistema gastrointestinal. La exposición a los vapores en un período largo de tiempo causa irritación de la garganta y dolor de cabeza. Puede causar náuseas, vómitos, mareos y somnolencia. El contacto con los ojos puede resultar en conjuntivitis, irritación y daños permanentes a la córnea.



## Anexo IV. Hoja de seguridad de la Etilendiamina

FORMULA:  $\text{H}_2\text{N-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2/\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$

PESO MOLECULAR: 60.1



### PROPIEDADES FISICAS Y TERMODINAMICAS:

Punto de ebullición: 117°C

Punto de fusión: 8.5°C

Densidad relativa (agua = 1): 0.9

Solubilidad en agua: miscible

Presión de vapor, kPa (a 20°C): 1.4

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.1

Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.01

Punto de inflamación: 34°C (c.c.)

Temperatura de autoignición: 385°C

Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.5-16.6

Coefficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -1.2

Viscosidad: 0.0154 cP (a 25°C)

pH: 11.9 (25°C, solución al 25%); pH:11.8 (5 g/l agua)

### PROPIEDADES QUIMICAS:

Es un líquido higroscópico de incoloro a amarillo, de olor acre.

La sustancia se descompone al arder, produciendo humos tóxicos (óxidos de nitrógeno). La sustancia es moderadamente básica. Reacciona violentamente con compuestos orgánicos clorados, oxidantes fuertes, ácidos.

#### NIVELES DE TOXICIDAD:

LD50 Rata: 866 mg/kg

LC50 Rata: 14,7 mg/l, 4h; aerosol

LD50 Conejo: 560 mg/kg

#### Riesgos a la salud:

La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosivo por ingestión. El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. El contacto prolongado o repetido puede producir sensibilización de la piel. La exposición a inhalación prolongada o repetida puede originar asma.