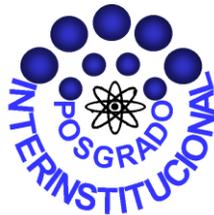




POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN METROLOGÍA

TESIS DE GRADO

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN
METROLOGÍA

“ESTUDIO DE LA TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA, PRESIÓN Y DENSIDAD
COMO VARIABLES DE INFLUENCIA PARA LA MEDICIÓN DE TENSIÓN SUPERFICIAL
DE LÍQUIDOS”

PRESENTA

ING. VÍCTOR ALFONSO SERVÍN MEDINA

DIRECTORES DE TESIS:

DR. LEONARDO AURELIO BALDENEGRO PÉREZ

M.C. LUIS OMAR BECERRA SANTIAGO

QUERÉTARO, QUERÉTARO, ABRIL 2019



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno **Víctor Alfonso Servín Medina**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **“Estudio de la temperatura, humedad relativa, presión y densidad como variables de influencia para la medición de tensión superficial de líquidos”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestro en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Metrología** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 19 días del mes de octubre del año dos mil dieciocho.

Dr. Leonardo Aurelio Baldenegro Pérez
Director de Tesis

M. en C. Luis Omar Becerra Santiago
Co Director de Tesis



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado
PICYT – CIDESI
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado de la alumno **Víctor Alfonso Servín Medina**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Estudio de la temperatura, humedad relativa, presión y densidad como variables de influencia para la medición de tensión superficial de líquidos**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestro en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Metrología** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 02 días del mes de abril del año dos mil diecinueve.

Dr. Luis del Llano Vizcaya

Presidente

MC Agustín Pérez Maldonado

Secretario

Dr. Leonardo Aurelio Baldenegro Pérez

Vocal

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres quienes me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por el esfuerzo, sacrificio y confianza que han depositado en mí, gracias a ello he logrado alcanzar metas que sin su apoyo no hubiesen sido posibles, agradezco infinitamente la formación profesional brindada.

A mis hermanas y hermano que siempre han estado junto a mí apoyando incondicionalmente y compartiendo los buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis asesores Dr. Leonardo Aurelio Baldenegro Pérez y M.C Luis Omar Becerra Santiago por el apoyo y enseñanza brindada, así como por su paciencia y dedicación para el desarrollo del presente trabajo, agradezco también al Ingeniero Arturo Augusto Daued Mendoza por su valiosa participación en el proyecto desde el inicio hasta la conclusión del mismo.

Agradezco también al Centro Nacional de Metrología principalmente a la Dirección de Masa y Densidad por brindarme la oportunidad de ser participe en el desarrollo de un proyecto tan interesante, así como a cada una de las personas que con su apoyo y conocimiento se tomaron el tiempo de colaborar en el proyecto.

Agradezco, al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial por darme la oportunidad de formarme profesionalmente dentro de sus instalaciones, así como a cada uno de los profesores que me brindaron su apoyo, asesorías y conocimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
CAPÍTULO I	3
MARCO DE REFERENCIA	3
1.1 Descripción del área.....	3
1.1.1 Patrón nacional de masa	3
1.1.2 Patrón nacional de densidad	4
1.1.3 Laboratorio de instrumentos para medición de densidad.....	5
1.2 Planteamiento del problema	7
1.3 Objetivos	7
1.4 Meta	8
1.5 Justificación	8
1.6 Hipótesis.....	9
1.7 Antecedentes.....	9
1.8 Estado del arte	16
1.8.1 Efecto de la temperatura en la tensión superficial de líquidos.....	22
1.8.2 Efecto de la tensión superficial en mezcla	25
1.8.3 Efecto de la presión en tensión superficial de líquidos	26
1.8.4 Efecto de la humedad relativa en la medición de tensión superficial de líquidos.....	28
CAPÍTULO II	32
MARCO TEÓRICO	32
2.1 Principios y conceptos básicos.....	32
2.2 Clasificación de los fluidos	33
2.3 Tensión superficial.....	34
2.4 Efecto de capilaridad.....	35
2.5 Presión en un fluido.....	37
2.5.1 Presión en un punto	38
2.5.2 Variación de la presión con la profundidad	38
2.5.3 Estática de fluidos	39
2.6 Densímetros de inmersión	40
2.6.1 Clasificación de los densímetros de inmersión	41
2.6.1.1 Densímetros de inmersión de volumen constante	41

2.6.1.2	Densímetros de inmersión de masa constante.....	43
2.6.2	Clasificación de hidrómetros de masa constante ISO 649/1	46
2.6.3	Requisitos principales para hidrómetros de masa constante de acuerdo a la serie 47	
2.6.4	Calibración de densímetros de inmersión	49
2.6.5	Principio de medición.....	50
2.6.6	Método de Cuckow	52
2.6.7	Sistema de pesada hidrostática	52
2.6.8	Fundamento teórico y modelo matemático	53
2.7	Ecuación para el cálculo de la densidad de aire	54
2.8	Ecuación para la densidad de agua	55
CAPÍTULO III		57
METODOLOGÍA		57
3.1	Etapas de la metodología.....	57
3.2	Descripción de las etapas de la metodología	58
3.2.1	Planteamiento del problema	58
3.2.2	Investigación bibliográfica	59
3.2.3	Acondicionamiento del sistema de medición	59
3.2.4	Caracterización del sistema de medición	67
3.2.5	Medición de los diferentes líquidos en diferentes niveles de los factores en el estudio.....	83
3.2.6	Análisis e interpretación de resultados	85
CAPÍTULO IV		102
EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS		102
4.1	Resultados de la medición tensión superficial de Agua tipo 1 en los diferentes niveles de los diferentes factores.	102
4.1.1	Resultados experimentales de tensión superficial del agua quitando el primer valor obtenido.	105
4.1.2	Resultados experimentales de tensión superficial del agua quitando los dos primeros valores obtenidos.....	110
4.1.3	Análisis de Varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de tensión superficial de Agua (mN/m)	112
4.2	Resultados de la medición tensión superficial de Pentadecano en los diferentes niveles de los diferentes factores.	120
4.2.1	Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano quitando el primer valor obtenido.	123

4.2.2 Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano quitando los dos primeros valores obtenidos.....	126
4.2.3 Análisis de Varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano (mN/m)	129
4.3 Resultados de la medición tensión superficial de etilenglicol en los diferentes niveles de los diferentes factores.	135
4.3.1 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol quitando el primer valor obtenido.	138
4.3.2 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol quitando los dos primeros valores obtenidos.....	141
4.3.3 Análisis de Varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol (mN/m)	144
4.4 Trazabilidad de las mediciones	150
4.5 Buenas prácticas de medición.....	152
Conclusiones Generales.....	153
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
ANEXO A.....	157
Certificados de calibración.....	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Prototipos de Platino-iridio, k90 y k96, y el Patrón Nacional de Masa, prototipo k21	4
Figura 1.2 Patrones de densidad, esferas fabricadas en zerodur Z-01 y Z-02	5
Figura 1.3 Laboratorio de densímetros	6
Figura 1.4 Error de apreciación de la lectura del hidrómetro al nivel de la superficie del líquido debido a la presencia del menisco	10
Figura 1.5 Esquema para obtener la relación entre d_1 y d_2 mediante el modelo de cámara pin-hole [2]	13
Figura 1.6 Esquema de los enlaces dentro y en la superficie del cuerpo de un líquido	16
Figura 1.7 Representación esquemática de la interfaz líquido-vapor, que muestra la variación de la densidad ρ conforme se pasa de la fase líquida a fase de vapor [7]	17
Figura 1.8 Representación esquemática de la proporcionalidad de trabajo y superficie de una película de un líquido [6].	18
Figura 1.9 Agnes Pockels y su manera de interpretar la tensión superficial [5].	18
Figura 1.10 Forma del menisco: (a) arriba se observa el plano vertical; (b) abajo se observa el plano horizontal [4].	19
Figura 1.11 Métodos para la determinación de la tensión superficial de líquidos [8]	21
Figura 1.12 Efecto de la temperatura en la tensión superficial en agua con interface de nitrógeno [10].	24
Figura 1.13 Efecto de la presión en la tensión de la interface de agua y etanol por el método capilar	26
Figura 1.14 Efecto de la presión en la tensión superficial de la interface de agua y etileno por el método capilar.	27
Figura 1.15 Esquema de la gota colgante formada de un líquido para determinar su tensión superficial	29
Figura 1.16 Esquema del sistema utilizado para la medición de tensión superficial a diferentes valores de humedad relativa	30
Figura 1.17 Resultados de medición de tensión superficial modificando humedad relativa y temperatura.	31
Figura 2.1 Ascenso por capilaridad del agua y descenso de mercurio en un tubo de vidrio de diámetro pequeño	36
Figura 2.2 Fuerzas que actúan en una columna de líquido que ha ascendido en un tubo debido al efecto de capilaridad	37

Figura 2.3 La presión de un fluido aumenta con la profundidad (como resultado del peso agregado)	39
Figura 2.4 Densímetro de inmersión de volumen constante.....	42
Figura 2.5 Densímetro de inmersión de masa constante [17]	44
Figura 2.6 Menisco formado en la espiga del hidrómetro.....	46
Figura 3.1 Metodología del desarrollo del proyecto.....	57
Figura 3.2 Baño para el control de temperatura.....	60
Figura 3.3 Tensiómetro utilizado.....	61
Figura 3.4 Anillo de platino-Iridio	62
Figura 3.5 Acondicionamiento de la cámara para la comunicación y control de condiciones ambientales.	63
Figura 3.6 Cámara para el control de condiciones ambientales.	64
Figura 3.7 Principales elementos del sistema.	65
Figura 3.8 Elementos para manipular la humedad relativa dentro de la cámara	66
Figura 3.9 Elementos para manipular la presión dentro de la cámara	67
Figura 3.10 Caracterización de la temperatura de la muestra.....	68
Figura 3.11 Estabilidad de la muestra a 25 °C	69
Figura 3.12 Estabilidad de la muestra a 20 °C	70
Figura 3.13 Estabilidad de la muestra a 15 °C	71
Figura 3.14 Materiales de Referencia Certificados en Densidad (MRC) de izquierda a derecha: Etilenglicol - Agua – Pentadecano.....	85
Figura 4.1 Tensión superficial de agua a 61 kPa (para 15 °C, 20 °C y 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)	103
Figura 4.2 Tensión superficial de agua a 81 kPa (para 15 °C, 20 °C y 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)	104
Figura 4.3 Tensión superficial de agua a 101 kPa (para 15 °C, 20 °C y 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.).....	104
Figura 4.4 Ejemplo de indicación de masa para cada una de las indicaciones de tensión superficial en un número de ciclos igual a 15.....	106
Figura 4.5 Tensión superficial de agua a 61 kPa (quitando el primer resultado de la serie)	108
Figura 4.6 Tensión superficial de agua a 81 kPa (quitando el primer resultado de la serie)	108

Figura 4.7 Tensión superficial de agua a 101 kPa (quitando el primer resultado de la serie)	109
Figura 4.8 Tensión superficial de agua a 61 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)	111
Figura 4.9 Tensión superficial de agua a 81 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)	111
Figura 4.10 Tensión superficial de agua a 101 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)	112
Figura 4.11 Tensión superficial de pentadecano 61 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50% H.R. y 70 % H.R.)	121
Figura 4.12 Tensión superficial de pentadecano 81 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30% H.R., 50% H.R. y 70 % H.R.)	122
Figura 4.13 Tensión superficial de pentadecano 101 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30% H.R., 50% H.R. y 70 % H.R.)	122
Figura 4.14 Tensión superficial de pentadecano 61 kPa (sin el primer valor de la serie)	124
Figura 4.15 Tensión superficial de pentadecano 81 kPa (sin el primer valor de la serie)	124
Figura 4.16 Tensión superficial de pentadecano 101 kPa (sin el primer valor de la serie)	125
Figura 4.17 Tensión superficial de pentadecano 61 kPa (sin dos primeros valores de la serie)	127
Figura 4.18 Tensión superficial de pentadecano 81 kPa (sin dos primeros valores de la serie)	127
Figura 4.19 Tensión superficial de pentadecano 101 kPa (sin dos primeros valores de la serie)	128
Figura 4.20 Tensión superficial de etilenglicol a 61 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)	136
Figura 4.21 Tensión superficial de etilenglicol a 81 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)	136
Figura 4.22 Tensión superficial de etilenglicol a 101 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)	137
Figura 4.23 Tensión superficial de etilenglicol a 61 kPa (sin el primer resultado de la serie)	139
Figura 4.24 Tensión superficial de etilenglicol a 81 kPa (sin el primer resultado de la serie)	139
Figura 4.25 Tensión superficial de etilenglicol a 101 kPa (sin el primer resultado de la serie)	140

Figura 4.26 Tensión superficial de etilenglicol a 61 kPa (sin dos primeros resultados de la serie).....	142
Figura 4.27 Tensión superficial de etilenglicol a 81 kPa (sin dos primeros resultados de la serie).....	142
Figura 4.28 Tensión superficial de etilenglicol a 101 kPa (sin dos primeros resultados de la serie).....	143
Figura 4.29 Trazabilidad de las mediciones de tensión superficial.....	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Efecto de la temperatura en la medición de tensión superficial de líquidos [9].	22
Tabla 1.2 Efecto de la temperatura en la tensión superficial en la mezcla de Agua y Etanol	25
Tabla 2.1 Requisitos de densímetro de inmersión de masa constante [17]	48
Tabla 2.2 Errores máximos permitidos para cualquier punto de la escala, ISO 649/1 [17]	49
Tabla 3.1 Estabilidad de temperatura	71
Tabla 3.2 Contribuciones del parámetro Parachor [22]	75
Tabla 3.3 Contribuciones atómicas del parámetro Parachor [22]	76
Tabla 3.4 Matriz de factores en sus diferentes niveles.	84
Tabla 3.5 Tabla de presupuesto de incertidumbre.	93
Tabla 3.6 Indicaciones de masa para Pentadecano.	94
Tabla 3.7 Estimación de incertidumbre de indicación de masa.	95
Tabla 3.8 Estimación de incertidumbre de corrección de densidad por temperatura.	97
Tabla 3.9 Estimación de incertidumbre de densidad por presión.	99
Tabla 3.10 Estimación de incertidumbre de densidad del aire.	100
Tabla 3.11 Indicaciones de masa para Pentadecano.	101
Tabla 4.1 Resultados experimentales de tensión superficial de Agua tipo 1 (mN/m).	102
Tabla 4.2 Resultados experimentales de tensión superficial de Agua sin considerar el primer valor (mN/m).	107
Tabla 4.3 Resultados experimentales de tensión superficial de Agua sin considerar los dos primeros valores de la serie (mN/m).	110
Tabla 4.4 Suma de resultados de agua en 30% H.R.	113
Tabla 4.5 Suma de resultados de agua en 50% H.R.	113
Tabla 4.6 Suma de resultados de agua en 70% H.R.	114
Tabla 4.7 Suma de resultados de agua en interacción temperatura-presión.	115
Tabla 4.8 Suma de resultados de agua en interacción temperatura-humedad.	116
Tabla 4.9 Suma de resultados de agua en interacción humedad-presión.	117
Tabla 4.10 ANOVA de tensión superficial de agua.	119
Tabla 4.11 Resultados experimentales de tensión superficial de Pentadecano (mN/m).	120
Tabla 4.12 Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano sin considerar el primer valor (mN/m).	123

Tabla 4.13 Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano sin considerar los dos primeros valores de la serie (mN/m).	126
Tabla 4.14 Suma de resultados de pentadecano en 30% H.R.	129
Tabla 4.15 Suma de resultados de pentadecano en 50% H.R.	130
Tabla 4.16 Suma de resultados de pentadecano en 70% H.R.	130
Tabla 4.17 Suma de resultados de pentadecano en interacción temperatura-presión.....	131
Tabla 4.18 Suma de resultados de pentadecano en interacción temperatura-humedad. ...	132
Tabla 4.19 Suma de resultados de pentadecano en interacción humedad-presión.....	133
Tabla 4.20 ANOVA de tensión superficial de pentadecano.....	134
Tabla 4.21 Resultados experimentales de tensión superficial de Etilenglicol (mN/m).	135
Tabla 4.22 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol sin considerar el primer valor (mN/m).....	138
Tabla 4.23 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol sin considerar los dos primeros valores de la serie (mN/m).	141
Tabla 4.24 Suma de resultados de etilenglicol en 30% H.R.....	144
Tabla 4.25 Suma de resultados de etilenglicol en 50% H.R.....	145
Tabla 4.26 Suma de resultados de etilenglicol en 70% H.R.....	145
Tabla 4.27 Suma de resultados de etilenglicol en interacción temperatura-presión.	146
Tabla 4.28 Suma de resultados de etilenglicol en interacción temperatura-humedad.....	147
Tabla 4.29 Suma de resultados de etilenglicol en interacción humedad-presión.....	148
Tabla 4.30 ANOVA de tensión superficial de etilenglicol.	149

INTRODUCCIÓN

Los centros de investigación son de gran importancia a nivel nacional e internacional, ya que en estos se desarrollan sistemas que permiten tanto el avance tecnológico como científico, es por ello que siempre se están buscando alternativas y/o soluciones tecnológicas modernas que permitan obtener sistemas de mejor durabilidad, confiabilidad y con el menor porcentaje de error posible.

El Centro Nacional de Metrología es el encargado de establecer y mantener los patrones de referencia nacionales, brinda el servicio de calibración de equipos e instrumentos, certifica y desarrolla materiales de referencia dando trazabilidad a los patrones nacionales en las diferentes magnitudes con las que cuenta, además evalúa la competencia técnica de laboratorios secundarios. Está en contacto directo con otros laboratorios nacionales e internacionales relacionados con la metrología, con el fin de garantizar la calidad de los patrones nacionales.

En el Área de Metrología Mecánica, se tiene bajo custodia los Patrones Nacionales de Masa y de Densidad, a partir de los cuales se establece la trazabilidad metrológica** de las mediciones en estas magnitudes en todo el país con instrumentos, patrones o materiales de referencia calibrados y certificados ya sea directamente en CENAM o a través de laboratorios secundarios acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (ema).

**Trazabilidad metrológica: propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida [27].

CAPÍTULO I

MARCO DE REFERENCIA

1.1 Descripción del área

El CENAM en la Dirección de Masa y Densidad del área de Metrología Mecánica, tiene bajo su custodia los Patrones Nacionales de Masa y Densidad, a partir de los cuales se establece la trazabilidad de las mediciones en estas magnitudes. En la dirección de Masa y Densidad se tiene el Laboratorio de Masa donde se encuentra el Patrón Nacional de Masa, Patrones de Referencia, Pequeñas Masas, Grandes Masas e Instrumentos para Pesar, así como también se tiene el Laboratorio Nacional de Densidad y este cuenta con el Patrón Nacional de Densidad, Densidad de Sólidos y Líquidos e Instrumentos para la Medición de Densidad (Densímetros).

1.1.1 Patrón nacional de masa

La actividad principal del Laboratorio de masa que resguarda el patrón nacional, es mantener la exactitud del kilogramo prototipo k21 y calibrar los patrones de referencia de acero inoxidable a partir del k21 (Patrón Nacional de Masa), ver figura 1.1.

Cabe mencionar que a partir del 20 de mayo de 2019 se implementara una nueva definición del kilogramo, el cual estará ligado a constantes de la naturaleza: la constante de Planck, la velocidad de la luz y la frecuencia de vibración del átomo de Cesio 133.

Además, la definición del kilogramo podrá ser realizada independientemente del prototipo internacional, en cualquier lugar y en cualquier momento.



Figura 1.1 Prototipos de Platino-iridio, k90 y k96, y el Patrón Nacional de Masa, prototipo k21

1.1.2 Patrón nacional de densidad

El patrón Nacional de Densidad es un par de esferas fabricadas en zerdur como se observa en la figura 1.2, cuyos valores de masa y volumen a 20 °C son de 1 kg y una densidad de (2.3 g/cm³). Las esferas están identificadas como Z-01 y Z-02 con una incertidumbre relativa = $2 \times 10^{-4} \%$ (k=1).

Con el sistema de pesada hidrostática que se encuentra en el CENAM se pueden realizar mediciones de densidad trazables al Patrón Nacional de Densidad en líquidos desde 600 kg/m³ hasta 2 000 kg/m³ y en sólidos desde 2 200 kg/m³ hasta 21 000 kg/m³.

El sistema de pesada hidrostática está diseñado para realizar mediciones de cualquier líquido (inocuo para las esferas) y en sólidos cuya masa sumergida no rebase los 900 g debido al alcance de medición de la balanza comparadora de masa.



Figura 1.2 Patrones de densidad, esferas fabricadas en zerodur Z-01 y Z-02

El Patrón Nacional tiene como objetivo ofrecer trazabilidad a las mediciones de densidad de sólidos y líquidos que se realizan en el país.

El par de esferas de zerodur Z-01 y Z-02 son trazables a patrones primarios de densidad pertenecientes al Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania y éstos a su vez a los patrones nacionales de masa y de longitud de Alemania.

1.1.3 Laboratorio de instrumentos para medición de densidad

El presente proyecto está siendo desarrollado en el laboratorio de instrumentos para la medición de densidad, mostrado en la figura 1.3 y se dedica a la calibración de instrumentos que miden densidad de líquidos tales como los densímetros de inmersión y los densímetros digitales de tipo oscilatorio de funcionamiento electrónico (medidores másicos, densímetros a frecuencia, etc.).



Figura 1.3 Laboratorio de densímetros

1.2 Planteamiento del problema

Debido a las necesidades de medición que existen en diferentes ramas de la industria, es adecuado contar con herramientas y metodologías que permitan conocer el comportamiento de las propiedades físicas de determinadas sustancias, como la tensión superficial en líquidos bajo diferentes condiciones experimentales. En particular el efecto que tiene la tensión superficial de los líquidos es la adhesión en las paredes del recipiente que los contiene o en cualquier objeto sumergido en éstos, dependerá esencialmente de las características de cada líquido, y es por esto que, se requiere conocer el comportamiento de los líquidos bajo ciertas características de operación común, como son presión, temperatura, y humedad relativa, debido a que en la actualidad no se tiene una referencia de medición de este parámetro trazable a patrones nacionales y esto impacta en las mediciones con distintos instrumentos utilizados en la industria y laboratorios como en pipetas e hidrómetros o; por otro lado, también impacta en la miscibilidad que tienen los distintos líquidos para crear un nuevo líquido.

1.3 Objetivos

- Objetivo general

Establecer una metodología para la determinación experimental de tensión superficial de líquidos con niveles de incertidumbre apropiados para su aplicación a otras mediciones.

- Objetivos específicos

Realizar un estudio del efecto de la temperatura, presión y humedad relativa en la medición experimental de la tensión superficial, con la finalidad de encontrar sus valores de incertidumbre de medida*** asociados. Este conocimiento tendrá aplicaciones para mejorar las mediciones de densidad de líquidos, de volumen de sólidos y calibración de hidrómetros.

Desarrollar e implementar una metodología y un sistema de medición experimental para caracterizar la tensión superficial de líquidos.

***Incertidumbre de medida se define como: parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando a partir de la información que se utiliza [27].

1.4 Meta

Contar con un sistema de medición confiable para determinar la tensión superficial de algunos líquidos que pueda ser trazable a patrones nacionales.

1.5 Justificación

En la actualidad el Centro Nacional de Metrología no realiza mediciones de Tensión Superficial.

El desarrollo e implementación de un sistema para la medición de la Tensión Superficial de líquidos es importante debido a que es necesario conocer su valor y su incertidumbre asociada. Este conocimiento permite asociar su valor a la medición de densidad. De esta manera se puede dar trazabilidad a esta última, y ofrecer mejores mediciones dentro del CENAM y a las diferentes Industrias para el aseguramiento de la calidad de sus productos y servicios.

Al ser el CENAM el laboratorio de metrología primario del país, una de sus responsabilidades y compromisos es la mejora continua de sus patrones así como el desarrollo de nuevos sistemas de medición.

En la Dirección de Masa y Densidad se realizan mediciones de densidad donde el fenómeno de tensión superficial interviene en estas mediciones, por lo que es necesaria su determinación experimental en líquidos a diferentes condiciones de presión, temperatura y humedad. Esta información es también útil para recomendar el uso de los líquidos estudiados para determinados procesos tecnológicos.

1.6 Hipótesis

Si se tiene un ambiente controlado entonces es posible medir la tensión superficial, estudiando los efectos de la temperatura, presión y humedad relativa para diferentes líquidos. De esta manera se puede obtener mediciones experimentales y conocer su valor de incertidumbre relativa de orden similar.

1.7 Antecedentes

El densímetro de inmersión es un instrumento ampliamente utilizado en la industria para mediciones de densidad de líquidos. Dependiendo de la aplicación, el densímetro podría cambiar su nombre, es decir, alcoholímetros para medir el porcentaje de alcohol en fábricas de cerveza, hidrómetro Brix, para medir el porcentaje de azúcar en soluciones de caña de azúcar, lactómetros, para determinar el contenido de grasa en la densidad de la leche. Al final, sin importar las unidades en que se gradué, el densímetro mide la densidad del líquido [1].

Uno de los aspectos más relevantes a considerar tanto en la calibración como en la medición de la densidad al utilizar densímetros de inmersión, se debe a la formación de un menisco entre la espiga del densímetro y el nivel del líquido (figura 1.4). Este efecto es de naturaleza capilar entre el líquido y el material de la espiga el cual es altamente dependiente de la tensión superficial. Por lo anterior es de suma importancia determinar el valor experimental de la tensión superficial de diversos líquidos con la finalidad de mejorar repetibilidad de las lecturas de densidad al reducir la dispersión de los datos debido al efecto de la tensión superficial de los distintos líquidos al ascender por la espiga a una altura determinada, permitiendo disminuir la incertidumbre en la calibración y medición.

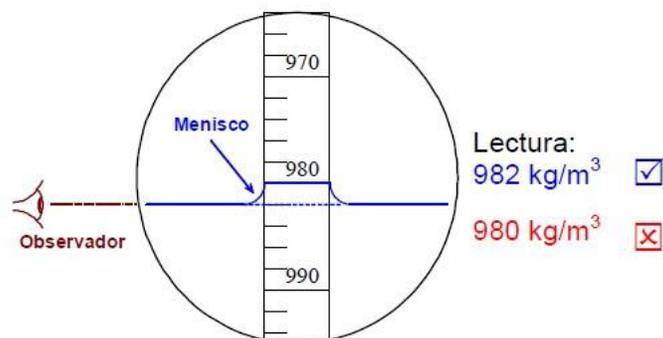


Figura 1.4 Error de apreciación de la lectura del hidrómetro al nivel de la superficie del líquido debido a la presencia del menisco

En el CENAM se ha desarrollado un sistema de calibración de densímetros a fin de reducir la incertidumbre y tener una mayor confiabilidad en sus resultados, este sistema está basado en el método de calibración de Cuckow, y mediante la Ec. 1.1 se determina la densidad en cada punto de medición como sigue:

$$\rho_P = \frac{(\rho_L - \rho_{a_2}) \left(L_1 + \frac{\pi D \gamma}{g} \right)}{L_1 - L_2 \left(1 - \frac{\rho_{a_3} - \rho_{a_2}}{\rho_{wt}} \right) + \frac{\pi D \gamma_L}{g}} [1 + \beta(T_L - T_0)] + \rho_{a_2} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:

- ρ_P densidad correspondiente a la lectura del punto en calibración
- ρ_L densidad del líquido de trabajo utilizado para la calibración
- β coeficiente volumétrico de expansión térmica del vidrio que está hecho el hidrómetro
- T_L temperatura del líquido de referencia durante la pesada hidrostática
- T_0 temperatura de referencia del hidrómetro
- ρ_{a_2} densidad del aire en el momento de hecha la pesada en aire

ρ_{a_3} densidad del aire en el momento de hecha la pesada en agua

ρ_{wt} densidad de las pesas de ajuste de la balanza

γ tensión superficial de referencia del hidrómetro

γ_L tensión superficial del líquido de calibración

g aceleración debida a la gravedad

D diámetro medio de la espiga del hidrómetro

L_1 lectura media de la balanza en la pesada en aire

L_2 lectura media de la balanza en la pesada hidrostática

Haciendo uso de un sistema de visión en el sistema de calibración, es posible obtener imágenes de la marca del nivel del líquido en el densímetro. La cámara está situada a un ángulo θ por debajo del nivel horizontal del líquido por lo que la marca A puede ser vista. La marca de la escala por debajo de la marca de destino A se refleja en la superficie del líquido, por lo que forma una imagen virtual de la marca A , A' . La alineación de A en el nivel de la superficie se logra cuando la distancia en pixeles entre L y A y entre L y A' es la misma en el plano de la imagen. Sin embargo, debido a la posición de la cámara deben hacerse correcciones para estas dos distancias [2] Figura 1.5.

La ecuación se emplea con el fin de obtener la relación K entre las distancias de L a A (d_2) y de L a A' (d_1) un enfoque por medio de una cámara ha sido empleado para determinar dicha relación.

La relación entre d_1 y d_2 es como sigue:

$$\frac{d_2}{d_1} = k$$

Ec. 1.2

El valor de la literal k se obtiene por medio de trigonometría observando la Figura 1.5 se pueden deducir las siguientes expresiones:

$$(d_1 + d_2)^2 = x_1^2 + y_1^2 \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$d_2 = \frac{x_1 * \sin \alpha}{\sin \beta} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Utilizando las Ec. 1.3 y Ec. 1.4 en la Ec. 1.2 obtenemos la siguiente ecuación [4]:

$$k = \frac{1}{\frac{(\sin \beta) * \sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{x_1 * \sin \alpha} - 1} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Así mismo, mediante trigonometría de la Figura 1.5 se obtienen las siguientes expresiones que serán de ayuda en la medición.

$$\beta = 180^\circ - \alpha - \theta \quad \text{Ec. 1.6}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_2}{x_T} \right) \quad \text{Ec. 1.7}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_1}{x_1} \right) \quad \text{Ec. 1.8}$$

$$x_1 = \frac{x_T}{\frac{y_2}{y_1} + 1} \quad \text{Ec. 1.9}$$

Los valores conocidos que se pueden medir son: la distancia horizontal desde el hidrómetro hasta la cámara (x_T), la distancia vertical (y_1) entre dos marcas consecutivas del hidrómetro y la distancia vertical desde la superficie del líquido a la cámara (y_2).

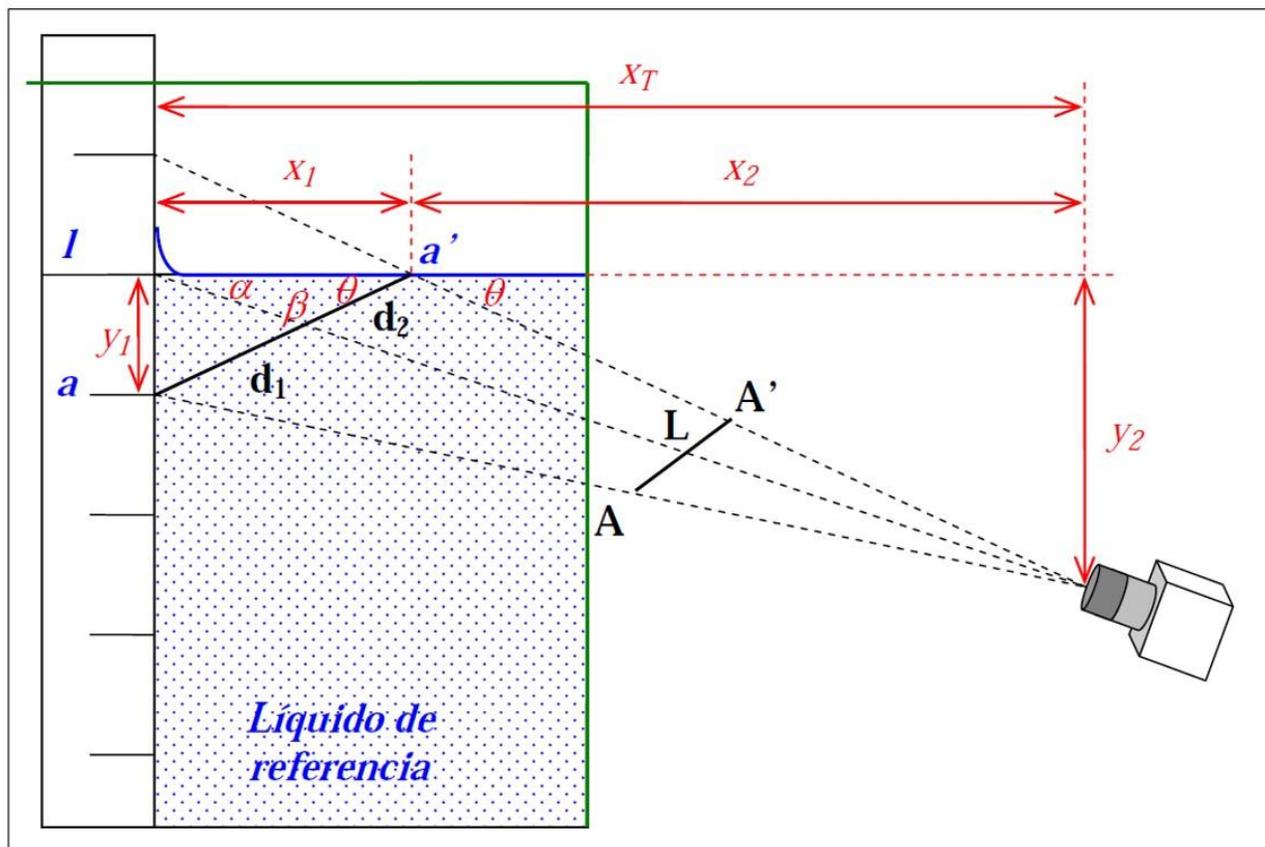


Figura 1.5 Esquema para obtener la relación entre d_1 y d_2 mediante el modelo de cámara pin-hole [2]

En la figura 1.5 se muestran los parámetros utilizados para desarrollar el algoritmo y realizar la alineación de la marca del densímetro de inmersión en el nivel de la superficie del líquido de referencia.

Determinación de densidad de líquidos con patrón de densidad

Bajo el modelo para la determinación de densidad de líquidos como se muestra en la Ec. 1.10, existe el parámetro de tensión superficial que tiene un efecto en dicha medición, por

tal motivo se requiere conocer dicho parámetro para reducir la incertidumbre con la que se determina la densidad de los diferentes líquidos bajo este principio.

$$\rho_{L(T,P)} = \left\{ \left[\frac{m_{ds} - m_{ms} + \rho_{air} V_{ms} [1 + \alpha_{ms}(t_{air} - t_{ref})] - \Delta m S b^{-1} - Gc - Mc}{V_{ds} * [1 + \alpha_{ds}(t_{liq} - t_{ref})] * [1 - \beta_{ds}(p_{liq} - p_{ref})]} \right] + \alpha_{liq}(t_{liq} - t_{ref}) \right\} * [1 - \beta_{liq}(p_{liq} - p_{ref})]$$

Ec. 1.10

Donde:

ρ_L	Densidad del líquido a la temperatura y presión de medición.
m_{ds}	Masa del patrón de densidad
V_{ds}	Volumen del patrón de densidad a 20 °C y 101 325 Pa
α_{ds}	Coefficiente de expansión térmica del zerodur
β_{ds}	Coefficiente de compresibilidad isotérmica del patrón de densidad
β_{ms}	Coefficiente de compresibilidad isotérmica del patrón de masa
m_{ms}	Masa del patrón de masa (masas de acero inoxidable)
V_{ms}	Volumen del patrón de masa a 20°C
α_{ms}	Coefficiente de expansión térmica del acero inoxidable
α_{liq}	Coefficiente de expansión térmica del líquido bajo prueba
β_{liq}	Coefficiente de compresibilidad isotérmica del líquido bajo prueba
ρ_{air}	Densidad del aire
t_{air}	Temperatura del aire
t_{liq}	Temperatura del líquido

t_{ref}	Temperatura de referencia, 20 °C
p	Presión atmosférica
p_{liq}	Presión en el líquido
p_{ref}	Presión de referencia, 101 325 Pa
Δm	Diferencia de masa entre la esfera patrón y masas patrón
Sb^{-1}	Inverso de la sensibilidad de la balanza
Gc	Corrección de gravedad debida a la diferencia de alturas entre masa patrón y del patrón de densidad
Mc	Corrección del menisco debido a la elongación del cable de acero inoxidable cuando la esfera se coloca en la suspensión

Ésta última está conformada de la siguiente manera:

$$M_c = \frac{\pi \gamma_{liq}}{g} [d_0 - d] \quad \text{Ec. 1.11}$$

γ_{liq}	Tensión Superficial del líquido muestra
d	Diámetro del Alambre con masa suspendida
d_0	Diámetro del Alambre sin masa suspendida [3]
g	aceleración debida a la gravedad
π	Constante "pi" (3.141592)

1.8 Estado del arte

La tensión superficial se define como la tendencia que tiene un líquido a disminuir su superficie hasta que su energía de superficie potencial es mínima, por lo tanto, es una fuerza tangencial neta en la frontera del líquido, dirigida hacia su interior, que se opone a que las moléculas del líquido se escapen de su interior [4].

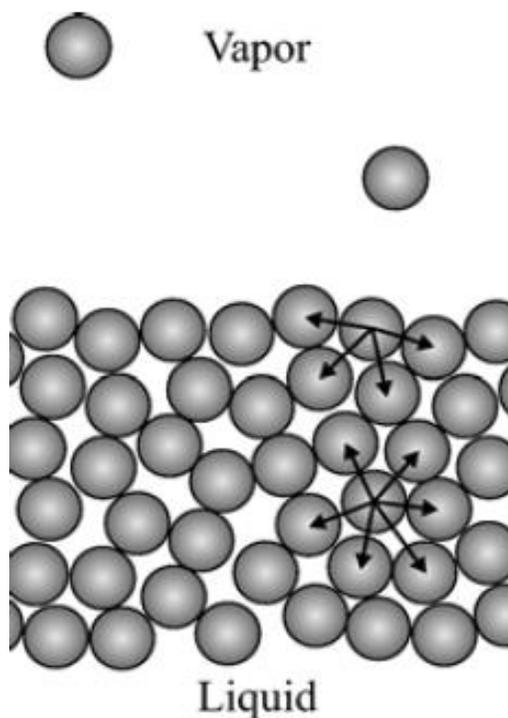


Figura 1.6 Esquema de los enlaces dentro y en la superficie del cuerpo de un líquido

Se atribuye a Pockels [5] el desarrollo del concepto de tensión superficial ya que fue pionera en el estudio de la física de las películas superficiales. Trabajó en el estudio de los efectos de los contaminantes de la tensión superficial y la tensión interfacial entre agua y líquidos no miscibles con ésta. Mencionó que la importancia de medir la tensión superficial se debe a que es un buen indicador de los cambios de composición de una muestra líquida, si esta se contamina o cambia su composición de modo no deseado, se producirán cambios en su tensión superficial.

Para moléculas es energéticamente favorable rodearse de otras moléculas. Las moléculas se atraen entre sí por diferentes interacciones como fuerzas de Van der Waals o enlaces de hidrógeno [6].

En la superficie, las moléculas están sólo parcialmente rodeadas por otras moléculas, el número de moléculas adyacentes es menor. Esto es energéticamente desfavorable [6].

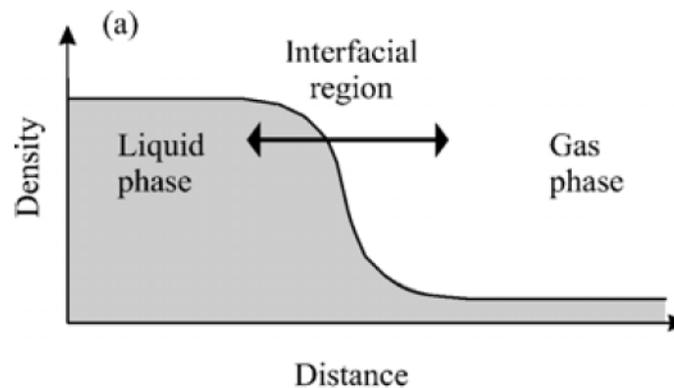


Figura 1.7 Representación esquemática de la interfaz líquido-vapor, que muestra la variación de la densidad ρ conforme se pasa de la fase líquida a fase de vapor [7].

Termodinámicamente la tensión superficial es un “fenómeno de superficie” y se relaciona con la tendencia de un líquido a disminuir dicha superficie hasta que su energía de superficie potencial es mínima (condición necesaria para que el equilibrio sea estable)

Una película de líquido se extiende sobre un marco, que tiene una corredera móvil. La película es relativamente gruesa, aproximadamente $1\mu\text{m}$, de modo que la distancia entre las superficies traseras y delanteras es suficientemente grande para evitar la superposición de las dos regiones interfaciales. Si aumentamos la superficie moviendo el deslizador una distancia dx a la derecha, esto provoca un trabajo. Este trabajo dW es proporcional al aumento de la superficie dA . El área de superficie aumenta en dos veces $b \cdot dx$ porque la película tiene un lado frontal y posterior. La introducción de la constante γ de proporcionalidad obtenemos. [6]

$$dW = \gamma * dA$$

Ec. 1.12

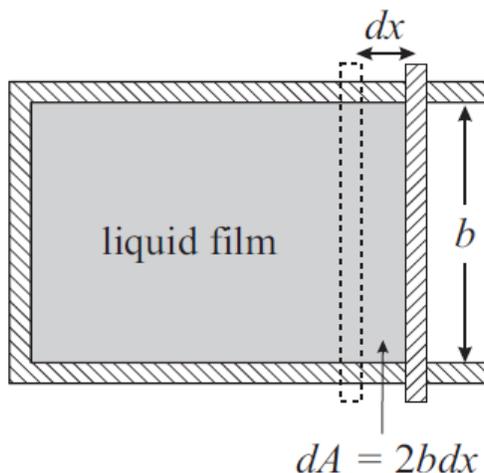


Figura 1.8 Representación esquemática de la proporcionalidad de trabajo y superficie de una película de un líquido [6].

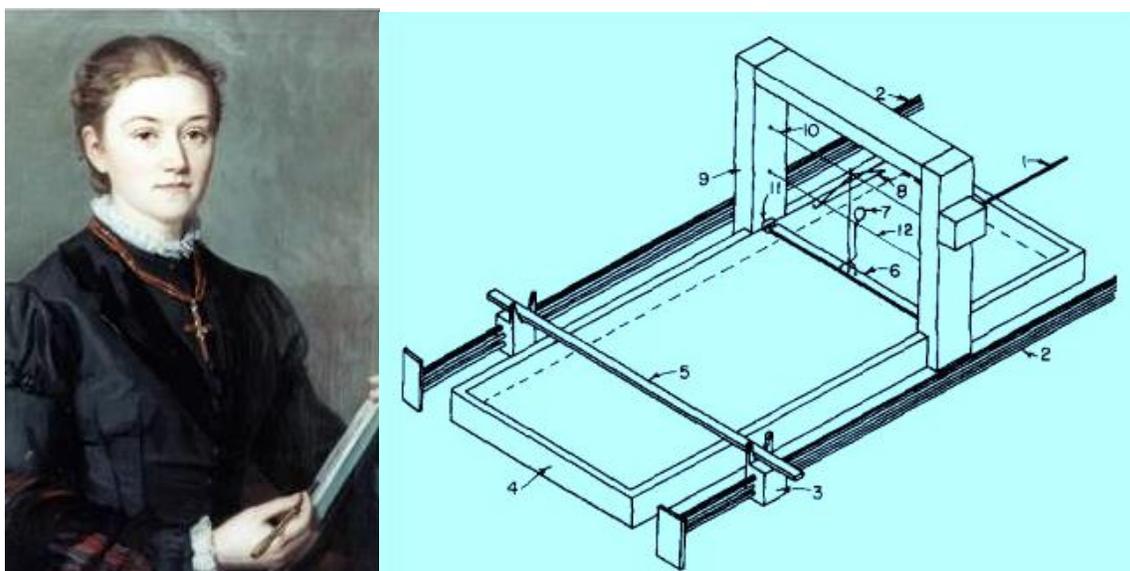


Figura 1.9 Agnes Pockels y su manera de interpretar la tensión superficial [5].

Un menisco que se forma en la espiga de un hidrómetro da forma similar a una trompeta como se observa en la figura 1.10 (a), sin embargo al tomar una imagen con una cámara se observa en dos dimensiones una elipse, como en la figura 1.10 (b).

La importancia de la medición de la tensión superficial en diferentes líquidos, consiste en que, al conocer el comportamiento del menisco para cada líquido. Se obtiene información que mejora la calibración de los hidrómetros.

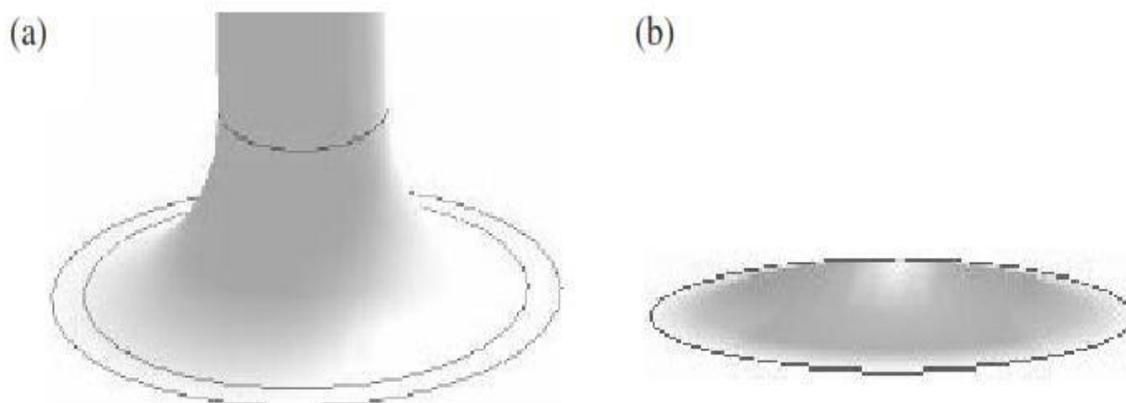


Figura 1.10 Forma del menisco: (a) arriba se observa el plano vertical; (b) abajo se observa el plano horizontal [4].

Hasta el momento se han desarrollado diferentes métodos para la determinación de diferentes líquidos, como se muestra en la Figura 1.11:

Existen diferencias de entre los métodos ya que en algunos de ellos se requiere de sistemas de visión para determinar los tamaños y formas de las gotas que se forman por la tensión superficial.

Por ejemplo, en el método de la gota colgante (Figura 1.11a), se deja formar una gota hasta su desprendimiento, donde su forma y tamaño permiten determinar la tensión superficial.

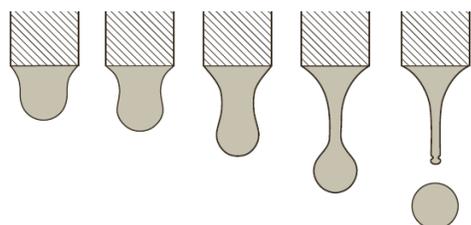
Otro método es la formación de una burbuja de gas dentro de un líquido donde la densidad es conocida, a una determinada profundidad y presión (Figura 1.11b). En el momento en que la burbuja se rompa se analiza su tamaño y forma para determinar la tensión superficial.

Por otro lado, existen métodos que utilizan otros principios de funcionamiento en la medición de tensión superficial de líquidos. Uno de ellos determina la fuerza necesaria para desprender una pieza de dimensión y formas conocidas, sobre la superficie del líquido,

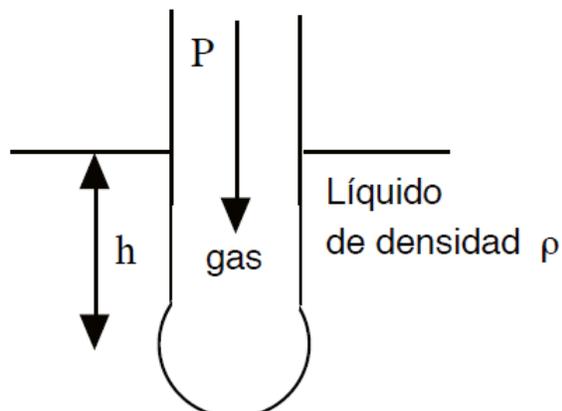
donde la fuerza medida está relacionada con la tensión superficial. Existen dos sistemas que utilizan este principio, Uno es el del método del anillo (Figura 1.11 c) donde se mide la fuerza para desprender este anillo de la superficie del líquido, donde se conocen las dimensiones del anillo, el diámetro del anillo, el diámetro del alambre que forma el anillo, la densidad del líquido y la densidad del ambiente circundante sobre el líquido. El otro método es el de la placa (Figura 1.11d) que funciona de manera similar al medir la fuerza para desprender del líquido una placa, donde sus dimensiones como ancho y espesor así como otros parámetros son utilizados para la determinación de la tensión superficial.

Existen otros dos métodos que utilizan el efecto de la tensión superficial sobre una superficie. En la Figura 1.11e se muestra cómo mediante el ascenso capilar de un líquido se obtienen parámetros que permiten evaluar la tensión superficial. Así mismo también existen sistemas sofisticados que utilizan visión y procesamiento de imágenes (Figura 1.11f) donde a través de la forma y tamaño de una gota estática se puede encontrar el valor de tensión para un líquido bajo prueba.

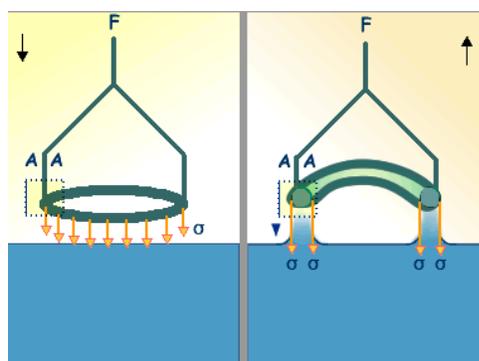
Los diferentes métodos presentan ventajas y desventajas. Por ejemplo en algunos casos se requiere una determinada cantidad de muestra, en otros se tiene un mejor control y manipulación de la muestra, o se debe cuidar el comportamiento de líquido muestra en contacto con otra sustancia.



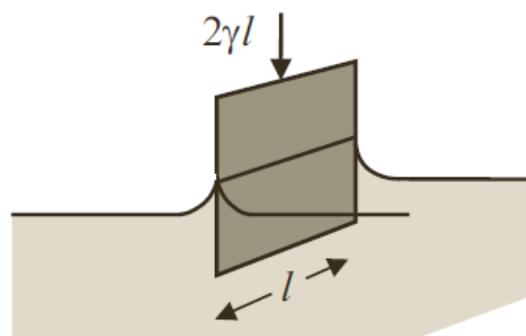
a).- Gota colgante



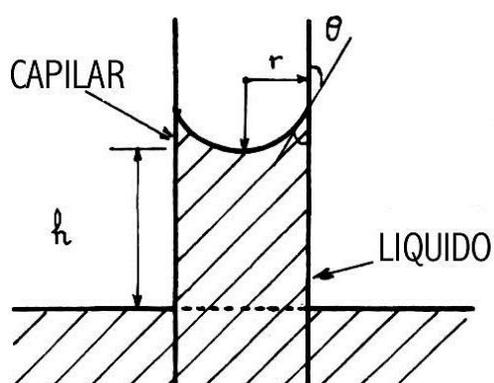
b).- Formación de gota dentro de un líquido



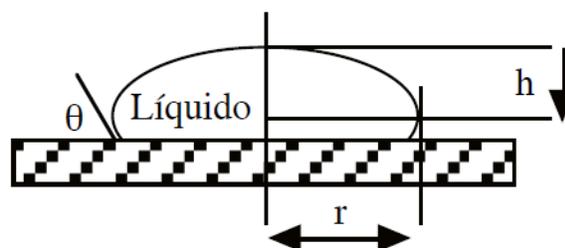
c).- Anillo



d).- Placa



e).- Asenso capilar



f).- Forma de gota en una superficie

Figura 1.11 Métodos para la determinación de la tensión superficial de líquidos [8].

1.8.1 Efecto de la temperatura en la tensión superficial de líquidos

La temperatura juega un papel de vital importancia en el comportamiento de la tensión superficial, por lo que se requiere conocer el valor de este factor al momento de hacer la determinación de tensión de cualquier líquido. Para conocer este comportamiento se han hecho diferentes estudios donde se observa cómo es que este factor impacta directamente a este fenómeno. En la Tabla 1.1 se muestran los resultados de un estudio que realizó la IAPWS para conocer el comportamiento de la tensión superficial del agua a diferentes temperaturas en intervalos de 5 °C.

Tabla 1.1 Efecto de la temperatura en la medición de tensión superficial de líquidos [9].

t °C	$\sigma \cdot 10^{-3} \text{N/m}$	$\Delta\sigma \cdot 10^{-3} \text{N/m}$	$\delta\sigma \cdot 10^{-3} \text{N/m}$	t °C	$\sigma \cdot 10^{-3} \text{N/m}$	$\Delta\sigma \cdot 10^{-3} \text{N/m}$	$\delta\sigma \cdot 10^{-3} \text{N/m}$
0.01	75.64	0.38	0.01	190	39.95	0.22	0.00
5	74.95	0.37	0.00	195	38.82	0.22	0.00
10	74.23	0.37	-0.01	200	37.69	0.22	-0.01
15	73.50	0.37	-0.01	205	36.55	0.22	-0.01
20	72.75	0.36	-0.01	210	35.41	0.22	-0.02
25	71.99	0.36	-0.01	215	34.25	0.22	-0.01
30	71.20	0.36	0.00	220	33.10	0.22	-0.02
35	70.41	0.35	0.00	225	31.93	0.22	-0.02
40	69.60	0.35	0.00	230	30.77	0.22	-0.02
45	68.78	0.34	0.00	235	29.60	0.22	-0.02
50	67.94	0.34	0.01	240	28.42	0.22	-0.02
55	67.10	0.34	0.00	245	27.24	0.22	-0.01
60	66.24	0.33	0.00	250	26.06	0.22	-0.01
65	65.36	0.33	0.01	255	24.87	0.21	0.01
70	64.47	0.32	0.02	260	23.67	0.21	0.03
75	63.58	0.32	0.01	265	22.48	0.21	0.04
80	62.67	0.31	0.01	270	21.30	0.20	0.05
85	61.75	0.31	0.01	275	20.11	0.20	0.06
90	60.82	0.30	0.00	280	18.94	0.20	0.06
95	59.87	0.30	0.01	285	17.77	0.19	0.07
100	58.91	0.29	0.01	290	16.61	0.19	0.07
105	57.94	0.29	0.01	295	15.45	0.19	0.07
110	56.96	0.28	0.01	300	14.30	0.18	0.07
115	55.97	0.28	0.01	305	13.17	0.18	0.06
120	54.96	0.27	0.01	310	12.04	0.17	0.06
125	53.95	0.27	0.01	315	10.92	0.16	0.06
130	52.93	0.26	0.01	320	9.81	0.16	0.07
135	51.89	0.26	0.02	325	8.73	0.15	0.06
140	50.85	0.25	0.01	330	7.66	0.14	0.05
145	49.80	0.25	0.01	335	6.61	0.13	0.05
150	48.74	0.24	0.01	340	5.59	0.12	0.05
155	47.67	0.24	0.01	345	4.60	0.11	0.04
160	46.58	0.23	0.02	350	3.65	0.10	0.03
165	45.49	0.23	0.02	355	2.75	0.10	0.00
170	44.40	0.22	0.01	360	1.90	0.10	-0.10
175	43.30	0.22	0.01	365	1.13	0.10	-0.04
180	42.19	0.22	0.01	370	0.45	0.10	-0.06
185	41.07	0.22	0.01	374.00	0.00		0.00

De la Tabla anterior se deduce la Ec. 1.14 que establece el comportamiento de la tensión superficial del agua en función de la temperatura:

$$\sigma = B \left[\frac{T_c - T}{T_c} \right]^\mu \left[1 + b \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right) \right] \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde:

T_c Temperatura crítica (647.15 K)

T Temperatura de medida

B Constante = 235.8×10^{-3} N/m

b Constante = - 0.625

μ Constante = 1.256

La Ec. 1.15 establece la diferencia que existe entre el valor calculado de tensión superficial del agua y los resultados que presenta este trabajo.

$$\delta\sigma = \sigma_c - \sigma \quad \text{Ec. 1.15}$$

Donde:

$\delta\sigma$ Diferencia encontrada entre dos valores de tensión superficial

σ_c Tensión superficial calculada

σ Tensión superficial experimental

Los resultados reportados en la Tabla 1.1 muestran el efecto que tiene la temperatura en la tensión superficial del agua en incrementos de 5 °C en un intervalo desde 0.01 °C hasta 374 °C, a medida que se incrementa la temperatura la energía de la muestra crece y como respuesta se observa que en la superficie se reduce la tensión entre las moléculas

Las ecuaciones 1.14 y 1.15 representan el comportamiento de la tensión superficial del agua a medida que se modifica la temperatura.

Se han llevado a cabo otros estudios en los que además de la temperatura se utiliza otro ambiente diferente al del aire común. En la Figura 1.12 se muestra un análisis de la temperatura y el nitrógeno en la medición de tensión superficial de agua para diferentes estudios. En específico se realizó con las siguientes características:

Líquido: Agua

Interface: Nitrógeno

Método: Capilar y gota colgante [10]

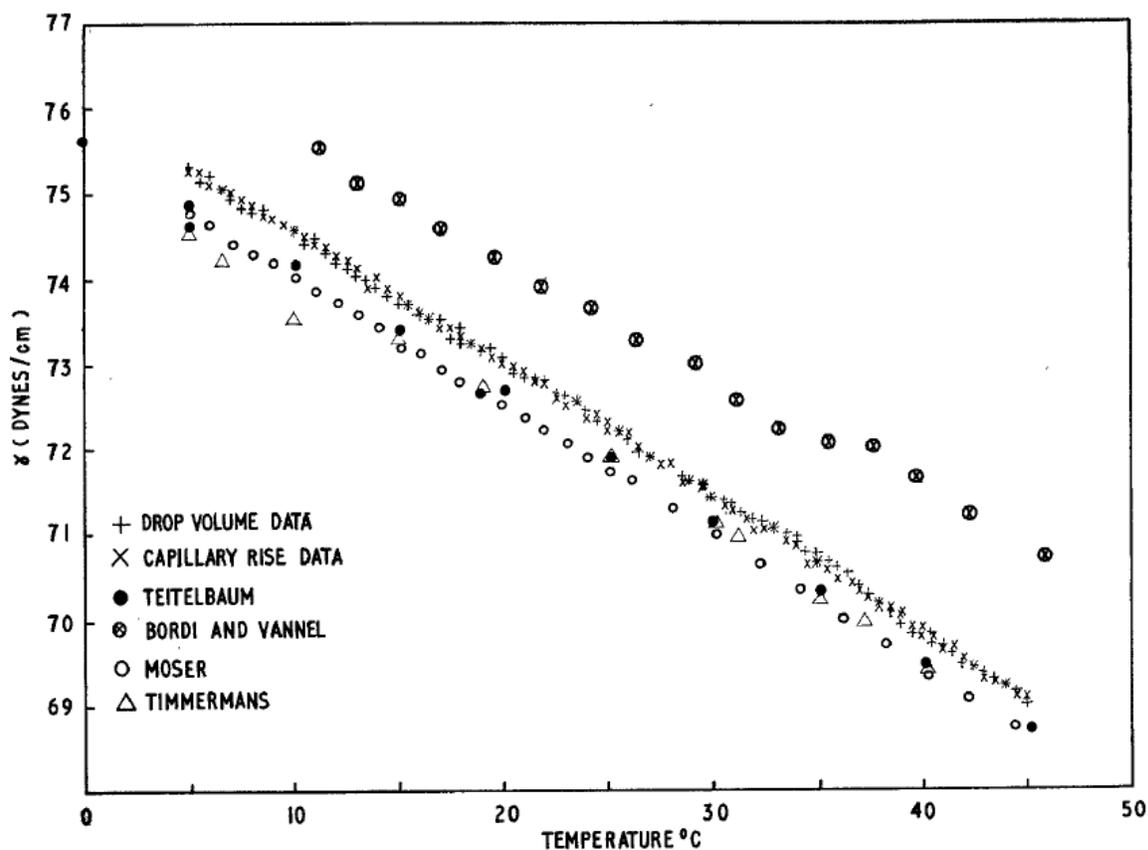


Figura 1.12 Efecto de la temperatura en la tensión superficial en agua con interface de nitrógeno [10].

1.8.2 Efecto de la tensión superficial en mezcla

Existen reportes para la determinación de tensión superficial en mezclas de líquidos donde se realiza un análisis a diferentes proporciones. En la Tabla 1.2 se observa el comportamiento de la tensión superficial de una mezcla de etanol con agua para distintas concentraciones y temperaturas.

La tensión superficial de las mezclas es una propiedad física de gran importancia para los procesos de transferencia de masa tales como destilación, extracción, o absorción [11].

Tabla 1.2 Efecto de la temperatura en la tensión superficial en la mezcla de Agua y Etanol

mass %	x_1	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$ at $t/^\circ\text{C}$						
		20	25	30	35	40	45	50
0	0.000	72.75	72.01	71.21	70.42	69.52	68.84	67.92
5	0.020	56.41	55.73	55.04	54.36	53.63	52.96	52.16
10	0.042	48.14	47.53	46.88	46.24	45.58	44.97	44.26
15	0.065	42.72	42.08	41.49	40.88	40.27	39.64	38.96
20	0.089	38.56	37.97	37.38	36.83	36.28	35.71	35.12
25	0.115	36.09	35.51	34.96	34.41	33.86	33.31	32.76
30	0.144	33.53	32.98	32.43	31.94	31.42	30.89	30.34
40	0.207	30.69	30.16	29.68	29.27	28.77	28.28	27.82
50	0.281	28.51	27.96	27.53	27.11	26.64	26.21	25.78
60	0.370	26.72	26.23	25.81	25.43	24.97	24.54	24.11
70	0.477	25.48	25.01	24.60	24.21	23.76	23.33	22.92
80	0.610	24.32	23.82	23.39	23.01	22.54	22.12	21.71
90	0.779	23.23	22.72	22.32	21.94	21.53	21.13	20.71
100	1.000	22.31	21.82	21.41	21.04	20.62	20.22	19.82

En los resultados que se observan en la Figura 1.13, se muestra el efecto de la temperatura en una mezcla con agua y etanol. Se tiene la tensión superficial de 100% de agua desde 20 °C hasta 50 °C (en incrementos de 5 °C) y la tensión superficial del etanol al 100% en las mismas temperaturas.

1.8.3 Efecto de la presión en tensión superficial de líquidos

Existe otro factor que provoca un efecto en la tensión superficial que va directamente relacionado con la densidad de la muestra a analizar. La muestra es presurizada a diferentes niveles como se muestra en las Figuras 1.13 y 1.14, a diversas temperaturas y ambientes gaseosos [12].

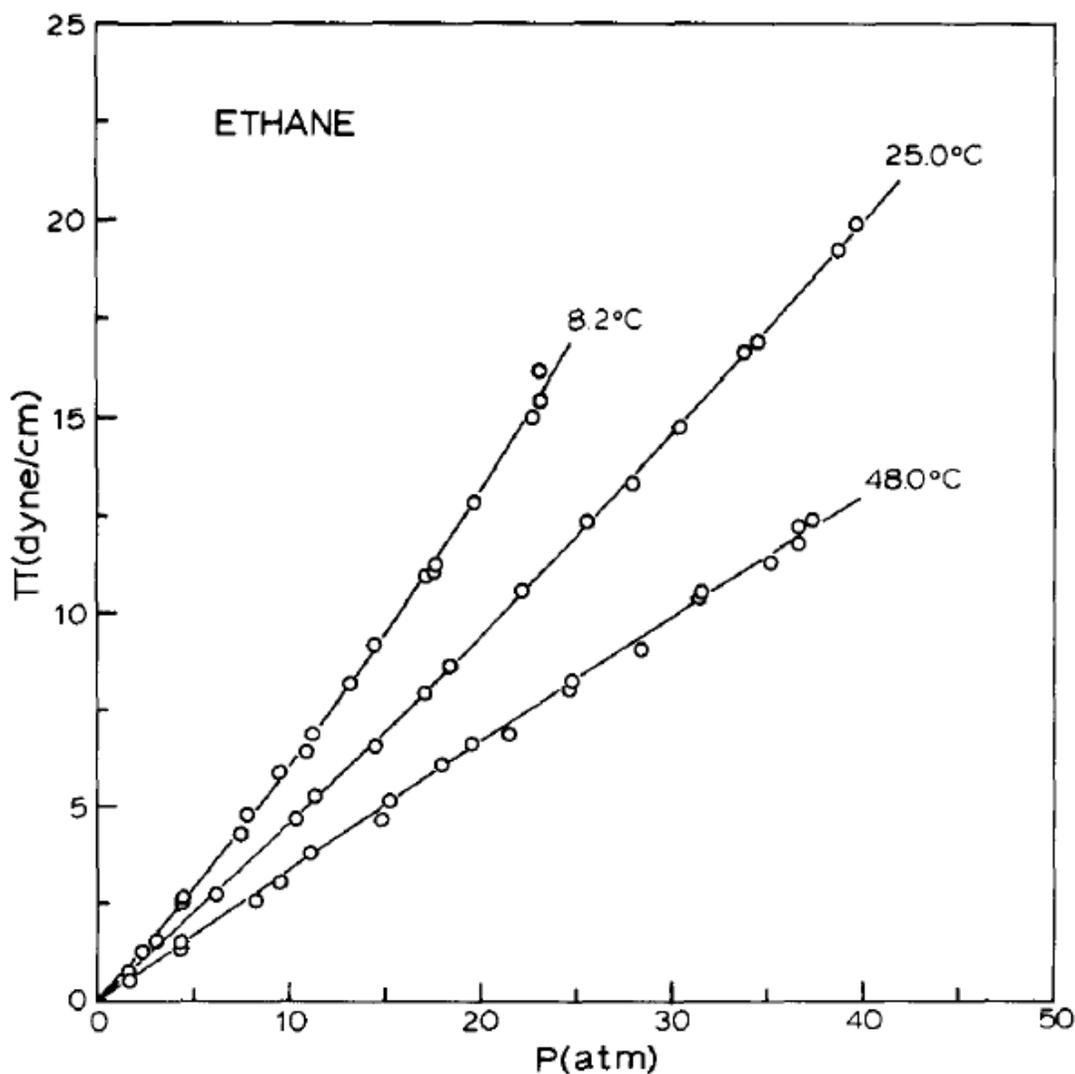


Figura 1.13 Efecto de la presión en la tensión de la interface de agua y etanol por el método capilar

Los resultados obtenidos reflejan cambios en la tensión superficial al modificar la presión al sistema de agua-gases densos [12].

El comportamiento que tiene la tensión superficial del agua al estar en contacto interfacial con gases diferentes al aire es distinto dependiendo de la temperatura de la muestra, la densidad del gas y la modificación de la presión. Se observa en las Figuras 1.13 y 1.14 como se incrementa la tensión superficial a medida que se incrementa la presión, y disminuye al aumentar la temperatura.

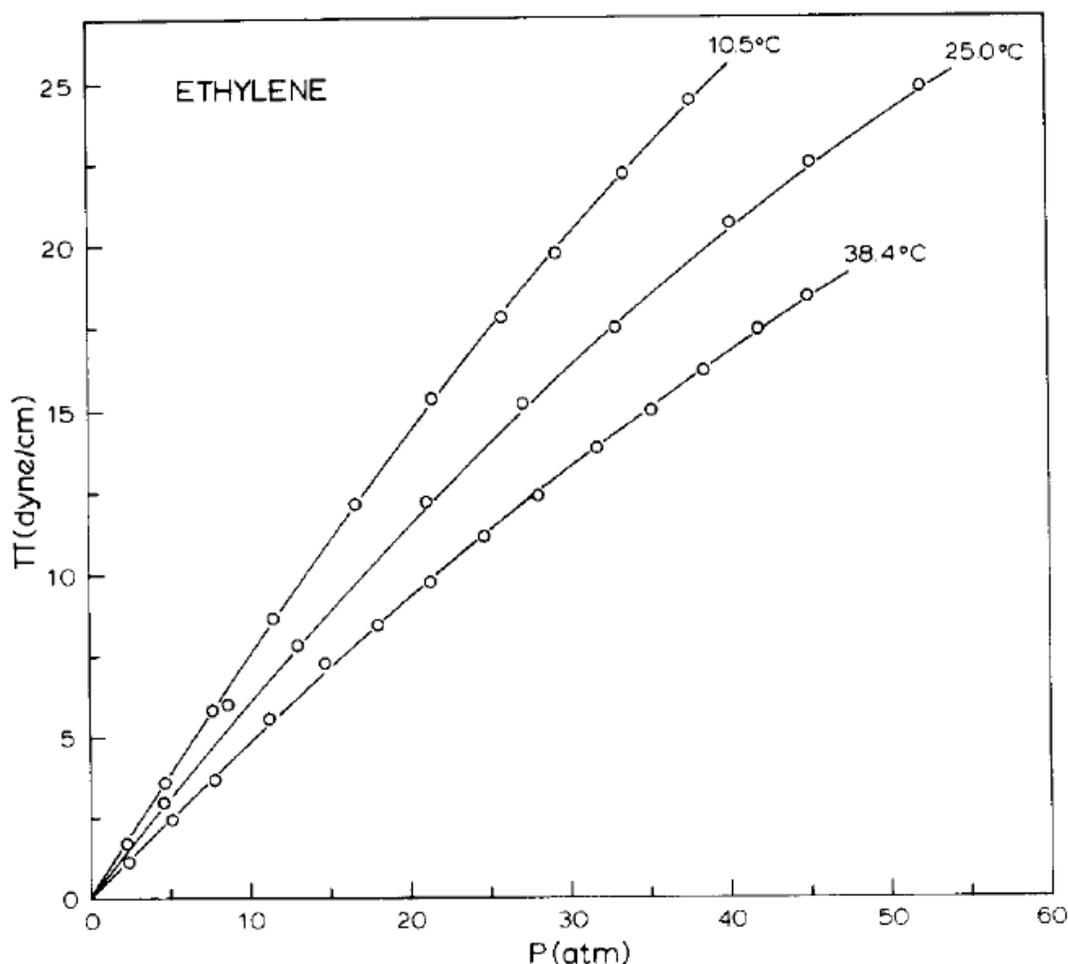


Figura 1.14 Efecto de la presión en la tensión superficial de la interface de agua y etileno por el método capilar.

1.8.4 Efecto de la humedad relativa en la medición de tensión superficial de líquidos

Recientemente se ha reportado un estudio del efecto de la humedad relativa en un solo líquido. Dicho parámetro hasta el momento no se había considerado. En el estudio se utilizó como líquido el agua en interface de aire y el método de la gota colgante como se observa en la figura 1.16 [13].

Se encontró una relación entre la humedad relativa del aire que circunda la gota de la muestra y la tensión superficial de la misma como se describe en la Ec. 1. 13

El equilibrio mecánico en la interface liquido-aire es comúnmente escrito como: [13] [14]

$$2K\gamma = P_i - P_o \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde:

γ Tensión Superficial

P_i Presión interior (dentro del líquido)

P_o Presión exterior (en el aire)

K Curvatura principal de la superficie

Donde esta curvatura principal K está definida por los dos principales radios que forman la gota del líquido como se muestra en la Figura 1.15:

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde:

R_1 Radio de la gota en el plano horizontal

R_2 Radio de la gota en el plano perpendicular al horizontal

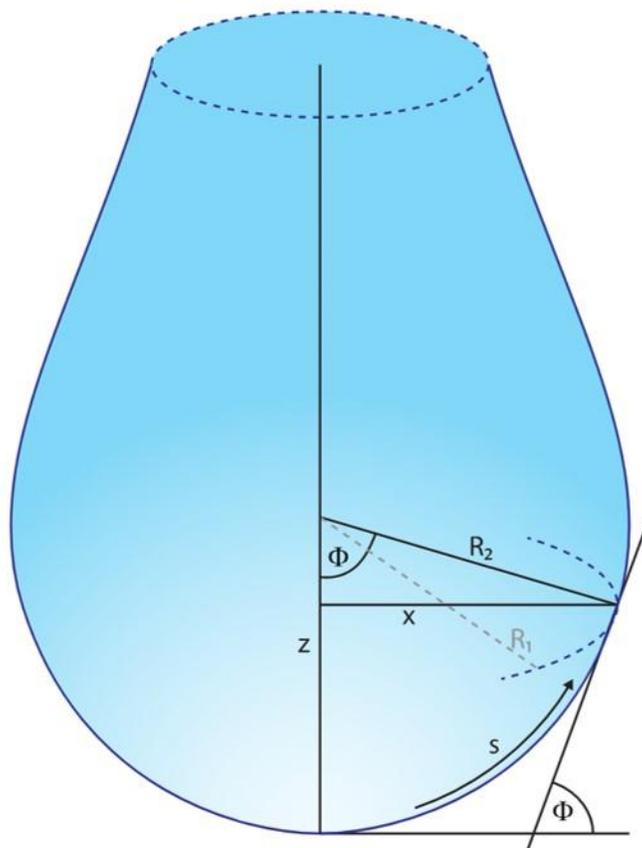


Figura 1.15 Esquema de la gota colgante formada de un líquido para determinar su tensión superficial.

En la figura 1.17 se muestran los resultados obtenidos de tensión superficial en el agua con respecto a la humedad relativa en el aire y la temperatura mediante un sistema mostrado en el esquema de la Figura 1.16. A medida que se incrementa la humedad relativa se reduce la tensión superficial y cuando se incrementa la temperatura se reduce la tensión como se ha visto en los demás estudios.

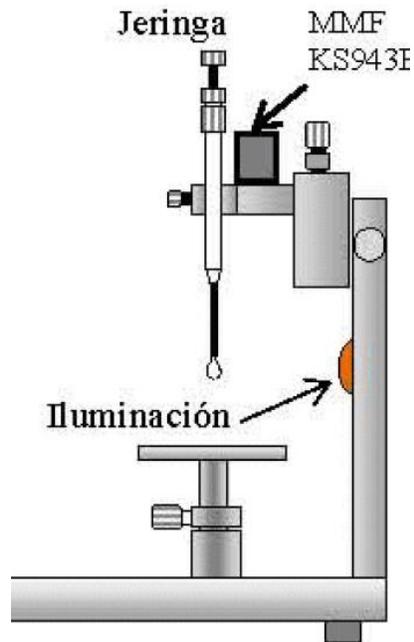


Figura 1.16 Esquema del sistema utilizado para la medición de tensión superficial a diferentes valores de humedad relativa.

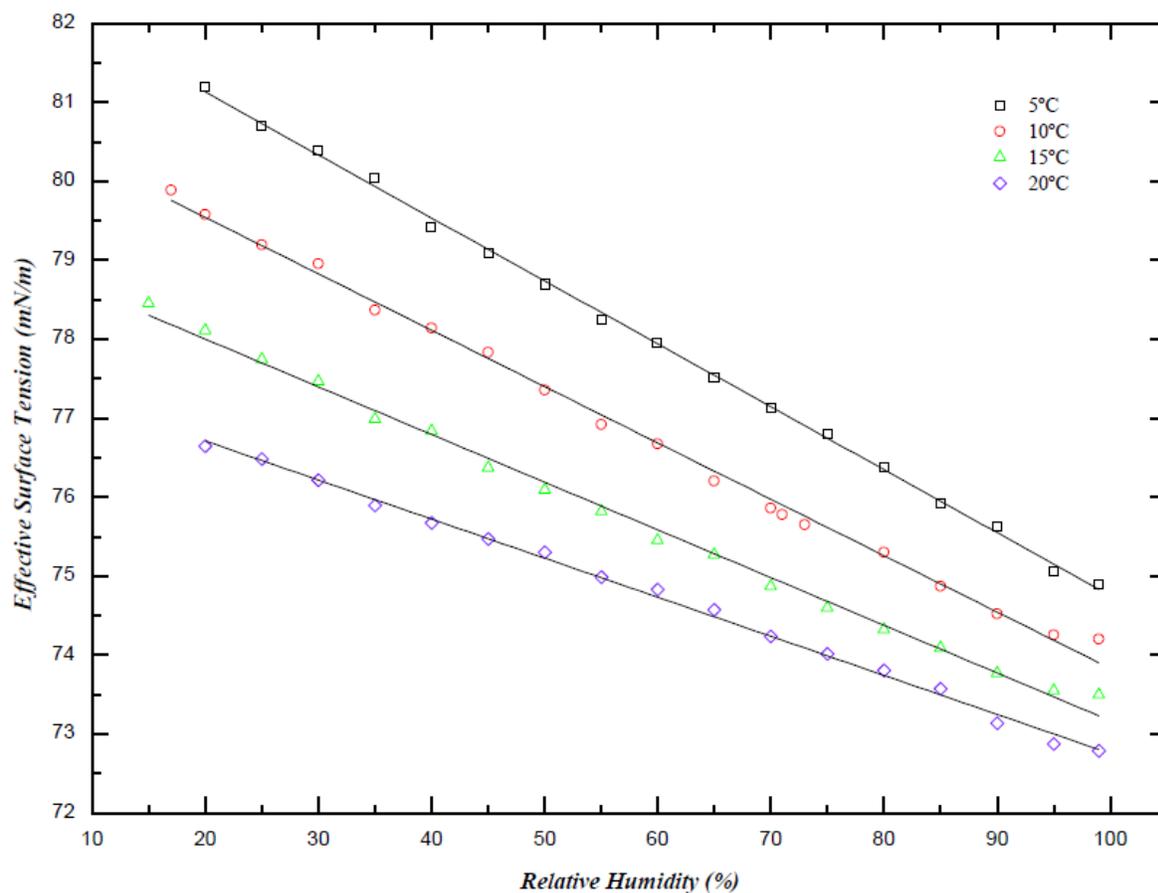


Figura 1.17 Resultados de medición de tensión superficial modificando humedad relativa y temperatura.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Principios y conceptos básicos

La mecánica es la ciencia física que trata los cuerpos en reposo y en movimiento bajo la influencia de fuerzas. La subcategoría mecánica de fluidos se define como la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo (estática de fluidos) o en movimiento (dinámica de fluidos), y la interacción de éstos con sólidos o con otros fluidos en las fronteras [15].

La mecánica de fluidos se divide en varias categorías. El estudio del movimiento de fluidos que son prácticamente incompresibles (como los líquidos, en especial el agua y los gases a bajas velocidades), suele mencionarse como hidrodinámica. La dinámica de gases trata del flujo de fluidos que sufren cambios significativos en la densidad, como el flujo de gases a través de toberas a altas velocidades.

Una sustancia en la fase líquida o en la gaseosa se conoce como fluido. La diferencia entre un sólido y un fluido se hace con base en la capacidad de la sustancia para oponer resistencia a un esfuerzo cortante (o tangencial) aplicado que tiende a cambiar su forma. Un sólido puede oponer resistencia a un esfuerzo cortante aplicado por medio de la deformación, en tanto que un fluido se deforma de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante, sin importar lo pequeño que sea. En los sólidos, el esfuerzo es proporcional a la deformación, pero en los fluidos el esfuerzo es proporcional a la razón de deformación [15].

Cuando se aplica un esfuerzo cortante constante, llega un momento en que un sólido, a un cierto ángulo fijo, deja de deformarse, en tanto que un fluido nunca deja de deformarse y tiende a cierta razón de deformación.

2.2 Clasificación de los fluidos

Regiones viscosas y regiones no viscosas

Cuando dos capas de fluido se mueven una en relación con la otra, se desarrolla una fuerza de fricción entre ellas y la capa más lenta trata de desacelerar a la más rápida. Esta resistencia interna al flujo se cuantifica mediante la propiedad de viscosidad del fluido, la cual es una medida de la adherencia interna de éste. La viscosidad es causada por las fuerzas de cohesión, entre las moléculas, en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. No existe fluido con viscosidad cero y, en consecuencia, en todos los flujos de fluidos intervienen los efectos viscosos en cierto grado. Los flujos en donde los efectos de la fricción son significativos se llaman flujos viscosos. Pero, en muchos flujos de interés práctico, se tienen regiones en donde las fuerzas viscosas son despreciablemente pequeñas en comparación con las fuerzas de inercia o de presión. Despreciar los términos viscosos en esas regiones no-viscosas de flujo simplifica mucho el análisis, sin pérdida considerable en la exactitud [15].

Fluido compresible y fluido incompresible

En mecánica de fluidos se consideran típicamente dos tipos de fluidos los cuales requieren un tratamiento diferente: los fluidos compresibles y los fluidos incompresibles. Que un tipo de fluido pueda ser considerado compresible o incompresible no depende sólo de su naturaleza o estructura interna sino también de las condiciones mecánicas sobre el mismo. Así, a temperaturas y presiones ordinarias, los líquidos pueden ser considerados sin problemas como fluidos incompresibles, aunque bajo condiciones extremas de presión muestran una compresibilidad estrictamente diferente de cero.

La densidad se define como la masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{v} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad \text{Ec. 2.1}$$

Los gases son en general muy compresibles, en cambio, la mayoría de los líquidos tienen una compresibilidad muy baja, es decir los líquidos son en esencia sustancias no compresibles y la variación de la densidad con la presión es por lo regular insignificante. A 20°C, por ejemplo, la densidad del agua cambia de 998 kg/m³ a 1 atm, a 1003 kg/m³ a 100 atm, un cambio de sólo 0.5%. La densidad de líquidos depende más de la temperatura que de la presión. A 1 atm, por ejemplo, la densidad del agua cambia de 998 kg/m³ a 20°C a 275 kg/m³ a 75°C, esto significa un cambio de 2.3% [15].

2.3 Tensión superficial

A menudo se observa que una gota de sangre forma una joroba sobre un vidrio horizontal; una gota de mercurio forma una esfera casi perfecta y se puede hacer rodar del mismo modo que una bola de acero, sobre una superficie lisa; las gotas de agua de la lluvia o del rocío se cuelgan de las ramas o de las hojas de los árboles; un combustible líquido inyectado en un motor forma una niebla de gotas esféricas; el agua que cae de un grifo con fuga cae como gotas esféricas; una pompa de jabón que se lanza al aire toma una forma esférica, y el agua forma pequeñas gotas sobre los pétalos de las flores.

En estas y otras observaciones, las gotas de líquido se comportan como pequeños globos esféricos llenos con ese líquido y su superficie actúa como una membrana elástica estirada sometida a tensión. La fuerza de tracción que causa esta tensión actúa paralela a la superficie y se debe a las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido. La magnitud de esta fuerza por unidad de longitud se llama tensión superficial y se expresa en la unidad N/m. Este efecto también se conoce como energía superficial y se expresa en la unidad equivalente de Nm/m² En este caso, representa el trabajo de estiramiento que se necesita para hacer que aumente el área superficial del líquido en una cantidad unitaria [15].

Las fuerzas de atracción que se aplican sobre la molécula interior por las moléculas que la rodean se equilibran entre sí debido a la simetría. Pero las fuerzas de tracción que actúan sobre una molécula en la superficie no son simétricas y las fuerzas de atracción que se aplican por las moléculas de gas que están arriba suelen ser muy pequeñas. Por lo tanto,

existe una fuerza de atracción neta que actúa sobre la molécula en la superficie del líquido, la cual tiende a jalar de las moléculas que están en la superficie hacia el interior del líquido. Estas fuerzas se equilibran por las fuerzas de repulsión provenientes de las moléculas que están debajo de la superficie y que están siendo comprimidas. El efecto de compresión resultante hace que el líquido minimice su área superficial. Esta es la razón de la tendencia de las gotas de líquido de alcanzar una forma esférica, la cual tiene el área superficial mínima para un volumen dado.

Se habla de tensión superficial para los líquidos solo en las interfaces líquido-líquido o líquido-gas. Por lo tanto, cuando se especifica la tensión superficial, es importante distinguir el líquido o gas adyacente. Asimismo, la tensión superficial determina el tamaño de las gotas del líquido que forma. Una gota que continua creciendo por la adición de más masa se romperá cuando la tensión superficial ya no pueda mantenerla íntegra.

Una interfaz curva indica una diferencia de presión de un lado al otro de ella, y se encuentra la presión más elevada en el lado cóncavo.

2.4 Efecto de capilaridad

El efecto de capilaridad es el ascenso o descenso de un líquido en un tubo de diámetro pequeño insertado en un líquido. Esos tubos angostos o canales de flujo confinado se llaman capilares. La superficie libre curva de un líquido en un tubo capilar se llama menisco.

La intensidad del efecto de capilaridad se cuantifica por el ángulo de contacto (o de mojadura) φ , definido como el ángulo que la tangente a la superficie del líquido forma con la superficie sólida en el punto de contacto. La fuerza de tensión superficial actúa a lo largo de esta recta tangente hacia la superficie sólida.

Por lo tanto, la fuerza de tensión superficial actúa hacia arriba sobre el agua en un tubo de vidrio, a lo largo de la circunferencia, tendiendo a jalar del agua hacia arriba. Como resultado, el agua asciende en el tubo hasta que el peso del líquido en el tubo, por arriba del nivel de éste en el recipiente, equilibra la fuerza de tensión superficial [4].

El fenómeno del efecto de capilaridad se puede explicar en forma microscópica cuando se consideran las fuerzas de cohesión (las fuerzas entre las moléculas semejantes, como agua y agua) y las fuerzas de adhesión (las fuerzas entre las moléculas diferentes (como agua y vidrio). Las moléculas del líquido en la interfaz sólido-líquido están sometidas tanto a fuerzas cohesión por parte de las otras moléculas del líquido, como fuerzas de adhesión por parte de las moléculas del sólido. Las moléculas de agua son atraídas con mayor intensidad hacia las moléculas de vidrio que como lo son hacia las otras moléculas de agua y, en consecuencia, el agua tiende a ascender a lo largo de la superficie del vidrio. Para el mercurio ocurre lo opuesto, lo cual causa que la superficie del líquido se deprima como se observa en la figura 2.1.

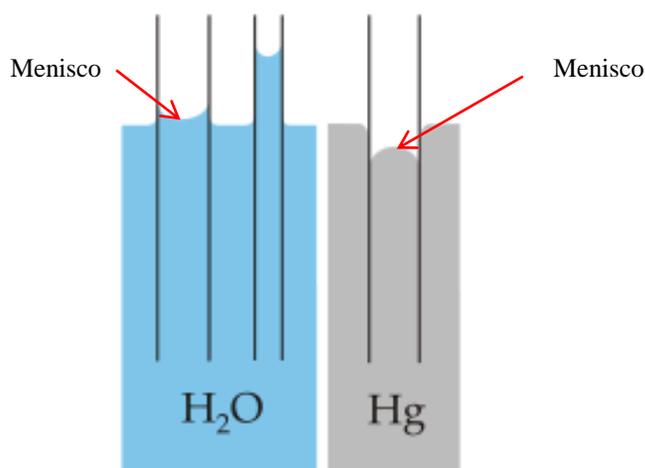


Figura 2.18 Ascenso por capilaridad del agua y descenso de mercurio en un tubo de vidrio de diámetro pequeño

Se puede determinar la magnitud del ascenso por capilaridad en un tubo circular a partir de un equilibrio de fuerzas sobre la columna cilíndrica de líquido de altura h en el tubo, ver figura 2.2. El fondo de la columna de líquido está al mismo nivel de la superficie libre en el recipiente y, por tanto, la presión ahí debe ser la atmosférica. Ésta equilibra la presión atmosférica que actúa sobre la superficie superior, y en consecuencia, estos dos efectos se cancelan entre sí. El peso de la columna de líquido es aproximadamente [15]:

$$W = mg = \rho Vg = \rho g(\pi R^2 h) \quad \text{Ec. 2.10}$$

Cuando se iguala la componente vertical de la fuerza de tensión superficial al peso se obtiene:

$$W = F_{\text{superficial}} \rightarrow \rho g(\pi R^2 h) = 2\pi R\sigma_s \cos \varphi \quad \text{Ec. 2.11}$$

Despejando h se encuentra el ascenso por capilaridad como:

$$h = \frac{2\sigma_s}{\rho g R} \cos \varphi \quad (R = \text{constante}) \quad \text{Ec. 2.12}$$

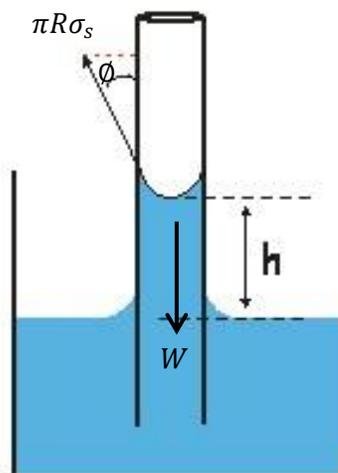


Figura 2.19 Fuerzas que actúan en una columna de líquido que ha ascendido en un tubo debido al efecto de capilaridad

2.5 Presión en un fluido

La presión se define como una fuerza que ejerce un fluido por unidad de área. Se habla de presión sólo cuando se habla de gas o líquido mientras que la contraparte de la presión en los sólidos es el esfuerzo normal. Puesto que la presión se define como una fuerza por unidad de área, tiene la unidad de newtons por metro cuadrado N/m^2 , la cual se llama pascal (Pa).

La presión real que se encuentra en una posición dada se llama presión absoluta, y se mide en relación con el vacío absoluto (es decir, la presión cero absoluta). La mayoría de los instrumentos para medir la presión se calibran para dar una lectura de cero en la atmósfera, de modo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local. Esta diferencia se llama presión manométrica. Las presiones por debajo de la atmosférica se conocen como presiones de vacío. Las presiones absoluta, manométrica y de vacío son todas cantidades positivas y están interrelacionadas por:

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs} \quad \text{Ec. 2.14}$$

2.5.1 Presión en un punto

La presión en cualquier punto en un fluido es la misma en todas direcciones; es decir, tiene magnitud pero no una dirección específica y, en consecuencia, es una cantidad escalar.

2.5.2 Variación de la presión con la profundidad

La presión de un fluido se incrementa con la profundidad debido a que una mayor cantidad de éste descansa sobre las capas más profundas y el efecto de este “peso extra” en una capa inferior se equilibra mediante un aumento de presión tal y como se observa en la figura 2.3.

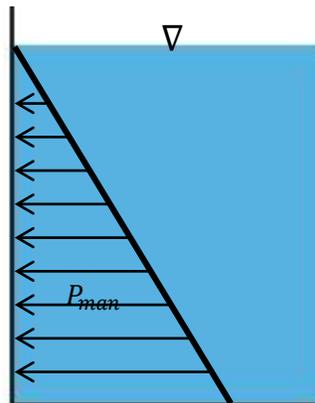


Figura 2.20 La presión de un fluido aumenta con la profundidad (como resultado del peso agregado)

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g \Delta Z = \gamma \Delta Z \quad \text{Ec. 2.15}$$

$$P = P_{atm} + \rho g h \text{ o } P_{man} = \rho g h \quad \text{Ec. 2.16}$$

La presión en un fluido en reposo es independiente de la forma o sección transversal del recipiente que lo contiene. Ésta cambia con la distancia vertical, pero permanece constante en las otras direcciones. Por lo tanto, la presión es la misma en todos los puntos de un plano horizontal en un fluido dado.

Una consecuencia de que la presión en un fluido permanezca constante en la dirección horizontal, consiste en que la presión aplicada a un fluido confinado aumente la presión en toda la extensión de éste en la misma cantidad. Esto se conoce como ley de Pascal, en honor a Blaise Pascal.

2.5.3 Estática de fluidos

La estática de fluidos trata de los problemas relacionados con los fluidos en reposo. En general, la estática de fluidos se llama hidrostática cuando el fluido es un líquido y aerostática, cuando el fluido es un gas. En la estática de fluidos no se tiene movimiento relativo entre capas adyacentes del fluido y, por lo tanto, no se tienen esfuerzos cortantes

(tangenciales) en éste que traten de deformarlo. El único esfuerzo que se trata en la estática de fluidos es el esfuerzo normal, el cual es la presión, y la variación de ésta sólo se debe al peso del fluido.

2.6 Densímetros de inmersión

En la industria, la exigencia de elaborar productos con la mayor calidad posible requiere de una medición de la densidad de muestras líquidas con la menor incertidumbre posible en la medición.

Los instrumentos de mayor aplicación en la industria para este fin son los densímetros de inmersión también conocidos como hidrómetros.

Los densímetros de inmersión son instrumentos empleados para determinar la densidad de líquidos. Se caracterizan por ser instrumentos muy simples, de bajo costo y altamente efectivos para la medición de la densidad de líquidos, razón por la cual son ampliamente utilizados en la Industria [16].

Existen normas que regulan la fabricación y uso de los densímetros, entre las cuales están:

ISO 649/1 Laboratory glassware –Density hydrometers for general purposes. Part I: Specification.

ISO 649/2 Laboratory glassware –Density hydrometers for general purposes. Part II: Test methods and use.

ISO 3675 Crude petroleum and liquid petroleum products –Laboratory determination of density or relative density-Hydrometer method.

D 1298 Standard practice for density, relative Density (Specified Gravity, or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method.

2.6.1 Clasificación de los densímetros de inmersión

Los densímetros de inmersión, o también comúnmente llamados “hidrómetros” se clasifican en dos:

- Densímetros de inmersión de volumen constante.
- Densímetros de inmersión de masa constante.

2.6.1.1 Densímetros de inmersión de volumen constante

Esta clase de hidrómetros están diseñados para flotar hasta una marca específica en líquidos de diferente densidad añadiendo masa sobre él, de esta forma el volumen inmerso en el líquido del hidrómetro se mantiene constante mientras que se varía la masa con el fin de mantenerlo sumergido en líquidos de diferente densidad.

El densímetro más conocido en esta clase es el hidrómetro de Nicholson, ver figura 2.4 [17]. Consta de un platillo P sujeto a un extremo de una varilla de diámetro uniforme llamada “espiga” del hidrómetro”. El otro extremo de la espiga está acoplado al llamado “cuerpo” B del hidrómetro. Este cuerpo B consiste de un cilindro hueco montado entre dos conos. El cono inferior tiene otro platillo, el cual es la base de otro cono más pesado. Este cono puede ser cargado con mercurio o con pequeños balines de plomo para mantenerlo flotando verticalmente en los líquidos. Generalmente, este tipo de hidrómetro se fabrica con una delgada hoja metálica anticorrosiva. Todas las partes del densímetro están hechas simétricas al eje vertical X-X. La espiga tiene graduada una fina marca G alrededor. El hidrómetro está diseñado para que flote exactamente hasta esa marca.

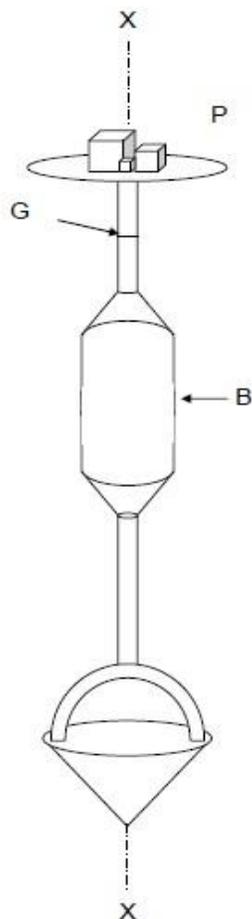


Figura 2.21 Densímetro de inmersión de volumen constante

Cada densímetro sigue las leyes de flotación basadas en el principio de Arquímedes, esto es que, en estado de equilibrio, la fuerza de empuje dirigida hacia arriba ejercida por la masa de líquido desplazado es igual, opuesta y en la misma línea de acción a la fuerza gravitacional debida al peso del hidrómetro.

Para que este instrumento funcione adecuadamente se debe considerar lo siguiente:

- El diámetro de la espiga debe ser pequeño.
- La marca de graduación G debe ser delgada.

- La superficie del cuerpo y de la espiga del hidrómetro debe ser lo suficientemente lisa para que al mojarlos con el líquido donde serán utilizados no se adhieran burbujas de aire.
- El hidrómetro debe flotar siempre verticalmente, de tal suerte que las pesas que se añadan al platillo deben colocarse al centro.

El uso de los densímetros de inmersión de volumen constante es bastante limitado, debido a esto no es común encontrarlos en la Industria.

2.6.1.2 Densímetros de inmersión de masa constante

Los densímetros de masa constante están diseñados para que floten en diferentes posiciones en líquidos de diferente valor de densidad. En otras palabras, el volumen del hidrómetro es el que varía al sumergirse en líquidos de diferente densidad mientras que el valor de masa permanece constante. Este tipo de hidrómetros son ampliamente utilizados en la Industria, en la investigación científica y para fines educativos y pedagógicos.

El densímetro de masa constante mide la densidad de líquidos y se fabrica de una sola pieza y está conformado esencialmente de dos partes: (1) El cuerpo A algunas veces con un bulbo (B) y (2) la espiga S, ver figura 2.5. La densidad del líquido es medida directamente por la profundidad de inmersión de los líquidos en el tallo hasta el punto alineado con la superficie horizontal del líquido.

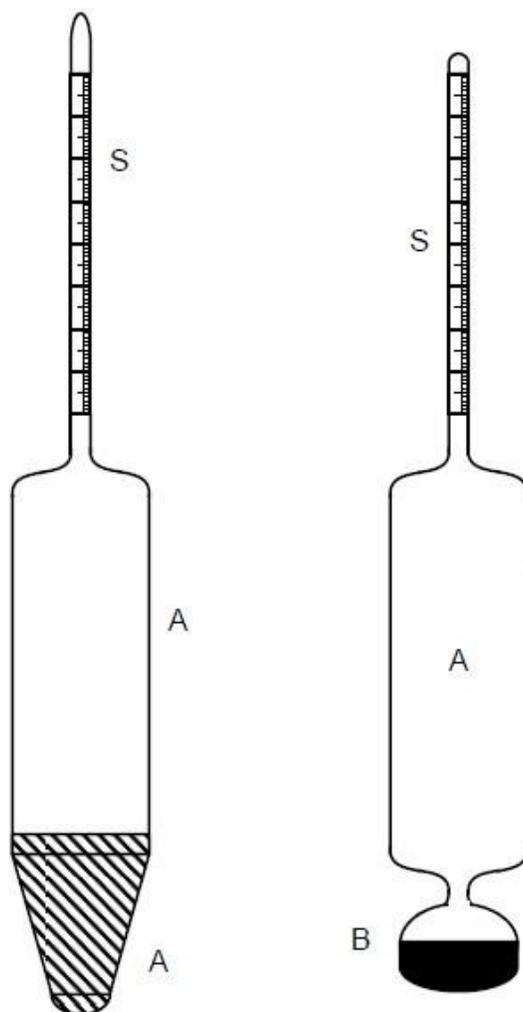


Figura 2.22 Densímetro de inmersión de masa constante [17]

El cuerpo principal es un cilindro hueco terminando en ambos extremos en forma de cono. Todas las transiciones están perfectamente lisas y continuas. La carga principal ocurre en la parte cónica baja con el bulbo que está sujeto a este extremo. El bulbo puede ser de mercurio o de balines de plomo. Dicho bulbo permite que el hidrómetro flote verticalmente y que su centro de gravedad se ubique más abajo. Para unir los balines de plomo y mantenerlos fijos en la parte baja del densímetro se puede utilizar laca, baquelita u algún otro material que no se ablande por debajo de los 80 °C.

La espiga del hidrómetro tiene la forma de un cilindro hueco delgado con un diámetro perfectamente uniforme colocado en la parte cónica superior del cuerpo. La escala de medición hecha de papel se fija dentro del tubo de la espiga. La escala de medición se alinea con una fina marca grabada en el hidrómetro a fin de que si la escala se llega a mover o a despegar, este desplazamiento pueda ser fácilmente detectable. La espiga y el cuerpo se sellan herméticamente. El eje de la escala dentro del densímetro se mantiene en forma vertical, todas las graduaciones deben ser legibles y perpendiculares al eje de la escala. El papel de la escala no se debe curvar o decolorar con el tiempo ni con cambios de temperatura. Algunos densímetros incluyen un termómetro integrado, a este tipo de densímetros se les conoce también como “termohidrómetros”.

En la figura 2.6 se observa el densímetro flotando libremente en el líquido así como la formación del menisco en la espiga debido a la tensión superficial.

Cuando se trata de líquidos opacos, el nivel del líquido está por encima del menisco formado y la corrección por menisco se aplica únicamente para estos líquidos.

Entre mayor sea la tensión superficial del líquido, mayor será el menisco formado, además de que el diámetro de la espiga también interviene en la formación del mismo.

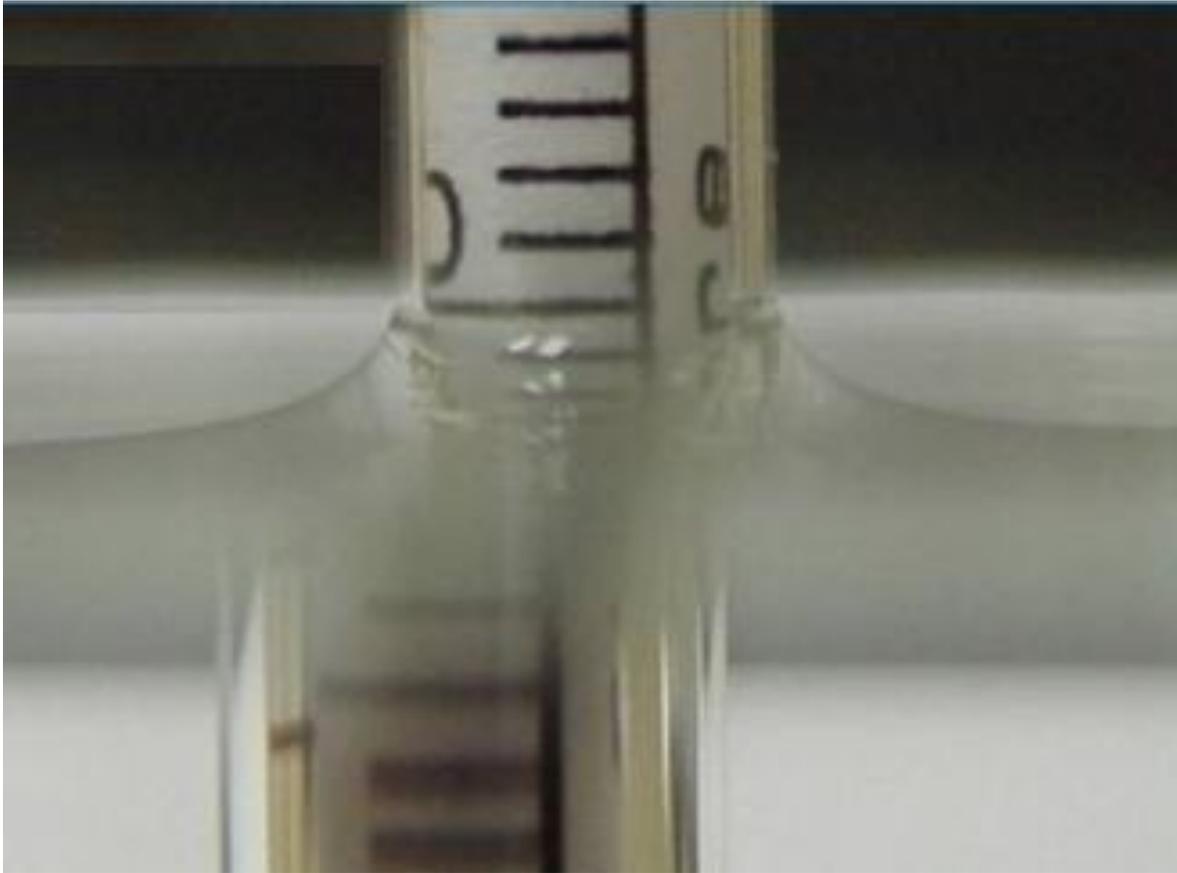


Figura 2.23 Menisco formado en la espiga del hidrómetro

2.6.2 Clasificación de hidrómetros de masa constante ISO 649/1

En la guía ISO 649/1 se especifican los requisitos para cinco series básicas de hidrómetros de vidrio de masa constante los cuales están graduados para indicar la densidad en kg/m^3 o g/ml a $20\text{ }^\circ\text{C}$.

De acuerdo a:

- Resolución (valor de densidad entre dos marcas graduadas).
- Intervalo.
- Error máximo permisible.

Uso de nomenclatura:

- L Large

- M Medium
- S Short
- SP Special Tolerance

Cada serie de hidrómetros comprende un intervalo de 600 a 2 000 kg/m³ o 0.6 a 2.0 g/ml. Los hidrómetros están graduados apropiadamente para el tipo de líquido, es decir, con baja, mediana o alta tensión superficial.

También se especifican tres sub-series de hidrómetros los cuales están graduados para indicar densidad a 20 °C o 15 °C. Estos instrumentos deben tener menor tolerancia sobre su escala de error, están limitados a un intervalo de 600 a 1 100 kg/m³, y están dedicados al uso con líquidos de baja tensión superficial.

2.6.3 Requisitos principales para hidrómetros de masa constante de acuerdo a la serie

En la tabla 2.1 se muestran los requisitos con los que deben cumplir los densímetros de inmersión de masa constante de acuerdo a la serie.

Cada serie debe cubrir el intervalo de 600 kg/m³ a 200 kg/m³ Cada hidrómetro tiene un alcance de 20 kg/m³, 50 kg/m³ o 100 kg/m³. La temperatura de referencia para estos densímetros es de 20 °C.

Cada sub-serie debe cubrir un intervalo de 600 kg/m³ a 1 100 kg/m³. El alcance de cada hidrómetro es de 50 kg/m³ o 0.050 g/ml. La temperatura de referencia es de 15 o 20 °C. Este grupo está limitado al uso en la categoría de baja tensión superficial.

En la tabla 2.2, se observan los errores máximos permitidos para las series y subseries de los densímetros de inmersión de masa constante de acuerdo a la norma ISO 649/1.

Tabla 2.1 Requisitos de densímetro de inmersión de masa constante [17]

Serie	Longitud total máxima	Intervalo nominal del hidrómetro		Número de divisiones de escala X valor del intervalo de escala		Longitud de escala mínima	Diámetro de bulbo		Volumen debajo del valor más bajo de la graduación de la escala		Extensión de escala en cada fin, entre el límite nominal superior e inferior
	Mm	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{g}{ml}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{g}{ml}$	mm	min mm	max mm	min ml	max ml	Líneas graduadas
L20	335	20	0.020	100X0.2	100X0.0002	105	35	40	108	132	6 a 10
L50	335	50	0.050	100X0.5	100X0.0005	125	23	27	50	65	2 a 5
M50	270	50	0.050	50X1	50X0.001	70	20	24	30	45	2 a 5
M100	250	100	0.100	50X2	50X0.002	85	18	20	18	26	2 a 5
S50	100	50	0.050	25X2	25X0.002	50	18	20	18	26	2 a 3
Sub-Series											
L50SP	335	50	0.050	100X0.5	100X0.0002	125	23	27	50	65	2 a 5
M50SP	270	50	0.050	50X1	50X0.001	70	20	24	30	45	2 a 5
S50SP	100	50	0.050	50X1	50X0.001	50	18	20	18	26	2 a 3

Existen otras normas para la clasificación de los hidrómetros, entre ellas la ASTM E100 y la ASTM 1298, las cuales están para un uso especificado.

Tabla 2.2 Errores máximos permitidos para cualquier punto de la escala, ISO 649/1 [17]

Series/Sub-series	Errores máximos permitidos kg/m³
L20	0.2
L50	0.5
M50	1
M100	2
S50	2
L50SP	0.3
M50SP	0.6
S50SP	1

2.6.4 Calibración de densímetros de inmersión

La importancia de la calibración o verificación periódica de los densímetros de inmersión radica en obtener resultados confiables en las mediciones que se realizan con dichos instrumentos. El objetivo en ambos casos es asegurar la exactitud de las lecturas tomadas con dichos instrumentos, así como tener trazabilidad a patrones nacionales e internacionales de densidad y cumplir con los requerimientos del sistema de calidad.

Entre los factores que pueden alterar la exactitud de las mediciones que se realizan con los densímetros de inmersión podemos enumerar los siguientes:

- La inmersión prolongada en líquidos de diferente densidad que pueden atacar químicamente el material (generalmente vidrio) con el que está fabricado el densímetro.
- El manejo inapropiado del hidrómetro sometiéndolo a esfuerzos mecánicos.

- Procedimientos de limpieza que pueden someter al densímetro a ataques abrasivos en su superficie.
- El envejecimiento natural del material de fabricación del hidrómetro.
- Desplazamientos aparentemente imperceptibles en la escala de medición dentro de la espiga del densímetro.

La combinación de algunos o todos estos factores, aunque no puedan ser apreciados a simple vista, traen como consecuencia cambios en la masa y/o en el desplazamiento de los densímetros, causando errores en las indicaciones obtenidas durante su uso.

La corrección en las mediciones es uno de los más importantes pre-requisitos para el aseguramiento de calidad de los productos y servicios, y la exactitud de los instrumentos de medición debe ser consistente con su uso previsto.

2.6.5 Principio de medición

Cuando un densímetro de inmersión flota libremente en un líquido de densidad conocida, ρ_x , en una relación con un punto de su escala de medición ρ_r , existen fuerzas dirigidas hacia arriba y hacia abajo actuando sobre él.

Sea D el diámetro de la espiga del densímetro, V el volumen del densímetro hasta la marca de su escala ρ_r cuando el densímetro está flotando en un líquido de densidad ρ_r y v el volumen de la espiga del densímetro expuesta al aire. Si γ_x es la tensión superficial del líquido, entonces las fuerzas que actúan sobre el densímetro flotando libremente en el líquido quedan de la siguiente manera:

Fuerzas dirigidas hacia abajo:

- mg la fuerza vertical gravitacional leída a la masa del densímetro.
- La fuerza debida a la tensión superficial del líquido. Parte del líquido asciende a lo largo de la espiga del densímetro ejerciendo una fuerza hacia abajo equivalente a su

peso. Si el líquido moja completamente la espiga, la fuerza debido a la tensión superficial es igual a $\pi D\gamma_x$.

Fuerzas dirigidas hacia arriba:

- La fuerza de empuje del líquido de volumen V y de densidad ρ_x . Que es igual a $V\rho_x g$
- El empuje del aire en la proporción de la espiga sobre el líquido que es igual a $v\rho_a g$

Considerando el sistema de fuerzas, la ecuación de equilibrio es:

$$mg + \pi D\gamma_x = V\rho_x g + v\rho_a g \quad \text{Ec. 2.17}$$

Donde m representa la masa del densímetro, g representa la aceleración de la gravedad y ρ_a es la densidad del aire al momento en que la escala del densímetro fue leída.

Algunas de estas magnitudes dependen de la temperatura. Por esta razón, la lectura de una medición con los densímetros ρ_r será solamente correcta a una temperatura en particular. Por ello, todos los hidrómetros tienen una temperatura de referencia, siendo los valores más comunes de 15 °C, 15.6 °C y 20 °C.

Los hidrómetros también dependen de la tensión superficial, por esta razón, los densímetros de inmersión son clasificados dentro de un intervalo específico de tensión superficial. Existen tres categorías de tensión superficial: Alta, media y baja.

La medición mediante hidrómetros y la exactitud de dichas mediciones dependen de las condiciones normales bajo las cuales son usados. Se deben tomar en cuenta las correcciones debido a la temperatura y a la tensión superficial. De la misma manera, la temperatura de trabajo, el tipo de líquido y su tensión superficial, y el método correcto para tomar la lectura son las principales contribuciones que se deben considerar durante la calibración de éstos para mejorar la exactitud [18].

2.6.6 Método de Cuckow

El método de Cuckow es usado para la calibración de hidrómetros [19]. Está basado en el principio de pesada hidrostática y fue desarrollado por F. W. Cuckow en 1949. Las principales ventajas que ofrece este método son las siguientes:

Se requiere de un solo líquido de densidad conocida y no diferentes líquidos cuyos valores de densidad sean apropiados a la escala del densímetro bajo prueba.

Con un solo líquido de densidad conocida es posible calibrar cualquier densímetro de inmersión, sin importar el alcance de éste.

2.6.7 Sistema de pesada hidrostática

El sistema de pesada hidrostática para la calibración de densímetros de inmersión consta de una balanza montada en una mesa la cual tiene un orificio para poder hacer mediciones por debajo de la balanza, un baño termostático para mantener la temperatura del líquido de densidad conocida y el recipiente transparente que lo contiene., un termómetro para medir la temperatura del líquido y un sistema de medición de las condiciones ambientales (temperatura del aire, humedad relativa y presión barométrica) para poder determinar la densidad del aire.

El método consiste en determinar la masa del densímetro en el aire y posteriormente la masa aparente del hidrómetro inmerso hasta la marca de su escala a calibrar dentro del líquido de densidad conocida a la temperatura de referencia, colgando el densímetro al platillo de la balanza (por debajo) mediante alguna suspensión metálica que sujeta la parte más alta de su espiga.

En caso que el densímetro a calibrar tenga un intervalo de medición menor a la densidad del líquido de referencia, se le puede agregar masa con algún sólido o contrapeso para forzarlo y se hunda, posteriormente se determina la masa aparente de dicho contrapeso para corregirlo en las ecuaciones de pesada.

2.6.8 Fundamento teórico y modelo matemático

El modelo matemático para la calibración de densímetros de inmersión con el método de pesada hidrostática se obtiene considerando tres condiciones de equilibrio:

- a) El densímetro flota libremente en el líquido de densidad ρ_x a la temperatura de referencia $t=t_0$. La Ec. 2.17 describe esta condición de equilibrio, considerando que los valores de V , γ_x , v están también referidos a t_0 y que ρ_a es la densidad del aire al momento en que se lee la indicación de la escala del densímetro, Obteniendo:

$$V\rho_x + v\rho_a = m_a + \frac{\pi D\gamma_x}{g} \quad \text{Ec. 2.18}$$

- b) El densímetro se pesa en el aire, y se consideran dos fuerzas que actúan sobre él: la fuerza dirigida hacia abajo debido a la gravedad y la fuerza de empuje debido al aire desplazado por el volumen del densímetro. La ecuación de equilibrio es:

$$m_p \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} \right) + v\rho_a = m_a - (V + v)\rho_a \quad \text{Ec. 2.19}$$

donde m_p es la masa del hidrómetro parcialmente sumergido en el líquido.

- c) El densímetro se pesa inmerso parcialmente hasta la misma marca de referencia como el inciso a), pero sumergido en un líquido de densidad conocida ρ_L a una temperatura t_L . Aquí se presentan dos fuerzas dirigidas hacia abajo que son la fuerza debido a la gravedad y la fuerza debido a la tensión superficial γ_L que actúa sobre la espiga del densímetro. Así mismo, hay dos fuerzas dirigidas hacia arriba que son las fuerzas: una por el empuje debida al volumen V de líquido desplazado y la fuerza de empuje debida al volumen de aire v desplazado, la ecuación que describe esta situación es:

$$V\rho_L + v\rho_a + m_{p2} \left(1 - \frac{\rho_{a2}}{\rho_{p2}} \right) = m_L + \frac{\pi D\gamma_L}{g} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Se asume que las correcciones debidas a un cambio en la densidad del aire y en el volumen del densímetro son despreciables. Considerando entonces que V , ρ_a , v son las mismas para las tres ecuaciones. Tratando matemáticamente las ecuaciones Ec. 2.18, Ec. 2.19 y Ec. 2.20 se obtiene:

$$\rho_x = (\rho_L - \rho_a) \left[\frac{m_a + \frac{\pi D \gamma_x}{g}}{m_a - m_L + \frac{\pi D \gamma_L}{g}} \right] + \rho_a \quad \text{Ec. 2.21}$$

Aplicando las correcciones debidas a la expansión volumétrica del material que está hecho el densímetro (generalmente vidrio) debido a la diferencia de temperaturas entre la temperatura del aire t_a y la temperatura del líquido t_L con la temperatura de referencia t_0 , el modelo matemático completo, donde α representa el coeficiente volumétrico de expansión térmica del vidrio y ε_d representa el error debido a la resolución del densímetro se muestra en la ecuación (2.22).

$$\begin{aligned} \rho_x = & (\rho_L [1 + \alpha(t_L - t_0)] - \rho_a [1 \\ & + \alpha(t_L - t_0)]) \left[\frac{m_a + \frac{\pi D \gamma_x}{g}}{m_a - m_L + \frac{\pi D \gamma_L}{g}} \right] \\ & + \rho_a [1 + \alpha(t_L - t_0)] - \varepsilon_d \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.22}$$

2.7 Ecuación para el cálculo de la densidad de aire

La ecuación de mayor exactitud para determinar la densidad del aire con la mejor incertidumbre (en lo que a la aportación de la fórmula se refiere), es la recomendada por el CIPM [20]. La incertidumbre de la densidad del aire, dependerá de las características de los instrumentos para medir las condiciones ambientales, la calibración de éstos, y la estabilidad de las condiciones ambientales.

Sin embargo para algunas calibraciones, en función de la incertidumbre requerida, es posible utilizar alguna versión simplificada, las cuales tienen incertidumbres asociadas (a la fórmulas) mayores a la fórmula del CIPM 2007.

Versión simplificada de la ecuación CIPM-2007, versión normal:

$$\rho_a = \frac{0.348\,444p - h_r(0.002\,52t - 0.020\,582)}{273.15 + t} \quad \text{Ec. 2.23}$$

Donde:

ρ_a densidad de aire en kg/m³

p presión barométrica en hPa

h_r humedad relativa de aire en %

t temperatura de aire en °C

La ecuación ofrece resultados con $\Delta\rho_{a,form} \leq 0.001\,41\text{ kg/m}^3$ bajo las siguientes condiciones ambientales (no están incluidas las incertidumbres de medición de p , h_r y t):

$$600\text{ hPa} \leq p \leq 1100\text{ hPa}$$

$$20\% \leq h_r \leq 80\%$$

$$15\text{ °C} \leq t \leq 27\text{ °C}$$

$\Delta\rho_{a,form}$ es la diferencia entre valores obtenidos de esta ecuación y los valores correspondientes de la ecuación CIPM.

2.8 Ecuación para la densidad de agua

La ecuación de M. Tanaka [21] ofrece valores de la densidad del agua, ρ_w libre de aire disuelto, en función de su temperatura t y válida en el intervalo de 0 °C a 40 °C a una presión de referencia de 101 325 Pa. La incertidumbre de la fórmula de M. Tanaka tiene

una incertidumbre relativa de $4.5 \times 10^{-5} \%$ la cual se combina con las demás contribuciones (p.ej. temperatura y la presión, entre otras).

Como no todas las muestras de agua tiene el mismo contenido isotópico, y con la intención de alcanzar la mayor exactitud en el cálculo de la densidad del agua, la ecuación de Tanaka tiene la posibilidad de calcular la densidad del agua para el contenido isotópico específico del agua disponible.

Dado que el agua es ligeramente compresible y puede contener aire disuelto, la ecuación proporciona correcciones debido a estos dos efectos.

Cuando se requiere conocer la densidad del agua pura, fuera de los intervalos de temperatura y presión que cubre la ecuación de M. Tanaka [21], se puede utilizar la fórmula conocida como IAPWS-95 [20].

$$\rho = \left\{ a_5 \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 (t + a_2)}{a_3 (t + a_4)} \right] + s_0 + s_1 t \right\} \cdot [1 + (k_0 + k_1 t + k_2 t^2) \cdot (p - 101325)] \quad \text{Ec. 2.24}$$

Dónde:

a_1, a_2, a_3, a_4 y a_5 son constantes;

k_0, k_1, k_2 son factores de corrección por compresibilidad;

s_0, s_1 corrección por el aire disuelto en el agua;

t es la temperatura; y

p es la presión.

Para algunas aplicaciones, en función de la incertidumbre requerida, se puede utilizar otra aproximación, cuyo cálculo sea más simple pero una incertidumbre mayor.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Etapas de la metodología

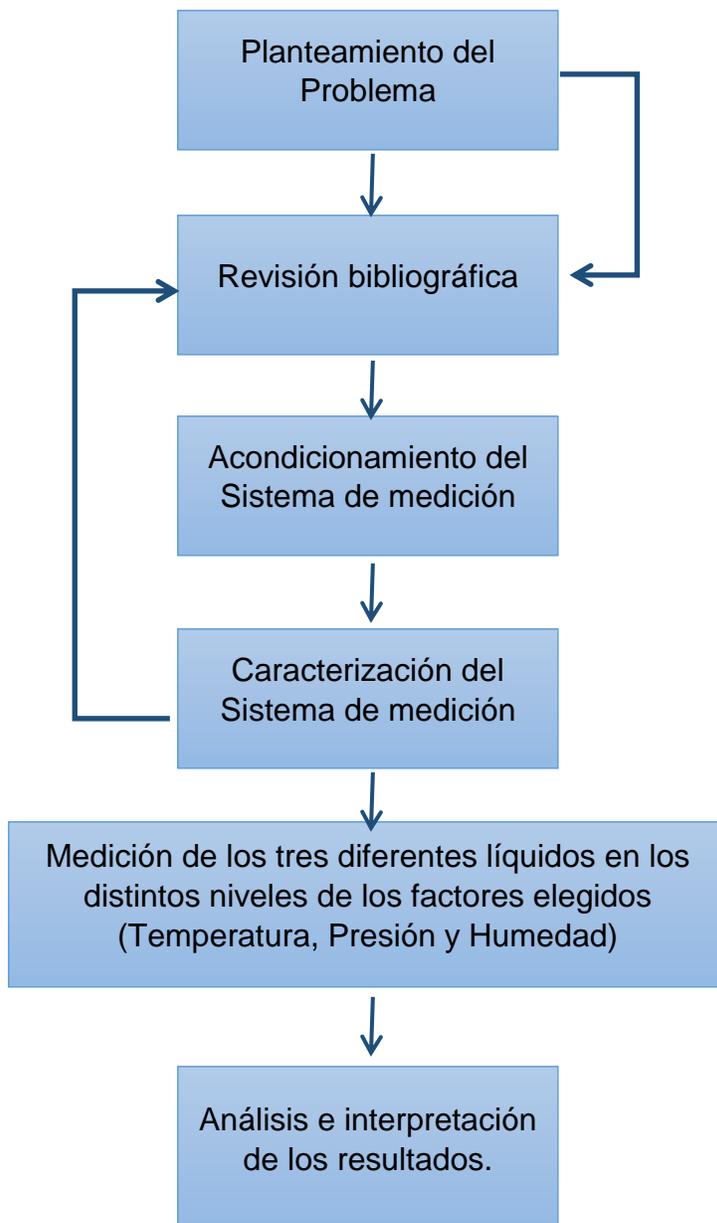


Figura 3.24 Metodología del desarrollo del proyecto.

En la figura 3.1 se muestra la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.

Para llevar a cabo el presente trabajo es necesario hacer una documentación e investigación bibliográfica sobre el tema que se está tratando.

Para un rápido y mejor entendimiento sobre la problemática que se plantea en el presente trabajo, fue necesario presenciar la calibración de los hidrómetros y la medición de densidad de líquidos por el método de pesada hidrostática con las esferas patrón (Figura 1.2) para identificar de qué manera está presente la tensión superficial de los líquidos y el efecto que tiene el en resultado de dichas mediciones como se observa en las Figuras 1.4 y 2.6.

Una vez que se identificó el efecto de la tensión superficial en las mencionadas mediciones se definió el objetivo general y los objetivos específicos, al mismo tiempo se iniciaron los arreglos para el sistema de medición a utilizar y, su caracterización, y posteriormente se realizaron mediciones experimentales para obtener conclusiones e información del comportamiento del sistema de medición.

3.2 Descripción de las etapas de la metodología

3.2.1 Planteamiento del problema

Como se ha mencionado, el efecto de la tensión superficial en la calibración de hidrómetros y en la medición de densidad de líquidos con las esferas patrón, depende del líquido que se esté empleando, y este parámetro hasta el momento se obtiene de tablas o del valor que proporciona su fabricante.

Por lo anterior, se desarrollará una metodología que permita medir la tensión superficial a diferentes temperaturas, presiones y humedades en distintos líquidos, utilizando un dispositivo dedicado a la medición de este parámetro de tal manera que los resultados experimentales sean comparados con los reportados en la literatura. Dichos resultados obtenidos en el proyecto que lleva por nombre “Estudio de la temperatura, humedad

relativa, presión y densidad como variables de influencia para la medición de tensión superficial de líquidos” y desarrollado en las instalaciones del CENAM en la dirección de masa y densidad, serán utilizados para mejorar la estimación de la incertidumbre en las mediciones anteriormente mencionadas.

3.2.2 Investigación bibliográfica

La revisión bibliográfica se discutió previamente en los capítulos anteriores.

3.2.3 Acondicionamiento del sistema de medición

El sistema de medición que se utilizó para el desarrollo de este proyecto comprende los siguientes elementos principales:

- **Baño para el control de temperatura (Figura 3.2) con las siguientes características:**

Dato	Capacidad
Intervalo de temperaturas de operación	-20°C – 200°C
Estabilidad de Temperatura	± 0.01°C
Tipo de Bomba	De presión/succión y velocidad variable
Presión Máxima	0.30 bar
Caudal a la presión Máxima	20.1 lpm
Caudal a la succión Máxima	14.7 lpm
Capacidad del deposito	7 litros
Requisitos Eléctricos	120 V, 60 Hz, 12 A



Figura 3.25 Baño para el control de temperatura.

- **Tensiómetro semiautomático de contacto dinámico es un instrumento con las siguientes características técnicas:**
 - Software controlador de posicionamiento de altura de la unidad de control de temperatura con variación de velocidad.
 - Sensor de temperatura en el recipiente con un Pt100 de un diámetro de 100 mm
 - Anclaje automático de la balanza
 - Pantalla grafica con datos de masa y temperatura y estados de medición.
 - Interface serial RS 232C o USB para conexión con la PC.
 - Cámara de protección de partículas
 - Sensor de temperatura externo
 - Vasos de borosilicato con diámetros de 100 mm



Figura 3.26 Tensiómetro utilizado

- **Anillo para la determinación de Tensión superficial**

Este es el elemento que se utiliza para la determinación de la fuerza necesaria para poder desprender dicho anillo de la superficie del líquido bajo prueba. Tiene las siguientes dimensiones principales:

Diámetro del anillo: 19.09 mm

Diámetro del alambre que forma el anillo: 0.37 mm



Figura 3.27 Anillo de platino-Iridio

- **Cámara para el control de las condiciones ambientales.**

Este elemento es primordial para la variación de las condiciones ambientales que estuvieron presentes en el presente estudio. Es una cámara de acero inoxidable adaptada (Figura 3.5) para hacer variar las condiciones de presión y humedad a los valores que se requerían y estabilizarlos para proceder a la realización de las mediciones de tensión superficial en diferentes niveles de los diferentes factores.

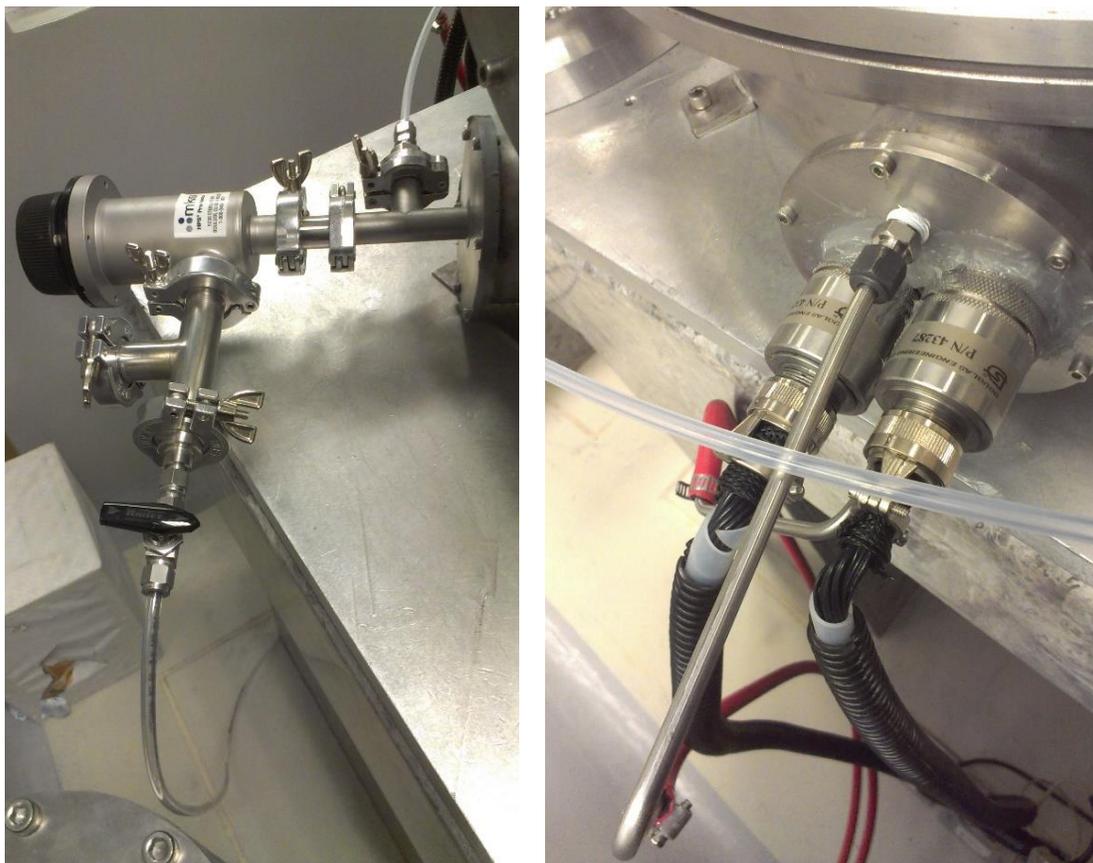


Figura 3.28 Acondicionamiento de la cámara para la comunicación y control de condiciones ambientales.

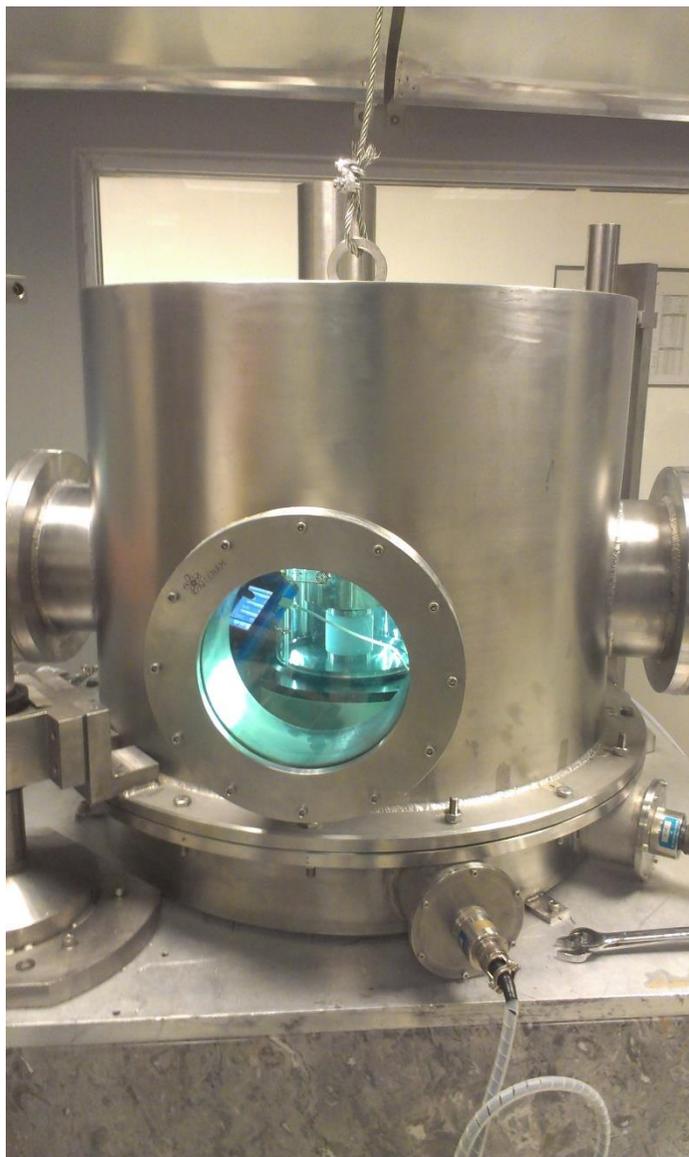


Figura 3.29 Cámara para el control de condiciones ambientales.

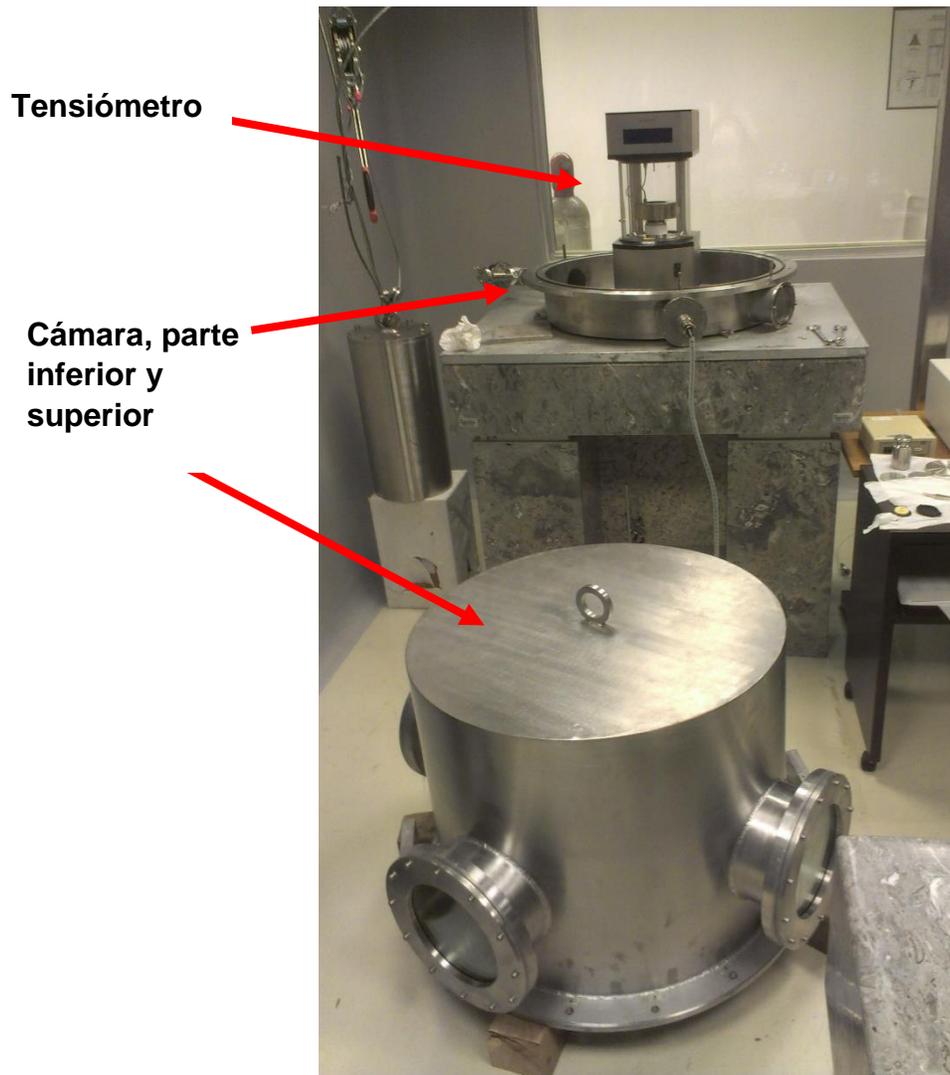
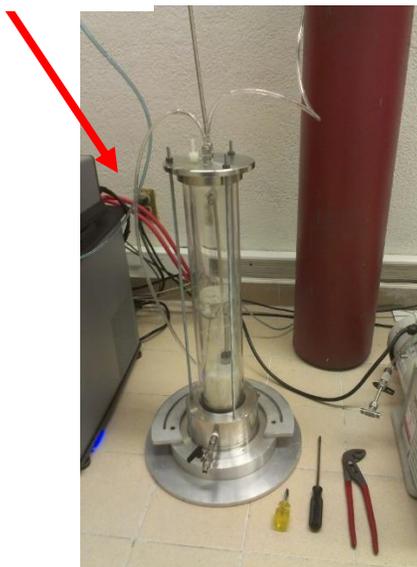


Figura 3.30 Principales elementos del sistema.

- **Elementos para la modificación de humedad relativa**

Para modificar la humedad relativa del ambiente dentro de la cámara de control se utilizó un sistema externo de burbujas que permitió incrementar la humedad relativa desde 50% hasta aproximadamente 70%, y por el contrario se utilizó cloruro de calcio para reducir la humedad relativa de 50% hasta 30%.

Humidificador



Deshumidificador



Figura 3.31 Elementos para manipular la humedad relativa dentro de la cámara

- **Elementos para la modificación de Presión**

La manipulación de la presión dentro de la cámara se llevó a cabo mediante un tanque de aire a presión para elevar la presión a 101 kPa aproximadamente y para disminuirla se utilizó una bomba de vacío que redujo hasta alrededor de 61 kPa, donde una vez establecida la presión dentro de la cámara se cerró para evitar cambios de presión en la misma.

Tanque con aire a alta presión



Bomba de vacío



Figura 3.32 Elementos para manipular la presión dentro de la cámara

3.2.4 Caracterización del sistema de medición

Para llevar a cabo este proceso se evaluó la uniformidad de la temperatura de la muestra (la caja donde se deposita la muestra para su estabilidad térmica) se evaluó temporalmente (estabilidad). Esta evaluación temporal de la muestra proporciona sus características propias del medio, se evaluó durante dos horas obteniendo los siguientes resultados de las figuras.



Figura 3.33 Caracterización de la temperatura de la muestra

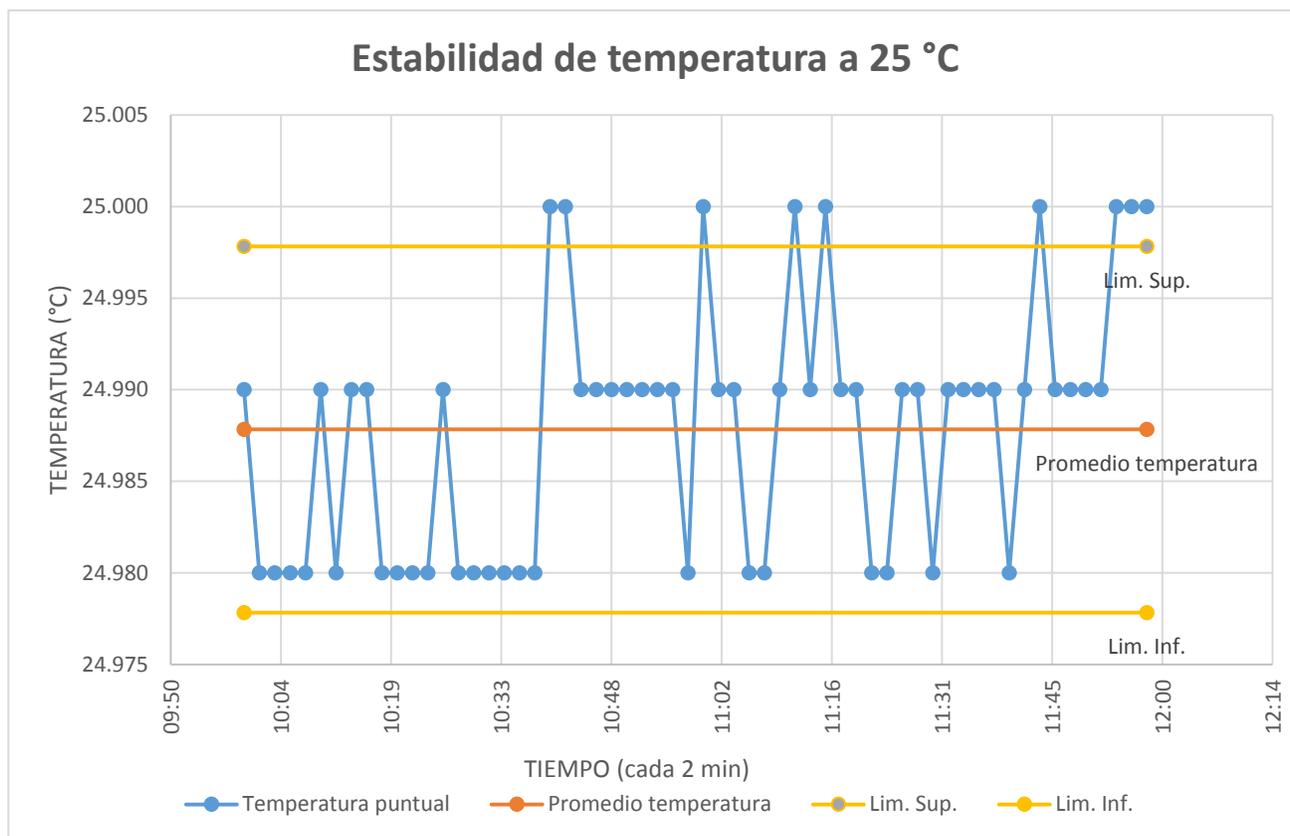


Figura 3.34 Estabilidad de la muestra a 25 °C

$$\text{Temperatura promedio} = 24.988 \text{ °C}$$

$$L_{\text{sup}} - L_{\text{inf}} = 24.998 \text{ °C} - 24.978 \text{ °C}$$

$$L_{\text{sup}} - L_{\text{inf}} = 0.020 \text{ °C}$$

La diferencia de los límites es obtenida directamente de las diferencias que existen entre los valores de temperatura máximos y mínimos comparados con la media de dichas mediciones como se observa en la Figura. 3.11

Los datos obtenidos para analizar la estabilidad han sido corregidos de acuerdo al certificado con un valor de corrección de 0.004 °C.

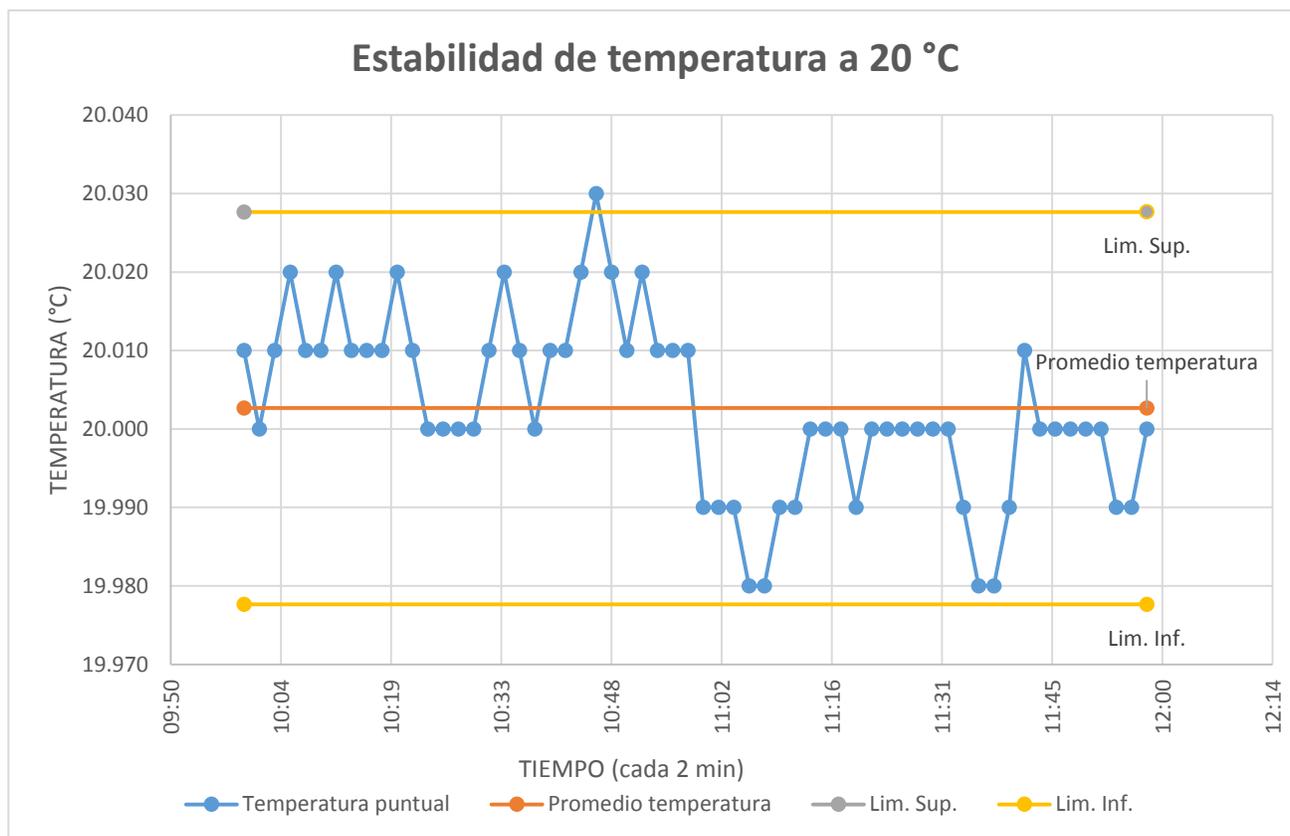


Figura 3.35 Estabilidad de la muestra a 20 °C

Temperatura promedio= 20.003 °C

Lsup – Linf= 20.028 °C – 19.978 °C

Lsup – Linf= 0.050 °C

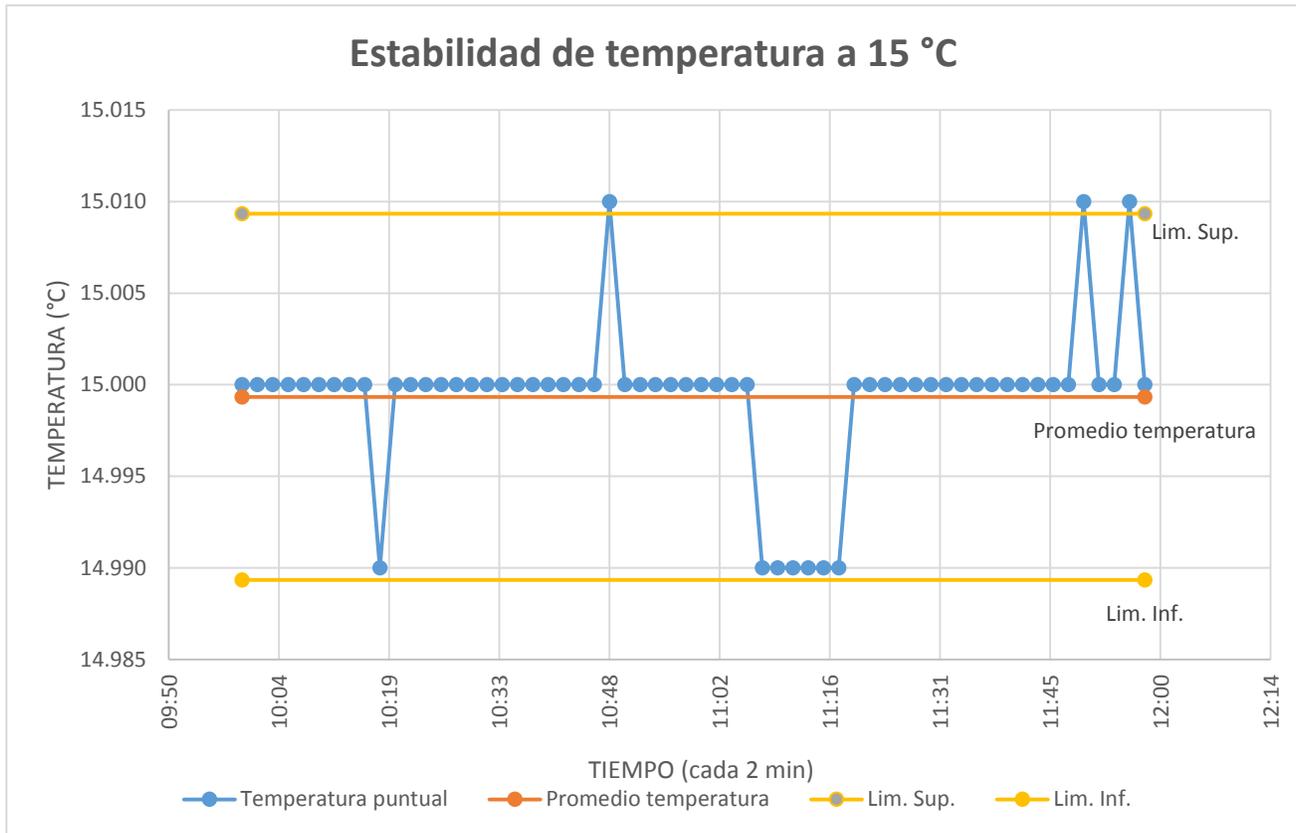


Figura 3.36 Estabilidad de la muestra a 15 °C

Temperatura promedio= 14.999 °C
 $L_{sup} - L_{inf} = 15.009 \text{ °C} - 14.989 \text{ °C}$
 $L_{sup} - L_{inf} = 0.020 \text{ °C}$

Tabla 3.1 Estabilidad de temperatura

Temperatura (°C)	Estabilidad (°C)
15.00	0.020
20.00	0.050
25.00	0.020

La Tabla 3.1 muestra el valor de estabilidad que se encontró para cada uno de los niveles de temperatura que se utilizó para el presente trabajo.

Las condiciones ambientales del lugar donde se realizaron las mediciones de tensión superficial son estables debido a que se controla la manera en que se hace uso del laboratorio aunque cabe destacar que las condiciones con que se realizó este trabajo fueron las que están dentro de la cámara donde se encontraba el instrumento.

Para un mejor uso del área de trabajo, en la actualidad este laboratorio se encuentra cerrado y el acceso solo se da a éste con claves en las puertas, primero con una puerta antes de entrar a la exclusiva y otra puerta para ingresar al laboratorio.

Para ingresar al laboratorio se debe considerar lo siguiente:

- a) Teclear una clave de acceso a la exclusiva, esta clave consta de 3 dígitos.
- b) En la exclusiva hay tapetes adhesivos atrapa polvo; antes de entrar al laboratorio deberá pasarse por él, para remover el polvo de los zapatos.
- c) Se deben colocar los cubrezapatos, estos tienen una cinta negra que debe ser colocada de tal manera que toque la piel para eliminar alguna carga estática en el cuerpo.
- d) Colocarse la bata (esta bata no debe salir de la exclusiva para evitar que se contamine con el exterior).
- e) Teclear la clave de acceso al laboratorio.
- f) La limpieza del laboratorio cumple con las características de cuarto limpio de clase 10 000.

Con las características de un cuarto limpio de clase 10 000 se logra tener en este laboratorio las siguientes condiciones:

- Temperatura ambiental: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una variación máxima de $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una hora.
- Presión: $81\text{ }000\text{ Pa} \pm 1\text{ }000\text{ Pa}$ con una variación máxima de 100 Pa en una hora.
- Humedad Relativa: $50\% \pm 10\%$ con una variación máxima de 5% en cuatro horas.

Relación entre tensión superficial, densidad y composición química

Los valores de tensión superficial de algunos de los líquidos seleccionados no se conocen. En la literatura existen trabajos que describen la relación entre tensión superficial, densidad y composición química

Estos métodos teóricos permiten estimar la tensión superficial de líquidos como se muestra en los siguientes ejemplos.

El parámetro Parachor “*P*” ($cm^3 * g^{1/4}/s^{1/2} * mol$) se define como:

$$P = \frac{M\gamma^{1/2}}{\rho_l - \rho_g} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

M= (kg/Mol) Masa molar

ρ_l = (kg/m^3) Densidad del líquido

ρ_g = (kg/m^3) Densidad de vapor del químico

Este parámetro es utilizado por los siguientes métodos para estimar la tensión superficial en base a las características moleculares de cada sustancia.

- **Método Sugden:**

Este método recopila información de la Tabla 3.2 para cada elemento que comprende la molécula de la sustancia y cuantos elementos en la misma de la siguiente manera [22]:

$$P = \sum n_i * P_i \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

P= Parachor, $cm^3 * g^{1/4}/s^{1/2} * mol$

n_i= número de elementos del tipo *i* en la molécula

P_i =contribución del elemento i en Parachor, $cm^3 * g^{1/4}/s^{1/2} * mol$

Una vez estimado el parámetro Parachor se utiliza para hacer la estimación de la tensión superficial extraída de la Ec. 3.1 quedando de la siguiente forma:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

γ = Tensión superficial del líquido, (dyn/cm)

P = Parachor, ($cm^3 * g^{1/4}/s^{1/2} * mol$)

ρ_l = Densidad del líquido (kg/m^3) Densidad del líquido

M = Masa molar (kg/Mol)

Tabla 3.2 Contribuciones del parámetro Parachor [22]

Structural Feature	P _i	Structural Feature	P _i
Hydrocarbon Increments		Special Groups	
C	9.0	-COO-	63.8
H	15.5	-COOH	73.8
CH ₃ -	55.5	-OH	29.8
CH ₂ in -(CH ₂) _n -, n < 12	40.0	-NH ₂	42.5
CH ₂ in -(CH ₂) _n -, n > 12	40.3	-O-	20.0
1-Methylethyl-	133.3	-NO ₂	74
1-Methylpropyl-	171.9	-NO ₃	93
1-Methylbutyl-	211.7	-CO(NH ₂)	91.7
2-Methylpropyl-	173.3	-CHO	66
1-Ethylpropyl-	209.5	R-CO-R', R + R'=2	22.3
1,1-Dimethylethyl-	170.4	R-CO-R', R + R'=3	20.0
1,1-Dimethylpropyl-	207.5	R-CO-R', R + R'=4	18.5
1,2-Dimethylpropyl-	207.9	R-CO-R', R + R'=5	17.3
1,1,2-Trimethylpropyl-	243.5	R-CO-R', R + R'=6	17.3
>C=C<, terminal position	19.1	R-CO-R', R + R'=7	15.1
>C=C<, 2,3-position	17.7	R-CO-R', R + R'=8	14.1
>C=C<, 3,4-position	16.3	R-CO-R', R + R'=9	13.0
-C=C-	40.6	R-CO-R', R + R'=10	12.6
Three-membered ring	12	O (except as above)	20
Four-membered ring	6.0	N (except as above)	17.5
Five-membered ring	3.0	S	49.1
Six-membered ring	0.8	P	40.5
Seven-membered ring	4.0	F	26.1
C ₆ H ₅ -	189.6	Cl	55.2
Disubstituted benzene ^a		Br	68.0
		I	90.3
		Se	63
		As	54

- **Método McGowan:**

Este método estima el parámetro Parachor de la siguiente manera [22]:

$$P = \sum n_i A_i - 19 N_{enlaces}$$

Ec. 3.4

Donde:

$P = \text{Parachor, } cm^3 * g^{1/4}/s^{1/2} * mol$

$n_i = \text{número de elementos del tipo } i \text{ en la molécula}$

$A_i = \text{contribución del átomo } i, cm^3 * g^{1/4}/s^{1/2} * mol$

$N_{bonds} = \text{Numero de Enlaces en la molécula}$

Tabla 3.3 Contribuciones atómicas del parámetro Parachor [22].

Atom	Value, $cm^3 \cdot g^{1/4}/s^{1/2} \cdot mol$
As	87.6
B	53.4
Br	76.1
C	47.6
Cl	62.0
F	30.5
H	24.7
I	98.9
N	41.9
O	36.2
P	73.5
S	67.7
Se	81.9

A continuación se muestra el uso de estos métodos en diferentes líquidos.

1. Se estimó Parachor y tensión superficial para Pentadecano C15H32

Método Sugden:

De acuerdo con la Ec. 3.2 y los valores de contribución Parachor “Pi” tenemos:

$$P = \sum n_i * P_i = 15(9) + 32(15.5) = 631 \text{ cm}^3 * \text{g}^{1/4} / \text{s}^{1/2} * \text{mol}$$

Para estimar la tensión superficial:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{631 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} * 0.768551 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{212.42 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.283003865)^4 = 27.16 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}} \left(\frac{0.00001 \text{ N}}{1 \text{ dina}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 27.16 \text{ mN/m}$$

Método McGowan:

Para el mismo material pero ahora utilizando la expresión

$$\begin{aligned} P &= \sum n_i A_i - 19 N_{bonds} = [(n_C A_C) + (n_H A_H)] - 19 (46 \text{ enlaces}) \\ &= \left[(15) \left(47.6 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right) + (32) \left(24.7 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right) \right] - 19 (46 \text{ enlaces}) \\ &= \left[1504.4 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right] - 874 = 630.4 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \end{aligned}$$

Aplicando la Ec. 3.3 resulta:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{630.4 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} * 0.768551 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{212.42 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.280833)^4 = 27.06 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}} \left(\frac{0.00001 \text{ N}}{1 \text{ dina}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 27.06 \text{ mN/m}$$

2. Se estimó Parachor y tensión superficial para Etilenglicol CH₂(OH)CH₂(OH)

Método Sugden:

De acuerdo con la Ec. 3.2 y los valores de contribución Parachor "Pi" tenemos:

$$P = \sum n_i * P_i = 2(9) + 6(15.5) + 2(20) = 151 \text{ cm}^3 * \text{g}^{1/4} / \text{s}^{1/2} * \text{mol}$$

Para estimar la tensión superficial:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{151 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} * 1.10734 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{62.07 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.693867247)^4 = 52.66 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}} \left(\frac{0.00001 \text{ N}}{1 \text{ dina}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 52.66 \text{ mN/m}$$

Método McGowan:

Para el mismo material pero ahora utilizando la Ec 3.4:

$$\begin{aligned} P &= \sum n_i A_i - 19 N_{bonds} = [(n_C A_C) + (n_H A_H) + (n_O A_O)] - 19 (9 \text{ enlaces}) \\ &= \left[(2) \left(47.6 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right) + (6) \left(24.7 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right) + (2) \left(36.2 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right) \right] - 19 (9 \text{ enlaces}) \\ &= \left[315.8 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right] - 171 = 144.8 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \end{aligned}$$

Aplicando la Ec. 3.3 resulta:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{144.8 \frac{cm^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * mol} * 1.10734 \frac{g}{cm^3}}{62.07 \frac{g}{mol}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.583258128)^4 = 44.53 \frac{dinas}{cm} \left(\frac{0.00001 N}{1 dina} \right) \left(\frac{100 cm}{1 m} \right) = 44.53 mN/m$$

3. Se estimó Parachor y tensión superficial para Agua H₂O

Método Sugden:

De acuerdo con la Ec. 3.2 y los valores de contribución Parachor "Pi" tenemos:

$$P = \sum n_i * P_i = 2(15.5) + 1(20) = 51 \text{ cm}^3 * g^{1/4} / s^{1/2} * \text{mol}$$

Para estimar la tensión superficial:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{51 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * \text{mol}} * 0.99820 \frac{g}{\text{cm}^3}}{18.015 \frac{g}{\text{mol}}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.825878435)^4 = 63.76 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}} \left(\frac{0.00001 \text{ N}}{1 \text{ dina}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 63.76 \text{ mN/m}$$

Método McGowan:

Para el mismo material pero ahora utilizando la Ec 3.4:

$$\begin{aligned} P &= \sum n_i A_i - 19 N_{bonds} = [(n_H A_H) + (n_O A_O)] - 19 (2 \text{ enlaces}) \\ &= \left[(2) \left(24.7 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * \text{mol}} \right) + (1) \left(36.2 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * \text{mol}} \right) \right] - 19 (2 \text{ enlaces}) \\ &= \left[85.6 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * \text{mol}} \right] - 38 = 47.6 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * \text{mol}} \end{aligned}$$

Aplicando la Ec. 3.3 resulta:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{47.6 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * \text{mol}} * 0.99820 \frac{g}{\text{cm}^3}}{18.015 \frac{g}{\text{mol}}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.637486539)^4 = 48.39 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}} \left(\frac{0.00001 \text{ N}}{1 \text{ dina}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 48.39 \text{ mN/m}$$

Cabe señalar que este método de estimación de tensión superficial aplica para líquidos orgánicos y se observa que en el agua los valores no son semejantes por los dos métodos.

Por esta razón se hizo el análisis de la tensión superficial de otro líquido orgánico como se muestra a continuación:

4. Estimar Parachor y tensión superficial para POLIALFAOLEFINA C₁₀H₂₀

Método Sugden:

De acuerdo con la Ec. 3.2 y los valores de contribución Parachor "Pi" tenemos:

$$P = \sum n_i * P_i = 10(9) + 20(15.5) = 400 \text{ cm}^3 * g^{1/4} / s^{1/2} * mol$$

Para estimar la tensión superficial:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{400 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * mol} * 0.794455 \frac{g}{\text{cm}^3}}{140.267 \frac{g}{mol}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.2655506997)^4 = 26.35 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}} \left(\frac{0.00001 \text{ N}}{1 \text{ dina}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 26.35 \text{ mN/m}$$

Método McGowan:

Para el mismo material pero ahora utilizando la Ec 3.4:

$$P = \sum n_i A_i - 19 N_{bonds} = [(n_C A_C) + (n_H A_H)] - 19 (30 \text{ enlaces})$$

$$= \left[(10) \left(47.6 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * mol} \right) + (20) \left(24.7 \frac{\text{cm}^3 * g^{1/4}}{s^{1/2} * mol} \right) \right] - 19 (30 \text{ enlaces})$$

$$= \left[970 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} \right] - 570 = 400 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}}$$

Aplicando la Ec. 3.3 resulta:

$$\gamma = \left(\frac{P * \rho_l}{M} \right)^4 = \left(\frac{400 \frac{\text{cm}^3 * \text{g}^{1/4}}{\text{s}^{1/2} * \text{mol}} * 0.794455 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{140.267 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \right)^4$$

$$\gamma = (2.637486539)^4 = 26.34 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}} \left(\frac{0.00001 \text{ N}}{1 \text{ dina}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) = 26.34 \text{ mN/m}$$

En este último líquido la consistencia de los valores obtenidos en la estimación de tensión superficial es semejante entre sí, por lo que se comprueba que esta estimación es mejor para este tipo de líquidos.

Para caracterizar el sistema del presente trabajo, se emplearon instrumentos de medición que ayudaron a conocer el resultado del mensurando.

Por lo anterior, se monitorearon y controlaron variables como presión, humedad, temperatura ambiental y de la muestra, con el propósito de conocer el tiempo de estabilización y evitar alguna perturbación en el proceso de medición.

Un sistema de medición es un conjunto de uno o más instrumentos de dispositivos, reactivos e insumos, los cuales se ensamblan y adaptan para proporcionar valores medidos dentro de intervalos especificados.

De esta manera, la medición consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que puedan atribuirse razonablemente a una magnitud. La magnitud a su vez nos dice que es la propiedad de un fenómeno, de un cuerpo o de una sustancia que se puede expresar mediante un número y una referencia.

La magnitud de influencia es aquella en la que en una medición directa, no afecta a la magnitud que realmente se está midiendo, pero sí afecta a la relación entre la indicación y el resultado de medición.

Para llevar a cabo la medición deben considerarse diferentes factores tales como los principios de medida, basados en modelos de medición los cuales incluyen los cálculos necesarios para obtener un resultado de medición, también se debe considerar que cada uno de los instrumentos utilizados deben estar calibrados y contar con su respectivo certificado de calibración vigente [23].

El resultado de una medición puede tener diferentes errores, un error de medida es la diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia. Los errores presentados en la medición son error sistemático de medida en el que en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible y el error aleatorio de medida en el que las mediciones repetidas varían de manera impredecible. Este error nunca puede ser identificado.

En un sistema de medición está presente la incertidumbre de la medición que es un término, definido como: “Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando a partir de la información que se utiliza” [27] que es utilizado para describir la calidad de un valor de medición, los estándares del sistema de calidad tales como ISO/IEC TS16949 requieren que, la incertidumbre de medida debe ser conocida y consistente con la capacidad de medición requerida de cualquier inspección, medición o equipo de prueba [24].

3.2.5 Medición de los diferentes líquidos en diferentes niveles de los factores en el estudio.

En la siguiente matriz (Tabla 3.4) se muestran los diferentes niveles de cada factor que se evaluó en la experimentación de este trabajo, con las interacciones entre ellos para cada uno de los materiales que se utilizaron (Figura 3.14). Además de esto, el equipo nos

permitió modificar el número de ciclos con que se puede trabajar y observar las posibles diferencias.

En esta matriz se observan los tres niveles de presión equilibrados, utilizando el valor de presión para la ciudad de Querétaro (81 kPa) como inicio para después tomar un punto de referencia del nivel del mar como 101 kPa y un punto por debajo de este para hacer equilibrado el estudio.

Tabla 3.4 Matriz de factores en sus diferentes niveles.

TENSIÓN SUPERFICIAL AGUA										
Factores/niveles		Humedad 1 (30% H.R.)			Humedad 2 (50% H.R.)			Humedad 3 (70% H.R.)		
		Presión 1 (61 kPa)	Presión 2 (81 kPa)	Presión 3 (101 kPa)	Presión 1 (61 kPa)	Presión 2 (81 kPa)	Presión 3 (101 kPa)	Presión 1 (61 kPa)	Presión 2 (81 kPa)	Presión 3 (101 kPa)
Temperatura 1 (15°C)	5 Ciclos									
	10 Ciclos									
	15 Ciclos									
Temperatura 2 (20°C)	5 Ciclos									
	10 Ciclos									
	15 Ciclos									
Temperatura 3 (25°C)	5 Ciclos									
	10 Ciclos									
	15 Ciclos									

De esta manera también se observan niveles de 30 %, 50 % y 70 % de humedad relativa. Para el factor temperatura se seleccionaron los valores de 15, 20 y 25 °C por ser valores cercanos a los utilizados como estándar de referencia en metrología. Por último la cantidad de ciclos que puede repetir el sistema semiautomático de medición de tensión superficial.



Figura 3.37 Materiales de Referencia Certificados en Densidad (MRC) de izquierda a derecha: Etilenglicol - Agua – Pentadecano

3.2.6 Análisis e interpretación de resultados

Modelo de medición de la tensión superficial por el método del anillo

El tensiómetro utiliza la Ec. 3.6 para indicar el resultado de una medición. Este equipo obtiene como medida inicial la masa m , que está afectada por la aceleración de la gravedad local g , que permite calcular la fuerza necesaria para poder desprender el anillo de la superficie del líquido. Este valor se divide entre 4π veces el radio del anillo R para conocer la tensión superficial del líquido [25] [26].

$$\gamma = \frac{mg}{4\pi R} \quad \text{Ec. 3.5}$$

A esta determinación se le hace una corrección debida a la influencia que tienen otros factores como son la diferencia de densidades en la zona interfacial donde se presenta la tensión superficial, además del efecto que tiene las dimensiones del anillo con que se mide

este parámetro en conjunto con el radio del alambre que conforma el anillo mismo, obteniendo el siguiente modelo matemático:

$$\gamma = \frac{mg}{4\pi R} \left(\sqrt{\left(\frac{4bmg}{\pi^2 R^2 (D - d)} \right) + c} \right) + a \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde,

- a Constante igual a 0.725
- b Constante igual a 0.0009075
- c Constante igual a 0.04534 - 1.679 (r / R).
- D Densidad de la fase más densa. g/cm³
- d Densidad de la fase menos densa. g/cm³
- r Radio del alambre que conforma el anillo. cm
- R Radio del anillo. cm
- P Es la fuerza para desprender el anillo de la superficie del líquido (m*g)

El instrumento que se utilizó para llevar a cabo la experimentación muestra dos indicaciones de masa, una “pulling” (jalando) y otra “pushing” (empujando) el líquido, promediando posteriormente esas dos indicaciones en un número determinado de ciclos como se mostrará en el capítulo de resultados. Ver Ec. 3.7

$$\gamma = \frac{\left(\frac{m_1 + m_2}{2} \right) g}{4\pi R} \left(\sqrt{\left(\frac{4b \left(\frac{m_1 + m_2}{2} \right) g}{\pi^2 R^2 (D - d)} \right) + 0.04534 - 1.679 \frac{r}{R} + a} \right) \quad \text{Ec. 3.7}$$

La unidad de medida es el miliNewton por metro (mN/m), sin embargo pueden ser encontrados algunos reportes en múltiplos o submúltiplos de la unidad de tensión superficial, como simplemente Newton por metro N/m. Inicialmente como se menciona en

las referencias [25] y [26] la expresión de la Ec. 3.6 tenía unidades de: $\frac{dinas}{cm}$ multiplicadas por un factor de corrección nos da lo siguiente:

$$\gamma = \left[\frac{g * \frac{cm}{s^2}}{cm} \right] * F_c = \left[\frac{dinas}{cm} \left(\frac{0.00001 N}{1 dina} \right) \left(\frac{100 cm}{1 m} \right) \right] * F_c = [mN/m] * F_c$$

Para llevar a cabo el análisis de los resultados es importante conocer el nivel de incertidumbre con la que se realizaron los mismos para tener una confianza adecuada del sistema y metodología de medición.

Uno de los parámetros que nos ayudaran es estimar la Incertidumbre de medición. Metrológicamente, la incertidumbre es la característica asociada al resultado de una medición que comprende, dentro de un nivel de confianza establecido, el espacio bidireccional que contenga al valor esperado por el instrumento de medición. La incertidumbre es una expresión cuantificable de la confiabilidad de la medición, la cual se puede expresar como:

$$\text{Valor convencionalmente verdadero} = \text{Valor medido} \pm U \quad \text{Ec. 3.8}$$

En la Ec. 3.8 U es el término para incertidumbre expandida del resultado de la medición.

Para representar los valores de las incertidumbres asociadas a cada magnitud de entrada como “incertidumbres estándar”, existen dos formas de evaluarlas [24].

Estos dos tipos de evaluación se basan en distribuciones de probabilidad:

- Evaluación de incertidumbre tipo A:

Obtenida del número de observaciones independientes del mensurando y la varianza experimental de la media aritmética de las mismas, para cada uno de los factores en sus interacciones de cada nivel expresado de la siguiente forma la incertidumbre estándar:

$$u(x_i) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 3.9}$$

- Evaluación de incertidumbre tipo B:

Basada en información disponible de la variabilidad de las magnitudes de entrada, como pueden ser: datos de mediciones anteriores, especificaciones de los fabricantes, datos obtenidos de certificados, incertidumbres asignadas a datos de referencia tomados de manuales, etc. Por ejemplo:

- Cuando la incertidumbre no está dada necesariamente como múltiplo de una desviación estándar, se supone una distribución normal, asignándole un nivel de confianza del 90 %, 95 % o 99 %, para lo cual la incertidumbre estándar se obtiene dividiendo la Incertidumbre asignada entre un factor apropiado como puede ser 1.64; 1.96 o 2.58 correspondientes respectivamente a los porcentajes antes mencionados:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad \text{Ec. 3.10}$$

- Cuando no se tiene un conocimiento específico acerca de los valores de entrada dentro de un intervalo, se supone que es igualmente probable para ese valor de entrada tomar cualquier valor dentro de un intervalo. Esta se denomina distribución rectangular, y la incertidumbre estándar es:

$$u(x_i) = \frac{\Delta a}{\sqrt{12}} = \frac{a^+ - a^-}{\sqrt{12}} \quad \text{Ec. 3.11}$$

- En los casos en que los valores de cercanos a los límites sean menos probables que aquellos que están cercanos al punto medio, se reemplaza la distribución rectangular por una distribución trapezoidal simétrica con una base inferior de longitud $a^+ - a^- = 2a$ y una longitud superior de $2a\beta$, cuando $\beta=1$ se considera rectangular, pero si $\beta=0$ se crea una distribución triangular, y la incertidumbre estándar es:

$$u(x_i) = \frac{\Delta a}{\sqrt{24}} = \frac{a^+ - a^-}{\sqrt{24}} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Estimación de incertidumbre de la medición de tensión superficial

- **Incertidumbre debida a la indicación del tensiómetro**

La incertidumbre de la indicación se estima del modelo de medición de la Ec. 3.7

La incertidumbre estándar para la medición de tensión superficial (γ), se estima a partir de la ley de propagación de incertidumbre según la propuesta de la Guía para Estimación de Incertidumbre en las mediciones [28]. Para esto se requiere conocer la incertidumbre estándar de cada una de las contribuciones, así como de los coeficientes de sensibilidad correspondientes. La incertidumbre estándar combinada asociada a la indicación del instrumento se calcula con la Ec. 3.13

$$u_c(\gamma) = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial m_1} u(m_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial m_2} u(m_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial g} u(g)\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial R} u(R)\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial r} u(r)\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial D} u(D)\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial d} u(d)\right)^2} \quad \text{Ec. 3.13}$$

Los coeficientes de sensibilidad se obtienen de la siguiente manera:

- El coeficiente de sensibilidad debido a las indicaciones de masa 1 (Pulling) del tensiómetro, g

$$\frac{\partial \gamma}{\partial m_1} = \frac{(m_1 + m_2) b g^2}{8\pi^3 R^3 (D - d) \sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2 R^2 (D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534}} + \frac{g \left(\sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2 R^2 (D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534} + a \right)}{8\pi R} \quad \text{Ec. 3.14}$$

- El coeficiente de sensibilidad debido a las indicaciones de masa 2 (pushing) del tensiómetro, g

$$\frac{\partial \gamma}{\partial m_2} = \frac{(m_1 + m_2)bg^2}{8\pi^3R^3(D - d) \sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2R^2(D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534}} + \frac{g \left(\sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2R^2(D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534} + a \right)}{8\pi R} \quad \text{Ec. 3.15}$$

- El coeficiente de sensibilidad debido a la aceleración de la gravedad local, cm/s^2

$$\frac{\partial \gamma}{\partial g} = \frac{bg(m_1 + m_2)^2}{8\pi^3R^3(D - d) \sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2R^2(D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534}} + \frac{(m_1 + m_2) \left(\sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2R^2(D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534} + a \right)}{8\pi R} \quad \text{Ec. 3.16}$$

- El coeficiente de sensibilidad debido al radio del anillo, *cm*

$$\frac{\partial \gamma}{\partial R} = \frac{(m_1 + m_2)g}{16\pi R \sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2 R^2 (D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534} \cdot \left(\frac{1.679r}{R^2} - \frac{4b(m_1 + m_2)g}{\pi^2 R^3 (D - d)} \right)}$$

Ec. 3.17

$$- \frac{(m_1 + m_2)g \left(\sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2 R^2 (D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534} + a \right)}{8\pi R^2}$$

- El coeficiente de sensibilidad debido al radio del alambre que conforma el anillo, *cm*

$$\frac{\partial \gamma}{\partial r} = - \frac{1.679g(m_1 + m_2)}{16\pi R^2 \sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2 R^2 (D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534}}$$

Ec. 3.18

- El coeficiente de sensibilidad debido al valor de densidad de la fase más densa, *g/cm³*

$$\frac{\partial \gamma}{\partial D} = - \frac{bg^2(m_1 + m_2)^2}{8\pi^3 R^3 (D - d)^2 \sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2 R^2 (D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534}}$$

Ec. 3.19

- El coeficiente de sensibilidad debido al valor de densidad de la fase menos densa, g/cm^3

$$\frac{\partial \gamma}{\partial d} = \frac{bg^2(m_1 + m_2)^2}{8\pi^3 R^3 (D - d)^2 \sqrt{\frac{2bg(m_1 + m_2)}{\pi^2 R^2 (D - d)} - \frac{1.679r}{R} + 0.04534}} \quad \text{Ec. 3.20}$$

La incertidumbre expandida asociada al error de indicación se calcula con Ec. 3.21, en donde el valor de k , usualmente es tomado como igual a 2, para obtener un nivel de confianza de aproximadamente igual al 95 % (con base en el teorema del límite central).

$$U(E) = k \cdot u(E) \quad \text{Ec. 3.21}$$

Donde:

$U(E)$ Representa la incertidumbre expandida del error de indicación

k Factor de cobertura

$u(E)$ Incertidumbre estándar del error

En la tabla 3.5 se representa la matriz donde se concentran los resultados de la evaluación de incertidumbre para cada una de las fuentes que se consideran para la estimación de incertidumbre de medición de la experimentación para cada uno de los niveles en sus interacciones de los diferentes factores.

Tabla 3.5 Tabla de presupuesto de incertidumbre.

	Fuente	Valor	Distribución	Incertidumbre estándar	Coficiente de Sensibilidad	Contribución
1	Masa	m		$u(m)$	$\frac{\partial \gamma}{\partial m}$	$\frac{\partial \gamma}{\partial m} u(m)$
2	Aceleración de la gravedad local	g		$u(g)$	$\frac{\partial \gamma}{\partial g}$	$\frac{\partial \gamma}{\partial g} u(g)$
3	Radio del anillo	R		$u(R)$	$\frac{\partial \gamma}{\partial R}$	$\frac{\partial \gamma}{\partial R} u(R)$
4	Radio del alambre que conforma el anillo	r		$u(r)$	$\frac{\partial \gamma}{\partial r}$	$\frac{\partial \gamma}{\partial r} u(r)$
5	Densidad de la fase más densa	D		$u(D)$	$\frac{\partial \gamma}{\partial D}$	$\frac{\partial \gamma}{\partial D} u(D)$
6	Densidad de la fase menos densa	d		$u(d)$	$\frac{\partial \gamma}{\partial d}$	$\frac{\partial \gamma}{\partial d} u(d)$
					Incertidumbre estándar combinada	$u(\gamma)$
					Factor de cobertura	
	Tensión Superficial	γ			Incertidumbre expandida, $U = k \times u(\gamma)$	$U(\gamma)$

El siguiente ejemplo muestra la estimación de incertidumbre de uno de los puntos de medición.

Datos iniciales de la medición de tensión superficial de pentadecano en 30 % de H.R., 15 °C, 61 kPa y 5 ciclos

Tabla 3.6 Indicaciones de masa para Pentadecano.

Indicación	Pulling the ring (g)	Pushing the ring (g)
1	0.354 16	0.353 98
2	0.354 08	0.353 90
3	0.354 01	0.353 81
4	0.353 95	0.353 76
5	0.353 92	0.353 73
Promedio	0.354 02	0.353 84

Para llevar a cabo la estimación de incertidumbre de las indicaciones de masa del instrumento consideramos las siguientes ecuaciones:

Desv. Est. Media Indicaciones de masa “pulling the ring” $u(m_1) = \frac{s_{m_1}}{\sqrt{n}}$ Ec. 3.22

Desv. Est. Media Indicaciones de masa “pushing the ring” $u(m_2) = \frac{s_{m_2}}{\sqrt{n}}$ Ec. 3.23

Resolución del instrumento $u(d) = \frac{d}{\sqrt{12}}$ Ec. 3.24

Certificado $u(I) = \frac{U_{certif}}{2}$ Ec. 3.25

Donde:

s_{m_1} Desviación estándar de la las indicaciones de masa en el modo pulling

s_{m_2} Desviación estándar de la las indicaciones de masa en el modo pushing

d Resolución del instrumento

U_{certif} Incertidumbre expandida del certificado

Tabla 3.7 Estimación de incertidumbre de indicación de masa.

	Pulling the ring		Pushing the ring	
	u	varianza	u	varianza
Desv. Est. Media	4.37E-05 g	1.91E-09	4.61E-05 g	2.13E-09
Resolución	2.89E-06 g	8.33E-12	2.89E-06 g	8.33E-12
Certificado	5.50E-05 g	3.03E-09	5.50E-05 g	3.03E-09
	uc. (m ₁)	7.03E-05 g	uc. (m ₂)	7.18E-05 g

Considerando las demás fuentes de incertidumbre para la estimación utilizamos información de los certificados que se tienen:

Incertidumbre estándar de la aceleración de la gravedad”

$$u(g) = \text{medicion}$$

Ec. 3.26

Incertidumbre estándar de la medición del radio del anillo en el Certificado

$$u(R) = \frac{U_{RCert}}{2}$$

Ec. 3.27

Incertidumbre estándar de la medición del radio del alambre del anillo en el Certificado

$$u(r) = \frac{U_{rCert}}{2}$$

Ec. 3.28

Por otro lado, la estimación de incertidumbre requiere de estimar la incertidumbre asociada a la densidad del líquido utilizado, ya que requiere ser corregido por los cambios de

temperatura y presión, por lo que se evaluó de la siguiente manera con las ecuaciones Ec. 3.29 a la Ec. 3.33:

$$\rho_{tx} = \frac{\rho_{tref}}{[1 + \alpha_{vol}(t_x - t_{ref})]} \quad \text{Ec. 3.29}$$

La combinación de incertidumbres de cada parámetro que influye en la ecuación de corrección por diferencia de temperatura se evalúa de la siguiente manera:

$$u_{\rho_{tx}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial \rho_{tref}} u_{\rho_{tref}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial \alpha_{vol}} u_{\alpha_{vol}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial t_x} u_{t_x}\right)^2} \quad \text{Ec. 3.30}$$

$$\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial \rho_{tref}} = \frac{1}{[1 + \alpha_{vol}(t_x - t_{ref})]} \quad \text{Ec. 3.31}$$

$$\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial \alpha_{vol}} = \frac{-\rho_{tref}(t_x - t_{ref})}{[1 + \alpha_{vol}(t_x - t_{ref})]^2} \quad \text{Ec. 3.32}$$

$$\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial t_x} = \frac{-\rho_{tref}\alpha_{vol}}{[1 + \alpha_{vol}(t_x - t_{ref})]^2} \quad \text{Ec. 3.33}$$

Donde:

ρ_{tx}	Densidad calculada a la temperatura x,
ρ_{tref}	Densidad a la temperatura de referencia,
α_{vol}	Coefficiente de expansión volumétrico del líquido de referencia
t_x	Temperatura a la que se quiere conocer la densidad
t_{ref}	Temperatura de referencia

Haciendo un análisis con los datos de entrada así como de los coeficientes de sensibilidad de cada uno de los parámetros obtenemos los resultados mostrados en la Tabla 3.8

Tabla 3.8 Estimación de incertidumbre de corrección de densidad por temperatura.

Incertidumbre de Corrección de Densidad por temperatura				
		<i>u</i>	contribución	varianza
$\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial \rho_{tref}} =$	1.000 005 6	0.01E-03	1.00E-05	1.00E-10
$\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial \alpha_{vol}} =$	0.007 720 7	2.81E-05	2.17E-07	4.71E-14
$\frac{\partial \rho_{tx}}{\partial t_x} =$	-0.000 434 2	1.20E-02	-5.21E-06	2.71E-11
			uc (por corrección TEMPERATURA)	1.13E-05 g/cm ³

De la misma manera se realiza una corrección por la diferencia de presiones a las que se tienen de referencia y a las que se realizaron las mediciones y se encuentra con la ecuación Ec. 3.34

$$\rho_{px} = \frac{\rho_{pref}}{\left[1 - \frac{(p_x - p_{ref})}{\beta} \right]} \quad \text{Ec. 3.34}$$

De la misma manera, se evalúan los coeficientes de sensibilidad para combinar las incertidumbres estándar de cada uno de los elementos que influyen en esta corrección por diferencia de presión con la Ec. 3.35

$$u_{\rho_{px}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{px}}{\partial \rho_{pref}} u_{\rho_{pref}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{px}}{\partial \beta} u_{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{px}}{\partial p_x} u_{p_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_{px}}{\partial p_{ref}} u_{p_{ref}} \right)^2} \quad \text{Ec. 3.35}$$

$$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial \rho_{pref}} = \frac{\beta}{\beta - p_x + p_{ref}} \quad \text{Ec. 3.36}$$

$$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial \beta} = \frac{\rho_{pref}(p_{ref} - p_x)}{(\beta - p_x + p_{ref})^2} \quad \text{Ec. 3.37}$$

$$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial p_x} = \frac{\beta \rho_{pref}}{(\beta - p_x + p_{ref})^2} \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial p_{ref}} = \frac{-\beta \rho_{pref}}{(\beta - p_x + p_{ref})^2} \quad \text{Ec. 3.39}$$

Donde:

ρ_{px}	Densidad calculada a la presión x,
ρ_{pref}	Densidad a la presión de referencia,
β	Módulo de compresibilidad del líquido de referencia
p_x	Presión a la que se quiere conocer la densidad
p_{ref}	Presión de referencia

Los resultados de la estimación de incertidumbre por corrección de densidad por diferencia de presión entre la referencia y al momento de hacer las mediciones se muestran en la Tabla 3.9

Tabla 3.9 Estimación de incertidumbre de densidad por presión.

Incertidumbre de Corrección de Densidad por Presión				
		u	contribución	varianza
$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial \rho_{pref}} =$	0.999 990 7	1.13E-05	1.13E-05	1.27E-10
$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial \beta} =$	3.33E-15	107 758 620.7	3.59E-07	1.29E-13
$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial p_x} =$	3.58E-10	6.5	2.33E-09	5.42E-18
$\frac{\partial \rho_{px}}{\partial p_{ref}} =$	-3.58E-10	6.5	-2.33E-09	5.42E-18
			uc (por corrección PRESIÓN)	0.11E-04 g/cm ³

Finalmente, otro parámetro que está presente en la medición de tensión superficial de líquidos en interface con aire, es la densidad del mismo. Para calcular esta densidad se utilizó la expresión de la Ec. 3.40, y para estimar la incertidumbre asociada a este cálculo se utilizan las ecuaciones desde la Ec. 3.41 a la 3.44.

$$\rho_a = \frac{0.348444p_a - h_r(0.00252t_a - 0.020582)}{273.15 + t_a} \quad \text{Ec. 3.40}$$

$$u_{\rho_a} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t_a} u_{t_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} u_{h_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} u_{p_a}\right)^2} \quad \text{Ec. 3.41}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t_a} = \frac{(273.15 + t)(-h_r 0.00252) - 0.348444p_a + h_r(0.00252t_a - 0.020582)}{(273.15 + t_a)^2} \quad \text{Ec. 3.42}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = \frac{-0.00252t_a + 0.020582}{273.15 + t_a} \quad \text{Ec. 3.43}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} = \frac{0.348444}{273.15 + t_a} \quad \text{Ec. 3.44}$$

Donde:

- ρ_a Densidad del aire,
 h_r Humedad relativa en el aire,
 t_a Temperatura del aire,
 p_a Presión atmosférica

El resultado de la estimación de incertidumbre del cálculo de densidad del aire se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 3.10 Estimación de incertidumbre de densidad del aire.

Incertidumbre de densidad del aire				
		<i>u</i>	contribución	varianza
$\frac{\partial \rho_a}{\partial t_a} =$	-2.737 376E-03	0.1	-0.000273738	7.4932E-08
$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} =$	-9.97E-05	0.3	-2.98955E-05	8.9374E-10
$\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} =$	0.001189635	0.065	7.73263E-05	5.9793E-09
			u_c (Densidad del aire)	2.86E-04 g/cm³

Una vez evaluado la incertidumbre de cada uno de los parámetros que influyen en la medición de tensión superficial tenemos como resultado la Tabla 3.11 donde se combinan todas estas incertidumbres para evaluar la estimación para el valor de tensión superficial medido en el nivel de cada parámetro en específico.

Tabla 3.10 Indicaciones de masa para Pentadecano.

	Fuente	Valor	Distribución	Incertidumbre estándar	Coficiente de Sensibilidad	Contribución
1	Masa 1	0.354 02 g	Normal	7.03E-05	55.903 942	0.003 929 0
2	Masa 2	0.353 84 g	Normal	7.18E-05	55.903 942	0.004 015 5
3	Aceleración de la gravedad local	978.130 9 cm/s ²	Rectangular	5.00E-06	0.040 457	0.000 000 7
4	Radio del anillo	0.954 525 cm	Rectangular	0.02E-02	-46.559 556	-0.004 656 0
5	Radio del alambre que conforma el anillo	0.018 5 cm	Rectangular	1.00E-03	-57.633 687	-0.028 816 8
6	Densidad de la fase más densa	0.772 056 g/cm ³	Rectangular	0.11E-04	-7.696 173	0.000 086 8
7	Densidad de la fase menos densa	0.000 722 g/cm ³	Rectangular	2.86E-04	7.696 173	0.002 201 2
					Incertidumbre estándar combinada	0.03 mN/m
					Factor de cobertura (k)	2
					Nivel de Confianza	95.45 %
	Tensión Superficial	25.804 mN/m			Incertidumbre expandida, $U = k \times u(\gamma)$	± 0.06 mN/m

CAPÍTULO IV

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1 Resultados de la medición tensión superficial de Agua tipo 1 en los diferentes niveles de los diferentes factores.

La tabla 4.1 contiene los resultados experimentales de tensión superficial de la llamada Agua tipo 1 en el Centro Nacional de Metrología, junto con la estimación de incertidumbre de cada punto de medición.

Tabla 4.1 Resultados experimentales de tensión superficial de Agua tipo 1 (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	71.522	71.493	71.511	71.294	71.347	71.195	71.085	71.114	70.836
	<i>U (K=2)</i>	± 0.19	± 0.23	± 0.25	± 0.16	± 0.18	± 0.16	± 0.23	± 0.21	± 0.24
	10 Ciclos	71.518	71.479	71.507	71.290	71.289	71.191	71.115	71.091	70.785
	<i>U (K=2)</i>	± 0.14	± 0.16	± 0.17	± 0.14	± 0.14	± 0.13	± 0.15	± 0.13	± 0.16
	15 Ciclos	71.519	71.471	71.485	71.279	71.315	71.132	71.079	71.057	70.850
	<i>U (K=2)</i>	± 0.19	± 0.19	± 0.23	± 0.15	± 0.17	± 0.16	± 0.21	± 0.20	± 0.23
20 °C	5 Ciclos	71.098	71.048	71.074	70.831	70.756	70.677	70.546	70.472	70.287
	<i>U (K=2)</i>	± 0.19	± 0.19	± 0.23	± 0.15	± 0.17	± 0.16	± 0.21	± 0.20	± 0.23
	10 Ciclos	71.132	71.035	71.051	70.830	70.690	70.712	70.548	70.444	70.318
	<i>U (K=2)</i>	± 0.14	± 0.14	± 0.16	± 0.13	± 0.13	± 0.13	± 0.15	± 0.14	± 0.16
	15 Ciclos	71.121	70.986	71.069	70.864	70.750	70.733	70.536	70.439	70.230
	<i>U (K=2)</i>	± 0.14	± 0.14	± 0.14	± 0.14	± 0.12	± 0.13	± 0.13	± 0.13	± 0.14
25 °C	5 Ciclos	70.715	70.499	70.616	70.381	70.224	70.205	70.050	69.875	69.719
	<i>U (K=2)</i>	± 0.16	± 0.16	± 0.22	± 0.16	± 0.18	± 0.16	± 0.20	± 0.22	± 0.23
	10 Ciclos	70.698	70.496	70.574	70.385	70.235	70.205	70.018	69.900	69.687
	<i>U (K=2)</i>	± 0.13	± 0.13	± 0.15	± 0.14	± 0.14	± 0.15	± 0.15	± 0.16	± 0.16
	15 Ciclos	70.685	70.55	70.560	70.394	70.192	70.152	70.069	69.913	69.685
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.13	± 0.14	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.13	± 0.14	± 0.14

En lo sucesivo del presente documento se presentaran los resultados de los tres diferentes líquidos como en la Tabla 4.1 donde se observará de manera vertical tres diferentes niveles de humedad relativa, y a su vez, dentro de cada uno de estos, tres diferentes niveles de presión que fueron evaluados. También en esta tabla se muestra de forma horizontal los tres diferentes niveles de temperatura en que se midió la tensión superficial para los tres líquidos, y en cada uno de estos niveles también se evaluó de manera adicional, el número de ciclos con que el instrumento es capaz de medir la tensión superficial. Cabe mencionar que debajo de cada uno de los resultados de la medición, que representa por lo menos diez mediciones de cada uno de los puntos, se encuentra la estimación de incertidumbre con la que se midió la tensión superficial.

A continuación se muestran en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 los resultados experimentales de la tensión superficial del agua en 61 kPa, 81 kPa y 101 kPa respectivamente.

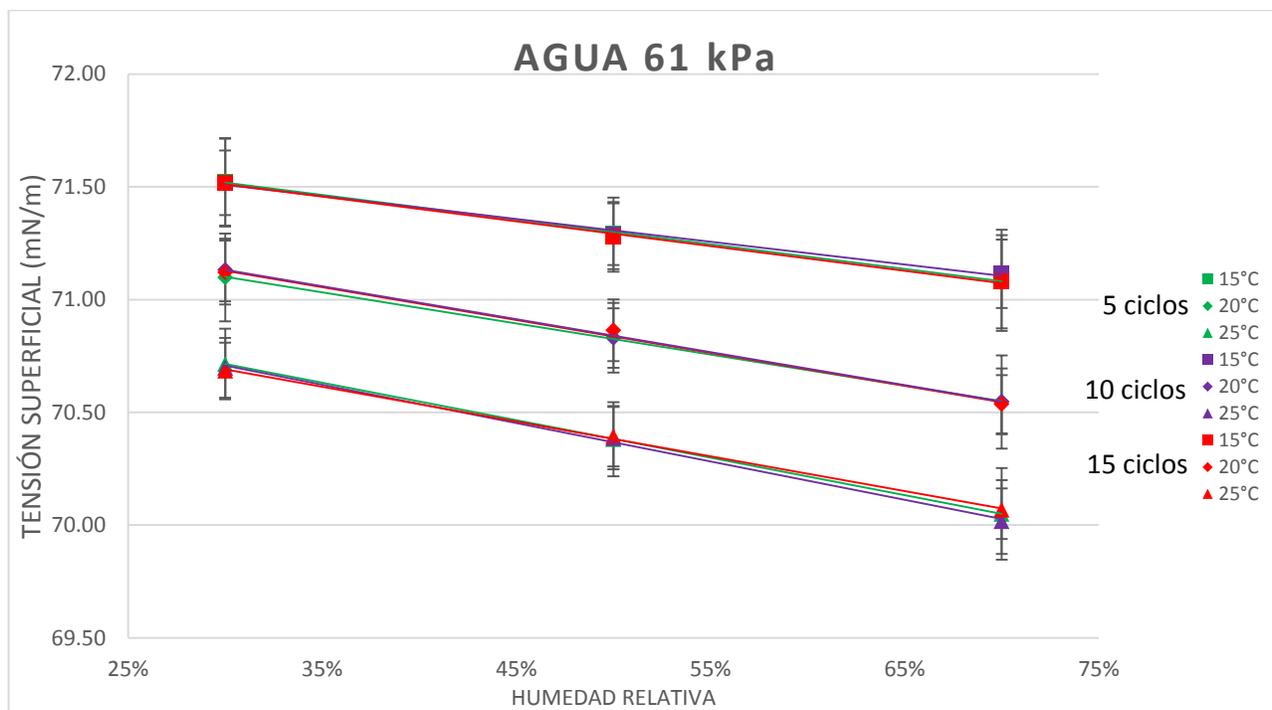


Figura 4.38 Tensión superficial de agua a 61 kPa (para 15 °C, 20 °C y 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)

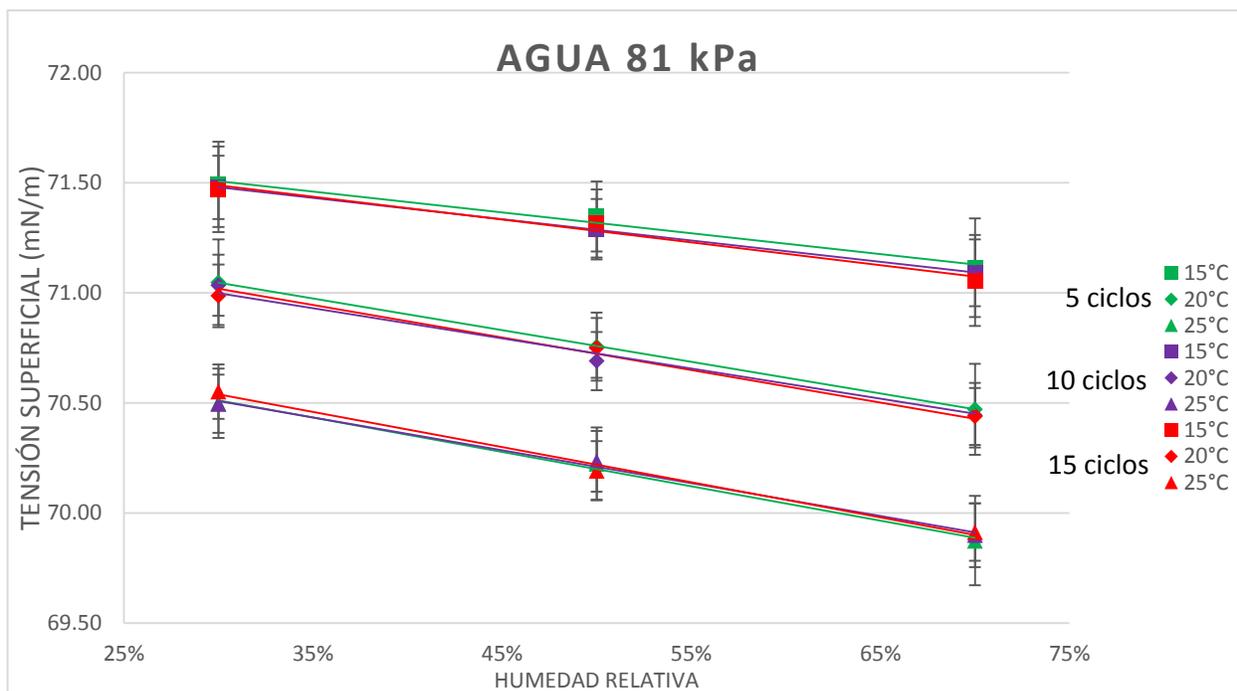


Figura 4.39 Tensión superficial de agua a 81 kPa (para 15 °C, 20 °C y 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)

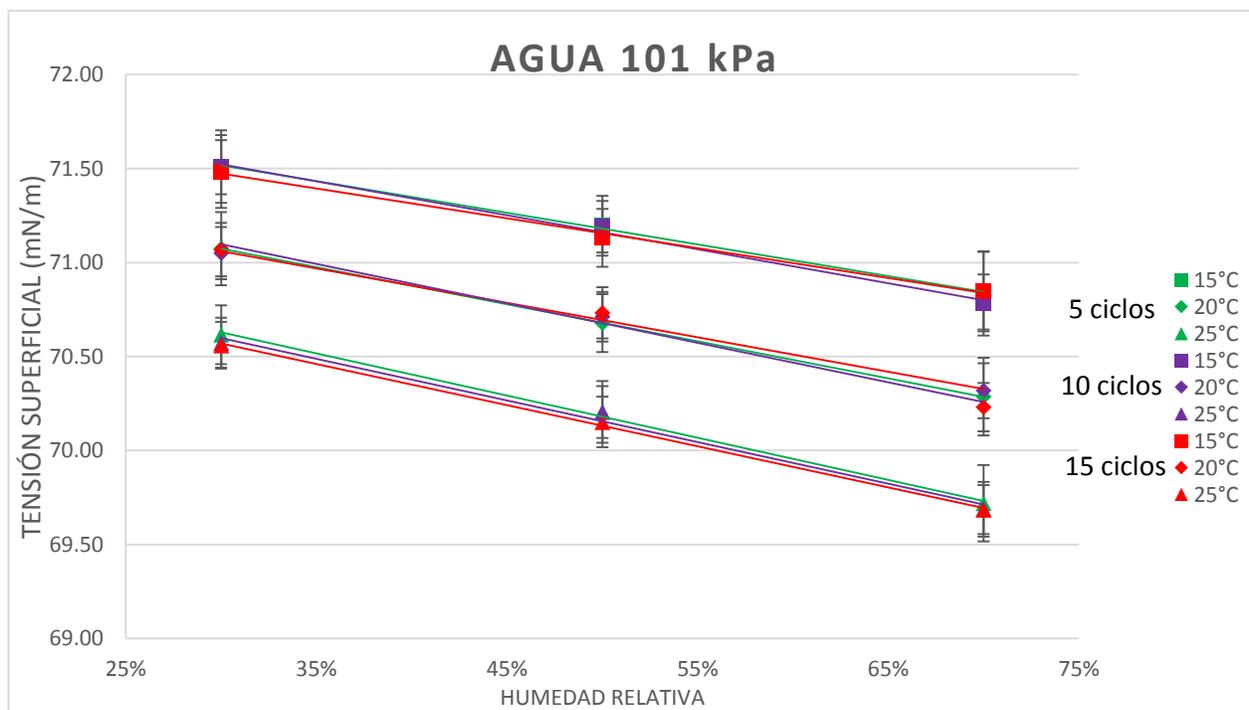


Figura 4.40 Tensión superficial de agua a 101 kPa (para 15 °C, 20 °C y 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)

Como se puede observar en estas primeras graficas del comportamiento de la tensión superficial del agua, existe una tendencia descendente a medida que la humedad se incrementa como se encontró en la literatura. Además se encontró que al incrementar la temperatura, la tensión superficial decrecía.

4.1.1 Resultados experimentales de tensión superficial del agua quitando el primer valor obtenido.

En la serie de resultados obtenidos experimentalmente se observó que al inicio de cada serie se obtienen valores diferentes a los que se presentan una vez que se van estabilizando los valores subsecuentes, por ello se evaluó la opción de quitar el primer valor obtenido resultando lo que se presenta en la Tabla 4.2.

Derivado de la eliminación del primer valor de la serie de resultados que se obtuvieron se observó que para este líquido la incertidumbre relativa paso de 0.23 % al 0.17 %. Como ejemplo de esto, las indicaciones de masa para este fluido tuvieron el comportamiento que se muestra en la Figura 4.4, por esta razón se determinó evaluar cuál sería el resultado en la estimación de incertidumbre si se eliminara la primera indicación de masa.

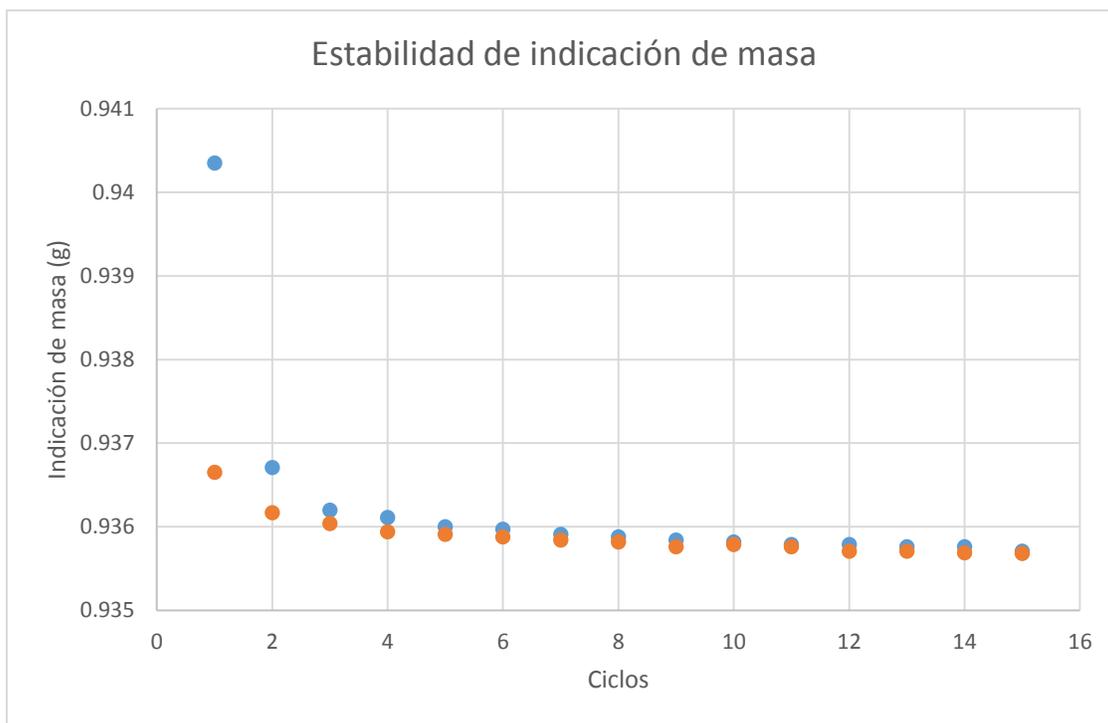


Figura 4.41 Ejemplo de indicación de masa para cada una de las indicaciones de tensión superficial en un número de ciclos igual a 15.

Tabla 4.2 Resultados experimentales de tensión superficial de Agua sin considerar el primer valor (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	71.468	71.448	71.434	71.261	71.307	71.162	71.016	71.059	70.764
	<i>U (K=2)</i>	± 0.13	± 0.18	± 0.14	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.13	± 0.13	± 0.13
	10 Ciclos	71.488	71.454	71.467	71.273	71.268	71.174	71.080	71.091	70.747
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.14	± 0.13	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.13
	15 Ciclos	71.499	71.455	71.458	71.267	71.301	71.120	71.055	71.038	70.825
	<i>U (K=2)</i>	± 0.14	± 0.14	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.13
20 °C	5 Ciclos	71.048	71.003	71.005	70.799	70.716	70.644	70.485	70.421	70.216
	<i>U (K=2)</i>	± 0.14	± 0.14	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.13
	10 Ciclos	71.108	71.012	71.013	70.813	70.669	70.695	70.516	70.429	70.281
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.12
	15 Ciclos	71.102	70.970	71.044	70.853	70.736	70.721	70.515	70.421	70.206
	<i>U (K=2)</i>	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12
25 °C	5 Ciclos	70.678	70.462	70.552	70.351	70.182	70.166	69.990	69.809	69.649
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.12	± 0.14	± 0.14	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.13
	10 Ciclos	70.676	70.475	70.541	70.369	70.214	70.183	69.987	69.866	69.651
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.13	± 0.14	± 0.12	± 0.13	± 0.12
	15 Ciclos	70.672	70.538	70.537	70.383	70.177	70.137	70.048	69.890	69.661
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12

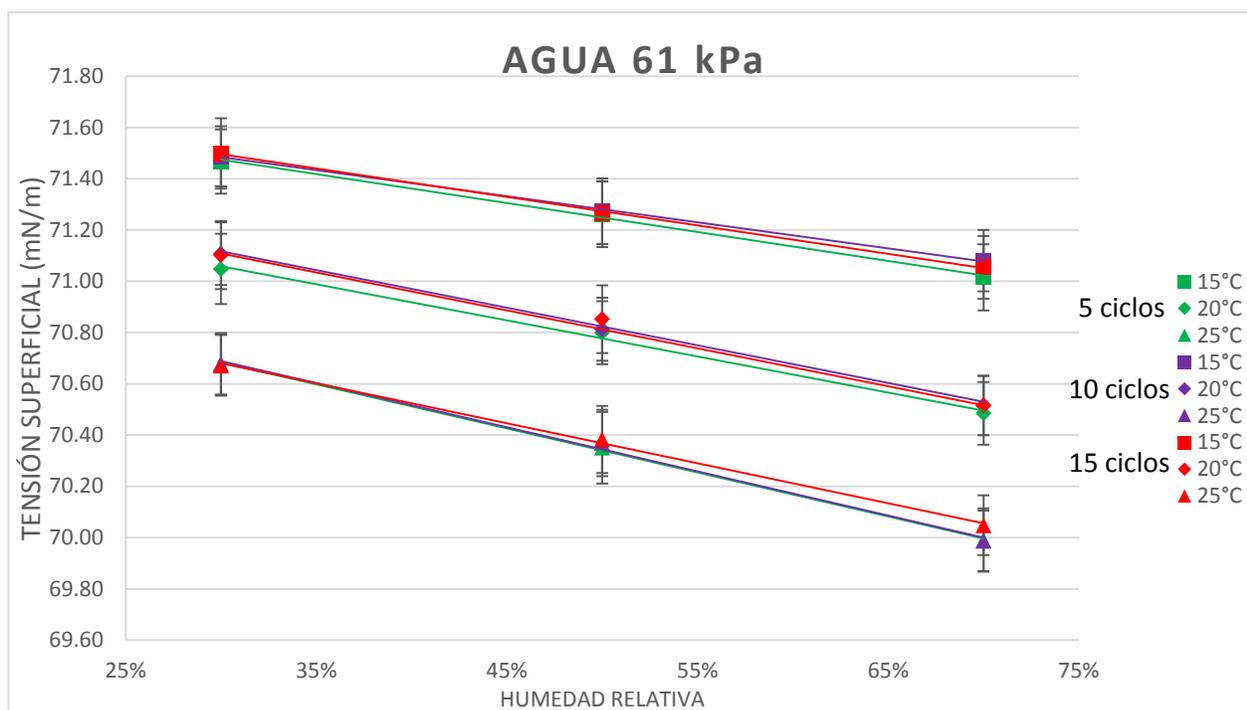


Figura 4.42 Tensión superficial de agua a 61 kPa (quitando el primer resultado de la serie)

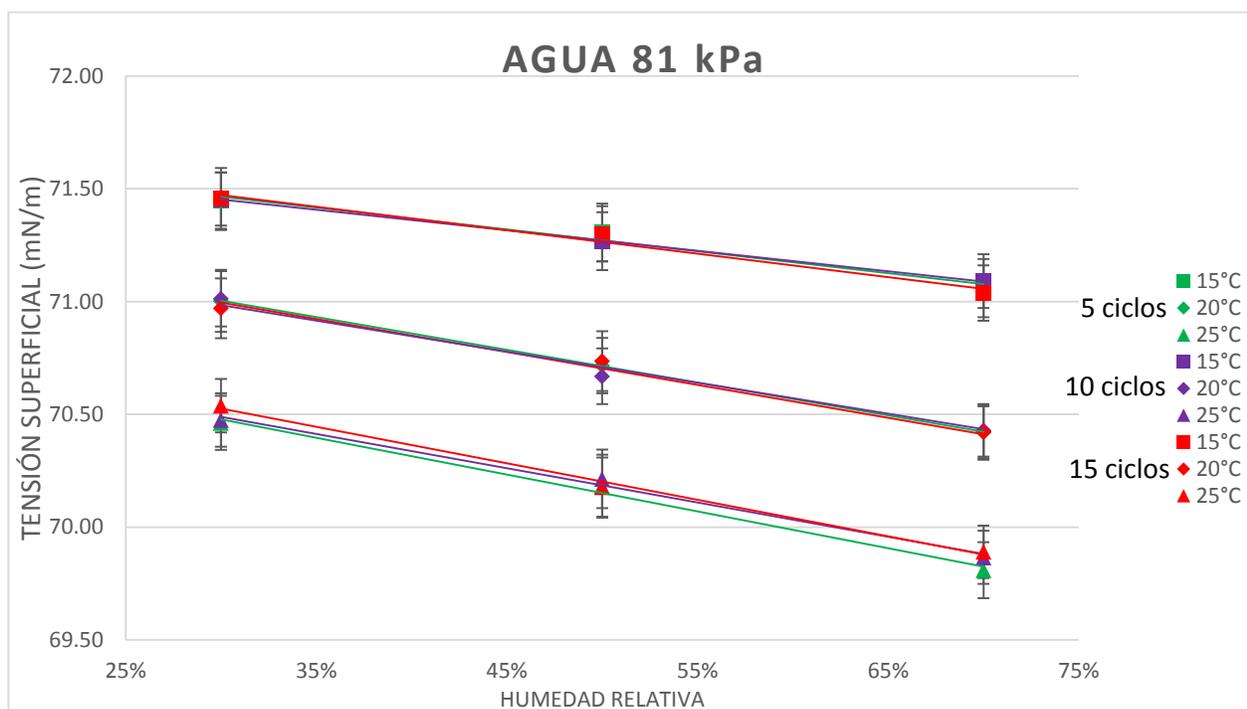


Figura 4.43 Tensión superficial de agua a 81 kPa (quitando el primer resultado de la serie)

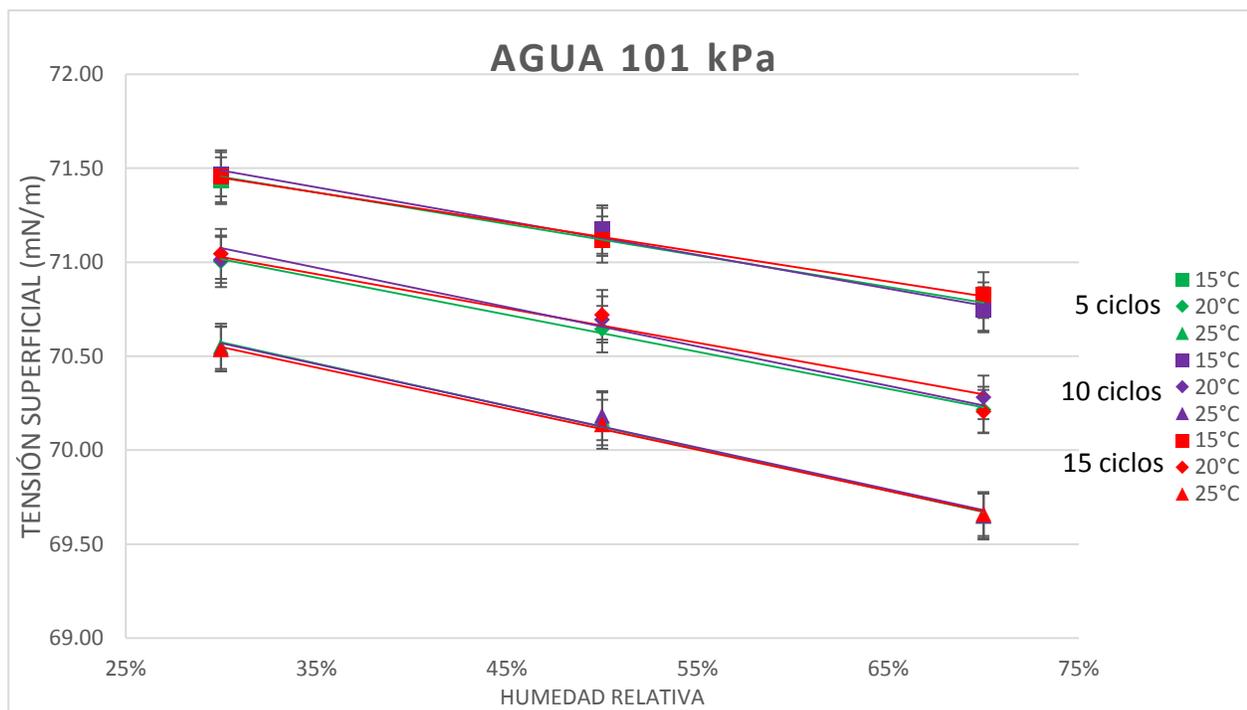


Figura 4.44 Tensión superficial de agua a 101 kPa (quitando el primer resultado de la serie)

Como se puede observar en la matriz de resultados de la Tabla 4.1 y 4.2 se observa una ligera disminución en la incertidumbre estimada eliminando el primer resultado de la serie. Por esta razón se evaluó la opción de eliminar los dos primeros resultados de la serie y en términos simples se encontró que la reducción de incertidumbre al analizar los resultados mayormente estables fue de 0.23 % de incertidumbre relativa con todos los resultados de cada grupo de ciclos, a 0.17 % de incertidumbre relativa quitando el primer resultado de la serie, y a un 0.17 % quitando los dos primeros resultados. Por lo que se puede observar que una vez encontrando estabilidad el sistema de medición, la incertidumbre de los resultados se estabiliza también.

4.1.2 Resultados experimentales de tensión superficial del agua quitando los dos primeros valores obtenidos

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados experimentales obtenidos eliminando los dos primeros resultados observándose que se obtuvo una mejor estabilidad después del tercer dato registrado, disminuyendo así el valor de incertidumbre estimado.

Tabla 4.3 Resultados experimentales de tensión superficial de Agua sin considerar los dos primeros valores de la serie (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	71.453	71.438	71.413	71.256	71.298	71.155	70.997	71.050	70.746
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.18	± 0.13	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.12
	10 Ciclos	71.480	71.449	71.456	71.271	71.263	71.170	71.072	71.091	70.739
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.14	± 0.12	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.12
	15 Ciclos	71.494	71.451	71.451	71.265	71.297	71.117	71.049	71.035	70.820
	<i>U (K=2)</i>	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.11	± 0.12	± 0.12
20 °C	5 Ciclos	71.035	70.994	70.985	70.794	70.709	70.637	70.470	70.413	70.198
	<i>U (K=2)</i>	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.11	± 0.12	± 0.12
	10 Ciclos	71.102	71.007	71.002	70.810	70.664	70.691	70.508	70.426	70.272
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.11	± 0.13	± 0.12
	15 Ciclos	71.097	70.967	71.038	70.851	70.733	70.718	70.511	70.419	70.200
	<i>U (K=2)</i>	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.11	± 0.12	± 0.12
25 °C	5 Ciclos	70.669	70.453	70.535	70.345	70.172	70.157	69.976	69.794	69.631
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.14	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12
	10 Ciclos	70.670	70.470	70.532	70.366	70.209	70.178	69.980	69.859	69.643
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.13	± 0.14	± 0.12	± 0.13	± 0.12
	15 Ciclos	70.668	70.535	70.531	70.381	70.174	70.134	70.043	69.886	69.655
	<i>U (K=2)</i>	± 0.12	± 0.12	± 0.13	± 0.13	± 0.13	± 0.12	± 0.12	± 0.12	± 0.12

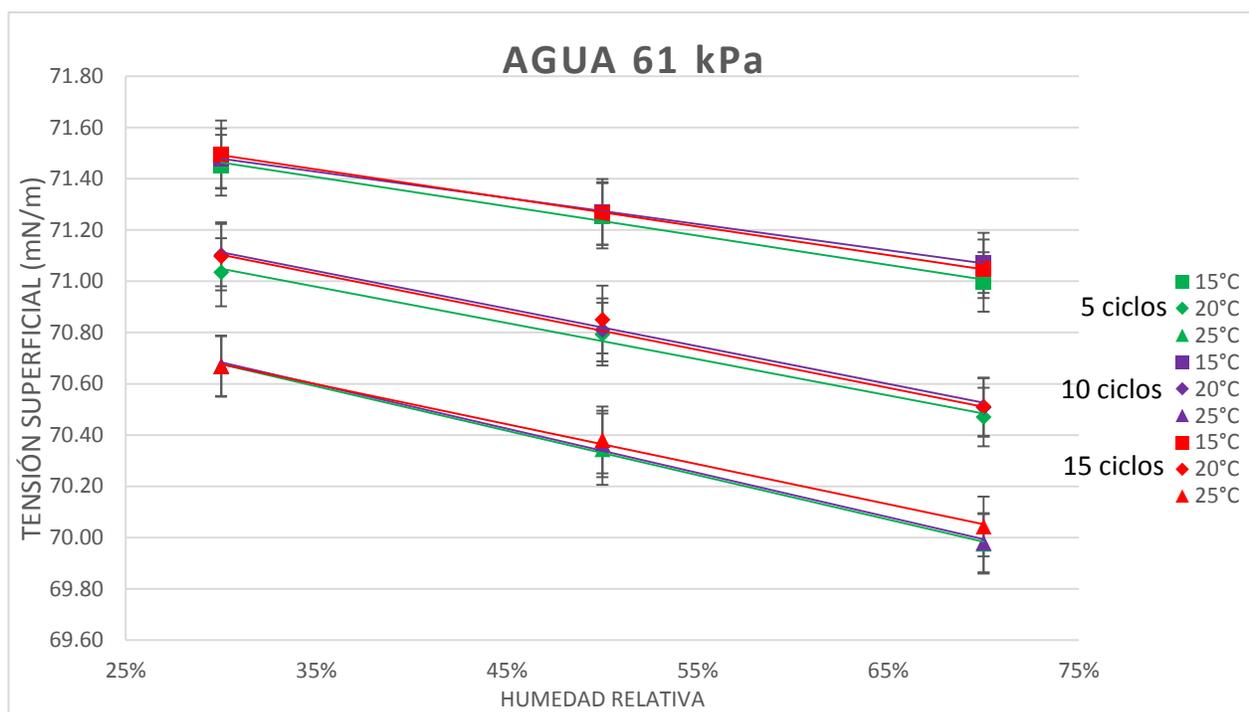


Figura 4.45 Tensión superficial de agua a 61 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)

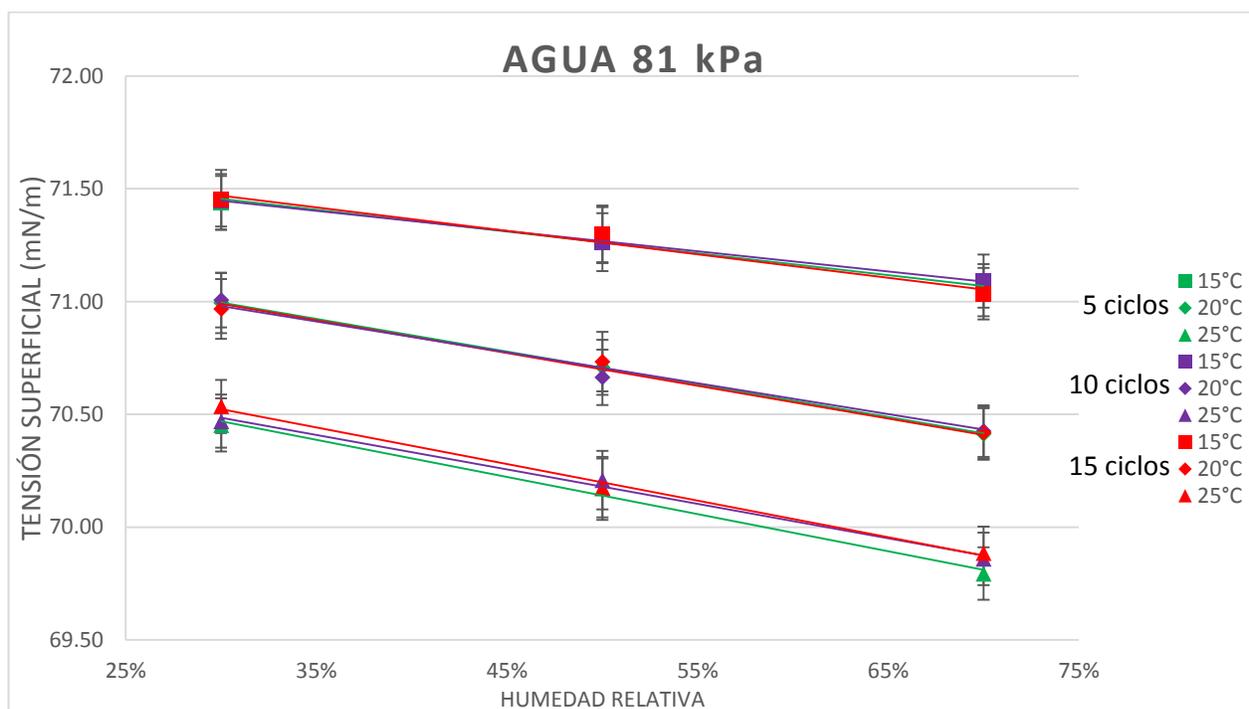


Figura 4.46 Tensión superficial de agua a 81 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)

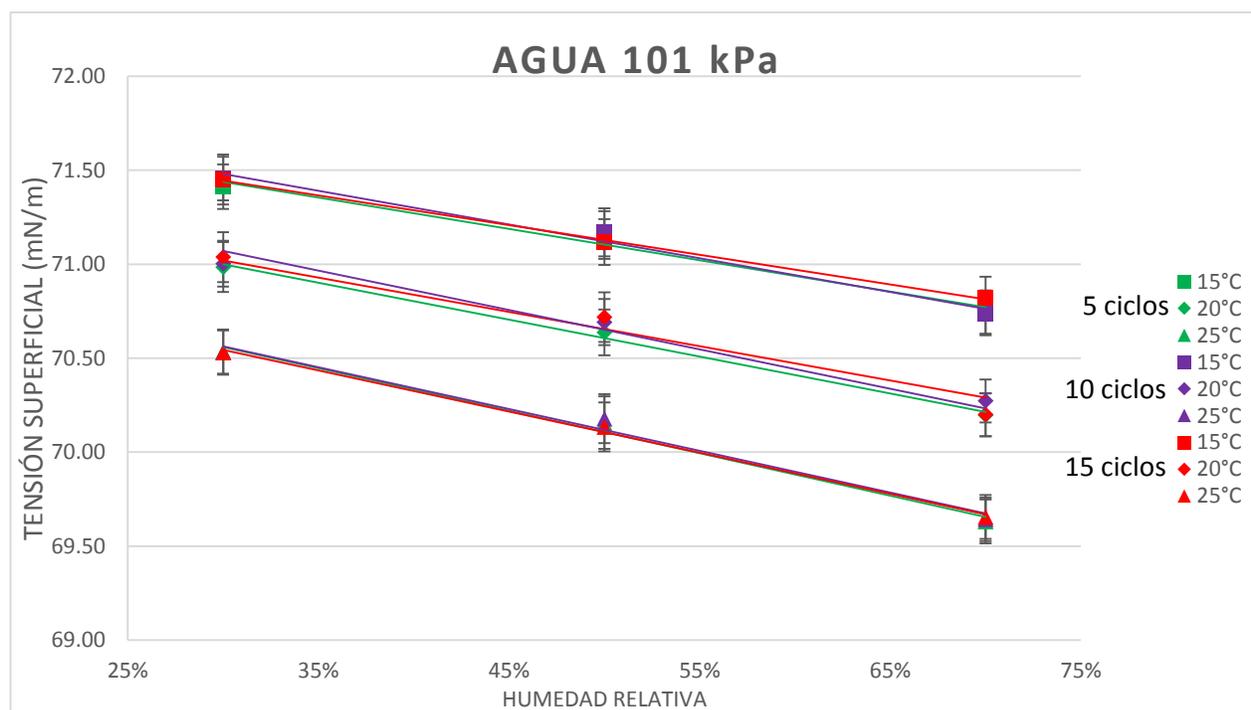


Figura 4.47 Tensión superficial de agua a 101 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)

Existe una ligera variación en los resultados como se puede ver en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 debido a que el primer resultado de la serie de mediciones siempre era grande comparado con los subsecuentes, por esta razón se tomó la decisión de evaluar quitar primeramente el primer valor de la serie y posteriormente el primero y segundo de las mismas series para observar el comportamiento, encontrando una mejor estabilidad del sistema después de la tercera medición de cada uno de los ciclos mostrados.

4.1.3 Análisis de Varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de tensión superficial de Agua (mN/m)

Se realizó el análisis de varianza de los resultados obtenidos con el objetivo de demostrar cuales de los factores influyen en mayor medida y los efectos que tienen éstos en los resultados de tensión superficial de agua, además de las interacciones de dichos factores.

Primeramente se realiza la sumatoria de los resultados de cada uno de los factores, tanto horizontal como verticalmente, esto representa que las sumatorias deben de ser realizadas para temperatura y presión para cada uno de los niveles de humedad relativa como se muestra en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6

Tabla 4.4 Suma de resultados de agua en 30% H.R.

30 % H.R.				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	71.522	71.493	71.511	
	71.518	71.479	71.507	
	71.519	71.471	71.485	
	214.56	214.44	214.50	643.50
20°C	71.098	71.048	71.074	
	71.132	71.035	71.051	
	71.121	70.986	71.069	
	213.35	213.07	213.19	639.61
25°C	70.715	70.499	70.616	
	70.698	70.496	70.574	
	70.685	70.552	70.560	
	212.10	211.55	211.75	635.39
TOTAL	640.01	639.06	639.45	1918.51

Tabla 4.5 Suma de resultados de agua en 50% H.R.

50 % H.R.				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	71.294	71.347	71.195	
	71.290	71.289	71.191	
	71.279	71.315	71.132	
	213.86	213.95	213.52	641.33
20°C	70.831	70.756	70.677	
	70.830	70.690	70.712	
	70.864	70.750	70.733	
	212.53	212.20	212.12	636.84
25°C	70.381	70.224	70.205	
	70.385	70.235	70.205	
	70.394	70.192	70.152	
	211.16	210.65	210.56	632.37
TOTAL	637.55	636.80	636.20	1910.55

Tabla 4.6 Suma de resultados de agua en 70% H.R.

70 % H.R.				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	71.085	71.114	70.836	
	71.115	71.091	70.785	
	71.079	71.057	70.850	
	213.28	213.26	212.47	639.01
20°C	70.546	70.472	70.287	
	70.548	70.444	70.318	
	70.536	70.439	70.230	
	211.63	211.36	210.84	633.82
25°C	70.050	69.875	69.719	
	70.018	69.900	69.687	
	70.069	69.913	69.685	
	210.14	209.69	209.09	628.92
TOTAL	635.05	634.30	632.40	1901.75

Para evaluar las interacciones por pares de factores se realizó la suma de forma horizontal y vertical de los resultados en las interacciones de temperatura-presión, temperatura-humedad y presión-humedad como se muestra en las tablas 4.7, 4.8, y 4.9.

Posteriormente utilizando las ecuaciones Ec. 4.1 a la Ec. 4.9 se evaluó el efecto de cada factor en sus diferentes niveles, sus interacciones por pares y por último la interacción de estos mismos tres factores.

Tabla 4.7 Suma de resultados de agua en interacción temperatura-presión.

		PRESIÓN			
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
TEMPERATURA	15°C	71.522	71.493	71.511	
		71.518	71.479	71.507	
		71.519	71.471	71.485	
		71.294	71.347	71.195	
		71.290	71.289	71.191	
		71.279	71.315	71.132	
		71.085	71.114	70.836	
		71.115	71.091	70.785	
		71.079	71.057	70.850	
		641.70	641.66	640.49	1923.85
	20°C	71.098	71.048	71.074	
		71.132	71.035	71.051	
		71.121	70.986	71.069	
		70.831	70.756	70.677	
		70.830	70.690	70.712	
		70.864	70.750	70.733	
		70.546	70.472	70.287	
		70.548	70.444	70.318	
		70.536	70.439	70.230	
		637.51	636.62	636.15	1910.28
	25°C	70.715	70.499	70.616	
		70.698	70.496	70.574	
		70.685	70.552	70.560	
		70.381	70.224	70.205	
		70.385	70.235	70.205	
		70.394	70.192	70.152	
		70.050	69.875	69.719	
70.018		69.900	69.687		
70.069		69.913	69.685		
	633.39	631.88	631.40	1896.68	
TOTAL	1912.60	1910.16	1908.05	5730.81	

Tabla 4.9 Suma de resultados de agua en interacción humedad-presión.

		PRESIÓN			
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
30 %	HUMEDAD	71.522	71.493	71.511	
		71.518	71.479	71.507	
		71.519	71.471	71.485	
		71.098	71.048	71.074	
		71.132	71.035	71.051	
		71.121	70.986	71.069	
		70.715	70.499	70.616	
		70.698	70.496	70.574	
		70.685	70.552	70.560	
		640.01	639.06	639.45	1918.51
		71.294	71.347	71.195	
		71.290	71.289	71.191	
50 %	HUMEDAD	71.279	71.315	71.132	
		70.831	70.756	70.677	
		70.830	70.690	70.712	
		70.864	70.750	70.733	
		70.381	70.224	70.205	
		70.385	70.235	70.205	
		70.394	70.192	70.152	
		637.55	636.80	636.20	1910.55
70 %	HUMEDAD	71.085	71.114	70.836	
		71.115	71.091	70.785	
		71.079	71.057	70.850	
		70.546	70.472	70.287	
		70.548	70.444	70.318	
		70.536	70.439	70.230	
		70.050	69.875	69.719	
		70.018	69.900	69.687	
70.069	69.913	69.685			
635.05	634.30	632.40	1901.75		
TOTAL	1912.60	1910.16	1908.05	5730.81	

$$SST = \sum_{i,j,k} y_{i,j,k}^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$SSA = \frac{(\sum_i y_i^2)}{bcn} - \frac{y^2}{abcn} \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$SSB = \frac{(\sum_j y_j^2)}{acn} - \frac{y \dots^2}{abcn} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$SSC = \frac{(\sum_k y_k^2)}{abn} - \frac{y \dots^2}{abcn} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$SS(AB) = \frac{(\sum_{ij} y_{ij}^2)}{cn} - \frac{y \dots^2}{abcn} - SSA - SSB \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$SS(AC) = \frac{(\sum_{ik} y_{ik}^2)}{bn} - \frac{y \dots^2}{abcn} - SSA - SSC \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$SS(BC) = \frac{(\sum_{jk} y_{jk}^2)}{an} - \frac{y \dots^2}{abcn} - SSB - SSC \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$SS(ABC) = \frac{\sum_{i,j,k} y_{i,j,k}^2}{n} - \frac{y \dots^2}{abcn} - SSA - SSB - SSC - SS(AB) - SS(AC) - SS(BC) \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$SS(Error) = SST - SSA - SSB - SSC - SS(AB) - SS(AC) - SS(BC) - SS(ABC) \quad \text{Ec. 4.9}$$

En la tabla 4.10 se muestran los resultados del análisis de varianza de los valores experimentales de la tensión superficial del agua, donde de acuerdo a la suma de cuadrados de los efectos principales se observa que la temperatura tiene un efecto mayor que los otros

dos factores. Otra observación es que la variabilidad de los efectos principales es prácticamente cero lo que indica que mientras que se mantenga una estabilidad en cualquiera de estas variables podremos tener resultados consistentes en la tensión superficial.

Tabla 4.10 ANOVA de tensión superficial de agua.

FUENTE VARIACIÓN	DE	SUMA CUADRADOS	DE GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	f CALCULADA	Valor -P
EFFECTOS PRINCIPALES						
Temperatura		13.667	2	6.833	11445.380	1.087E-71
Presión		0.385	2	0.192	322.157	9.666E-31
Humedad		5.209	2	2.604	4362.132	2.007E-60
INTERACC. DE 2 FACTORES						
Temp.-Presión		0.065	4	0.016	27.044	7.287E-09
Temp.-Humedad		0.114	4	0.029	47.754	1.145E-12
Presión-Humedad		0.181	4	0.045	75.937	2.030E-16
INTERCC. DE 3 FACTORES						
Temp.-Pres.-Hum.		0.005	8	0.001	1.134	3.294E-01
ERROR		0.032	54	0.001		
TOTAL		13.667	80			

4.2 Resultados de la medición tensión superficial de Pentadecano en los diferentes niveles de los diferentes factores.

Así mismo como en la tabla de resultados de tensión superficial del agua, en la siguiente Tabla 4.11 se muestran los resultados obtenidos en la medición experimental para el pentadecano, con el valor estimado de incertidumbre de cada resultado para cada nivel de los diferentes factores evaluados.

Tabla 4.11 Resultados experimentales de tensión superficial de Pentadecano (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	25.804	25.818	25.798	25.792	25.851	25.822	25.803	25.837	25.802
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.804	25.820	25.795	25.792	25.849	25.806	25.804	25.837	25.802
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.790	25.818	25.821	25.776	25.831	25.811	25.796	25.832	25.828
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.08	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06
20 °C	5 Ciclos	25.522	25.529	25.528	25.538	25.547	25.506	25.524	25.540	25.549
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.08	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.512	25.527	25.528	25.519	25.560	25.511	25.528	25.540	25.549
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.523	25.520	25.502	25.509	25.552	25.513	25.523	25.536	25.526
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.07	± 0.06
25 °C	5 Ciclos	25.245	25.245	25.240	25.229	25.257	25.252	25.258	25.256	25.246
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.227	25.245	25.240	25.234	25.247	25.254	25.254	25.251	25.246
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.227	25.250	25.263	25.242	25.241	25.250	25.243	25.241	25.265
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.07	± 0.06

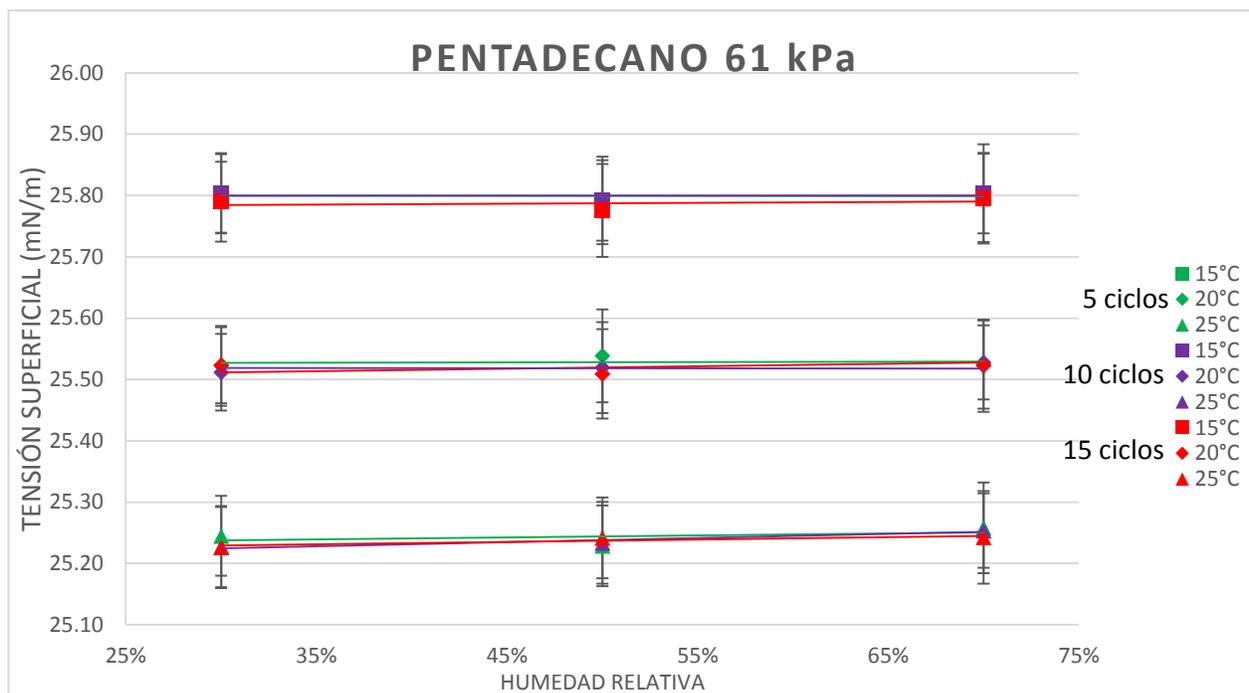


Figura 4.48 Tensión superficial de pentadecano 61 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50% H.R. y 70 % H.R.)

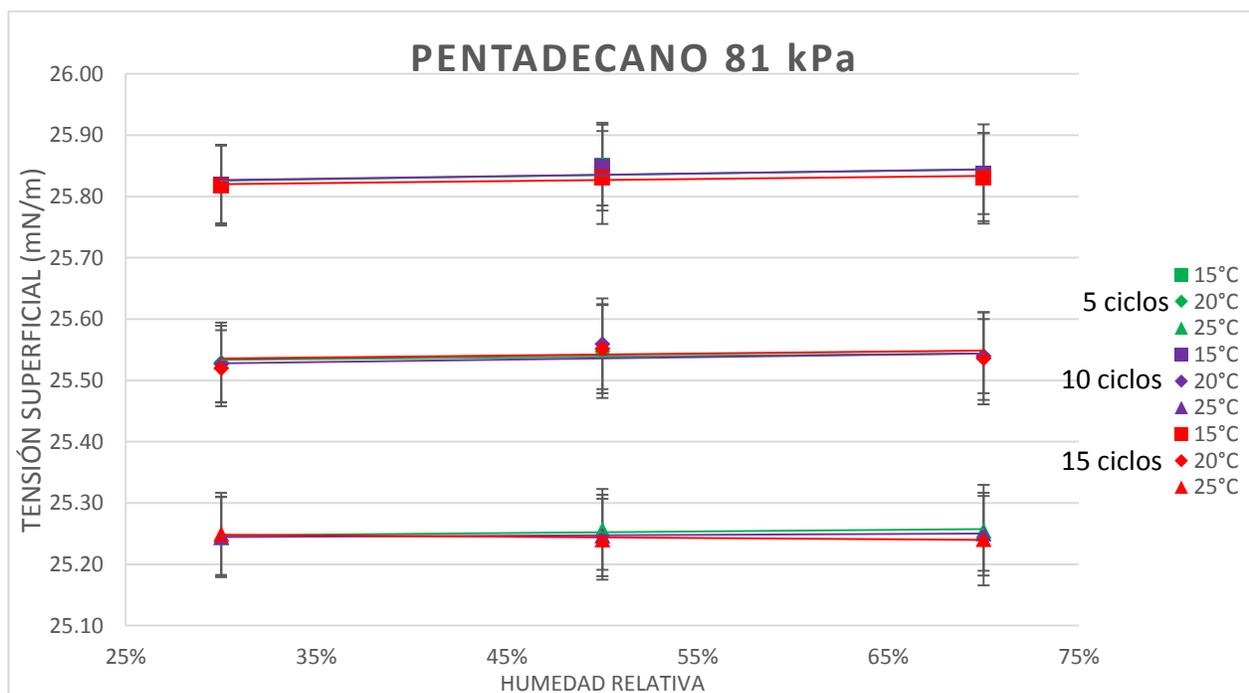


Figura 4.49 Tensión superficial de pentadecano 81 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30% H.R., 50% H.R. y 70 % H.R.)

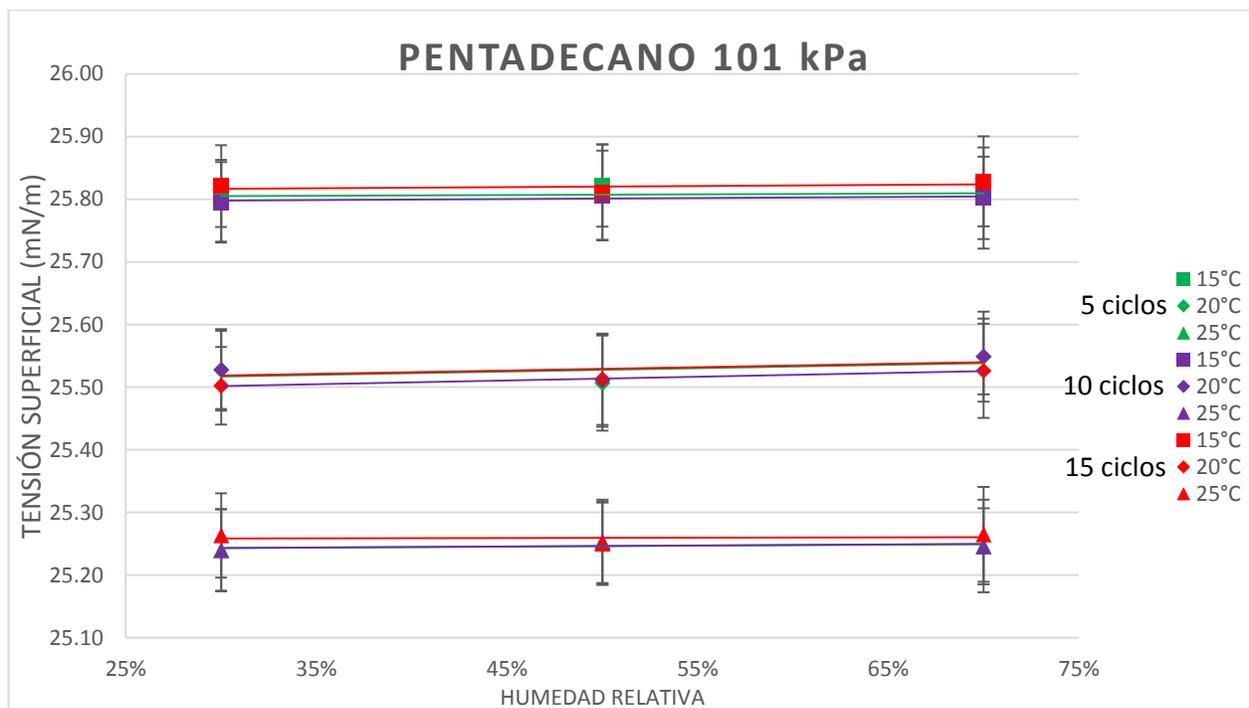


Figura 4.50 Tensión superficial de pentadecano 101 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30% H.R., 50% H.R. y 70 % H.R.)

A diferencia del agua, este líquido tuvo un comportamiento más estable como se observa en la tabla 4.11 y en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13. El factor que tuvo mayor efecto en la medición de tensión superficial de este líquido fue la temperatura, porque la presión y la humedad no presentaron un efecto importante entre sus diferentes niveles.

4.2.1 Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano quitando el primer valor obtenido.

De la misma manera en que se evaluó la opción de quitar el primer elemento de la serie de datos de los resultados del agua, con el pentadecano se observó que esta medida no arrojó diferencias considerables debido a que el material se comportó más homogéneamente en las mediciones.

Tabla 4.12 Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano sin considerar el primer valor (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	25.801	25.807	25.794	25.785	25.843	25.815	25.799	25.833	25.800
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.797	25.817	25.789	25.786	25.844	25.800	25.798	25.832	25.796
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.788	25.813	25.819	25.771	25.827	25.807	25.793	25.829	25.827
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06
20 °C	5 Ciclos	25.519	25.519	25.526	25.534	25.539	25.504	25.519	25.535	25.547
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.506	25.523	25.522	25.515	25.555	25.509	25.522	25.535	25.544
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.522	25.516	25.501	25.504	25.549	25.511	25.519	25.533	25.525
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.07	± 0.06
25 °C	5 Ciclos	25.243	25.236	25.238	25.224	25.248	25.251	25.257	25.254	25.246
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.221	25.239	25.234	25.230	25.241	25.253	25.249	25.246	25.241
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.224	25.245	25.261	25.237	25.237	25.249	25.242	25.240	25.264
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.07	± 0.06

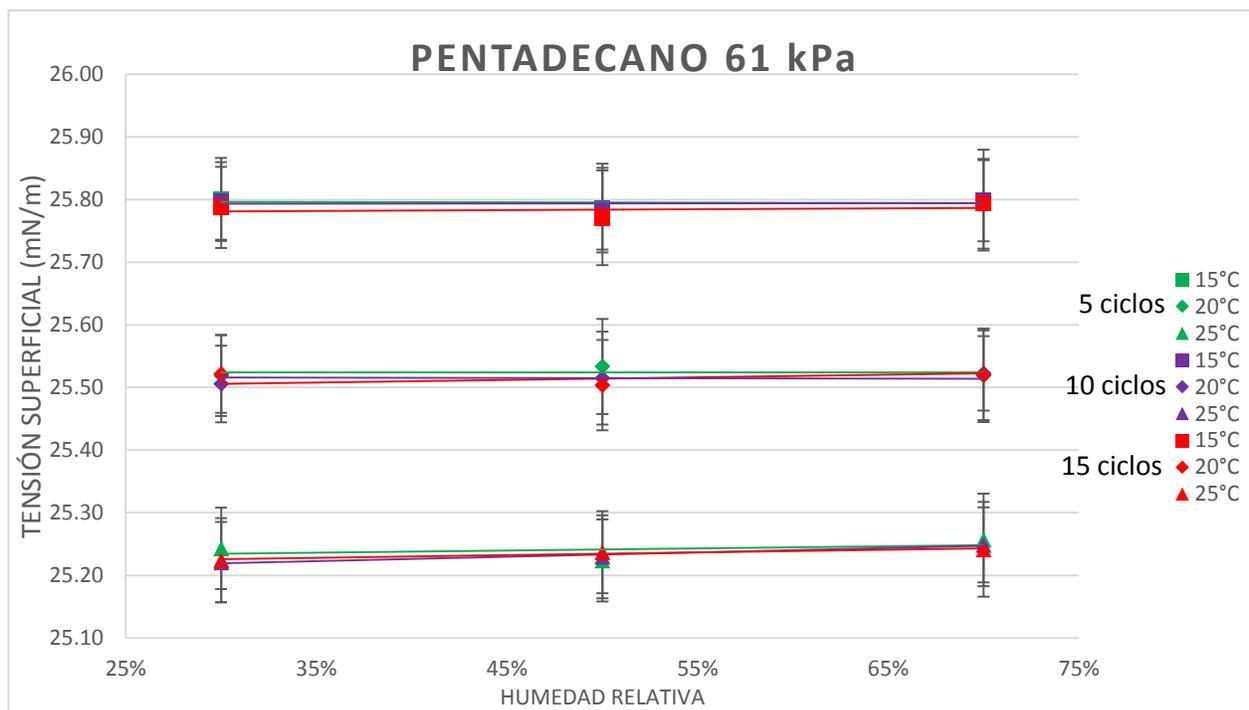


Figura 4.51 Tensión superficial de pentadecano 61 kPa (sin el primer valor de la serie)

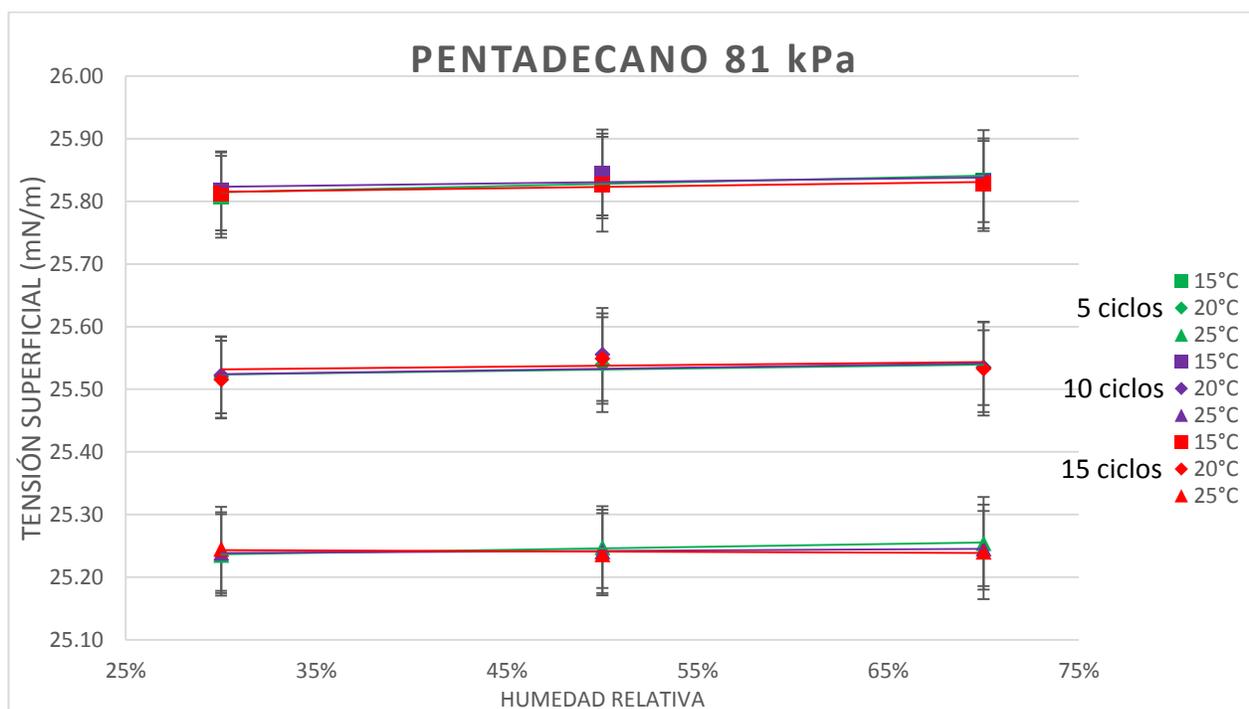


Figura 4.52 Tensión superficial de pentadecano 81 kPa (sin el primer valor de la serie)

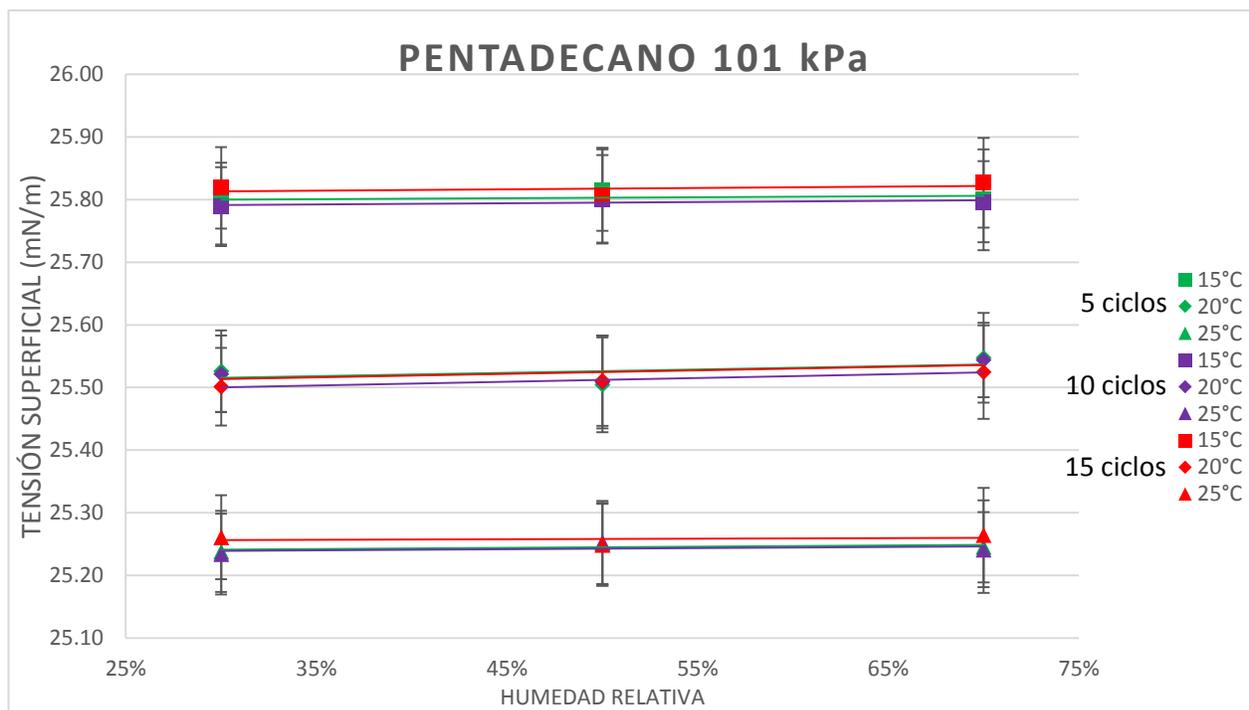


Figura 4.53 Tensión superficial de pentadecano 101 kPa (sin el primer valor de la serie)

De la misma manera que se evaluó el hecho de quitar el primer dato de la serie de resultados obtenidos de los ciclos, pero no se encontró diferencia significativa con este dato menos.

4.2.2 Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano quitando los dos primeros valores obtenidos.

También se eliminaron los dos primeros resultados de la serie obteniendo prácticamente los mismos que en las tablas 4.11 y 4.12.

Tabla 4.13 Resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano sin considerar los dos primeros valores de la serie (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	25.799	25.800	25.790	25.780	25.839	25.809	25.796	25.830	25.798
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.06	± 0.06
	10 Ciclos	25.793	25.813	25.785	25.781	25.842	25.795	25.795	25.828	25.794
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.785	25.810	25.816	25.767	25.826	25.803	25.790	25.826	25.825
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06
20 °C	5 Ciclos	25.517	25.513	25.525	25.529	25.536	25.502	25.515	25.531	25.546
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.502	25.519	25.518	25.511	25.554	25.507	25.520	25.532	25.541
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.520	25.513	25.500	25.499	25.548	25.509	25.517	25.530	25.523
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.06	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.07	± 0.06
25 °C	5 Ciclos	25.241	25.230	25.236	25.220	25.242	25.249	25.255	25.253	25.245
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.07	± 0.06
	10 Ciclos	25.218	25.236	25.231	25.227	25.237	25.252	25.247	25.243	25.239
	<i>U (K=2)</i>	± 0.06	± 0.07	± 0.08	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.06
	15 Ciclos	25.222	25.243	25.259	25.233	25.234	25.248	25.241	25.240	25.264
	<i>U (K=2)</i>	± 0.07	± 0.06	± 0.07	± 0.07	± 0.06	± 0.06	± 0.08	± 0.07	± 0.06

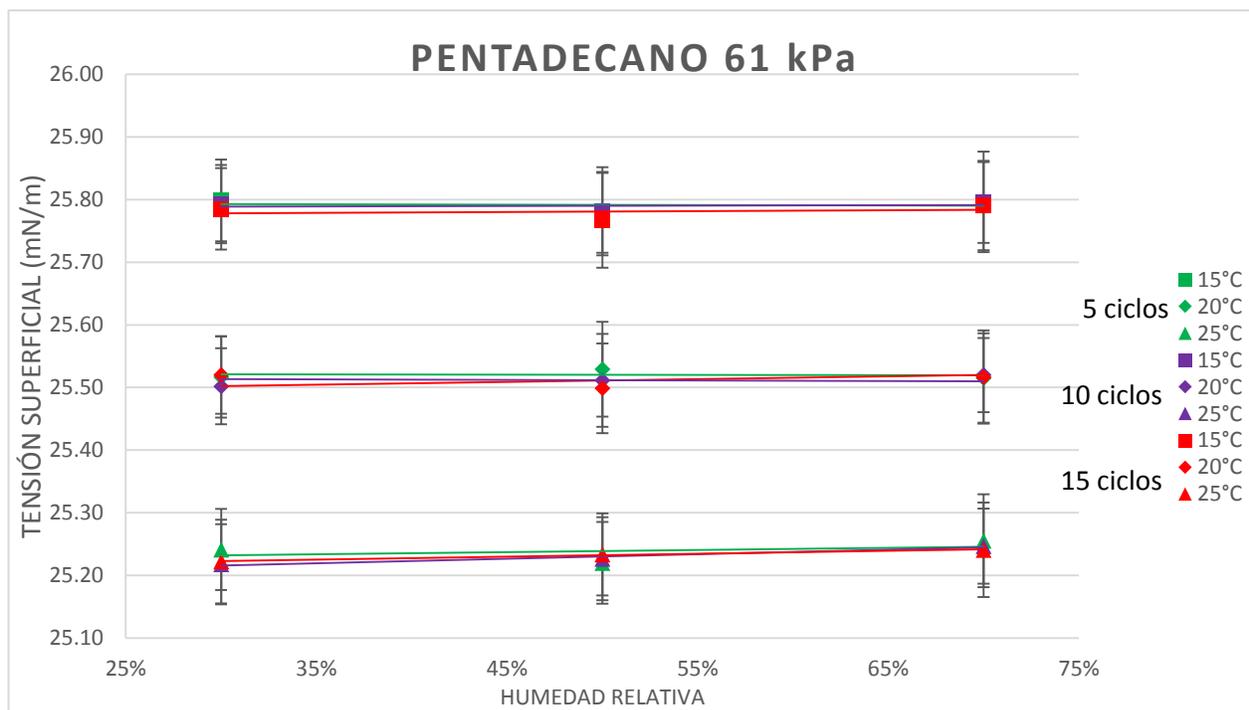


Figura 4.54 Tensión superficial de pentadecano 61 kPa (sin dos primeros valores de la serie)

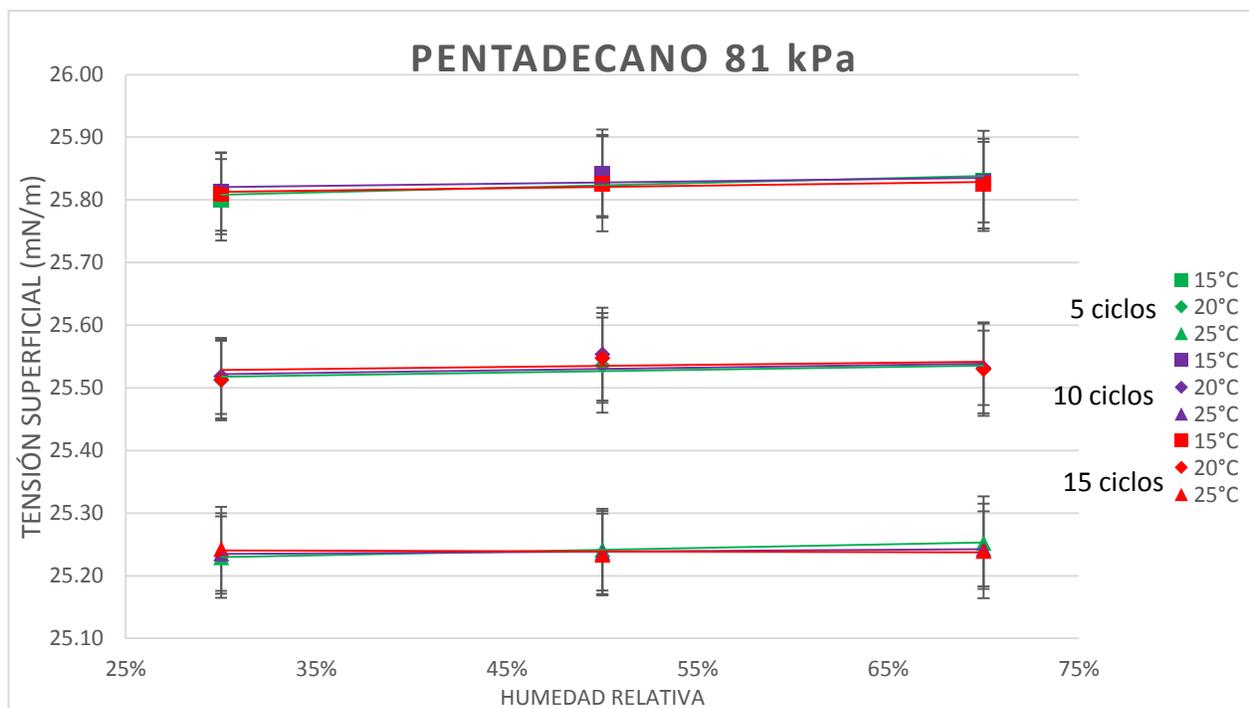


Figura 4.55 Tensión superficial de pentadecano 81 kPa (sin dos primeros valores de la serie)

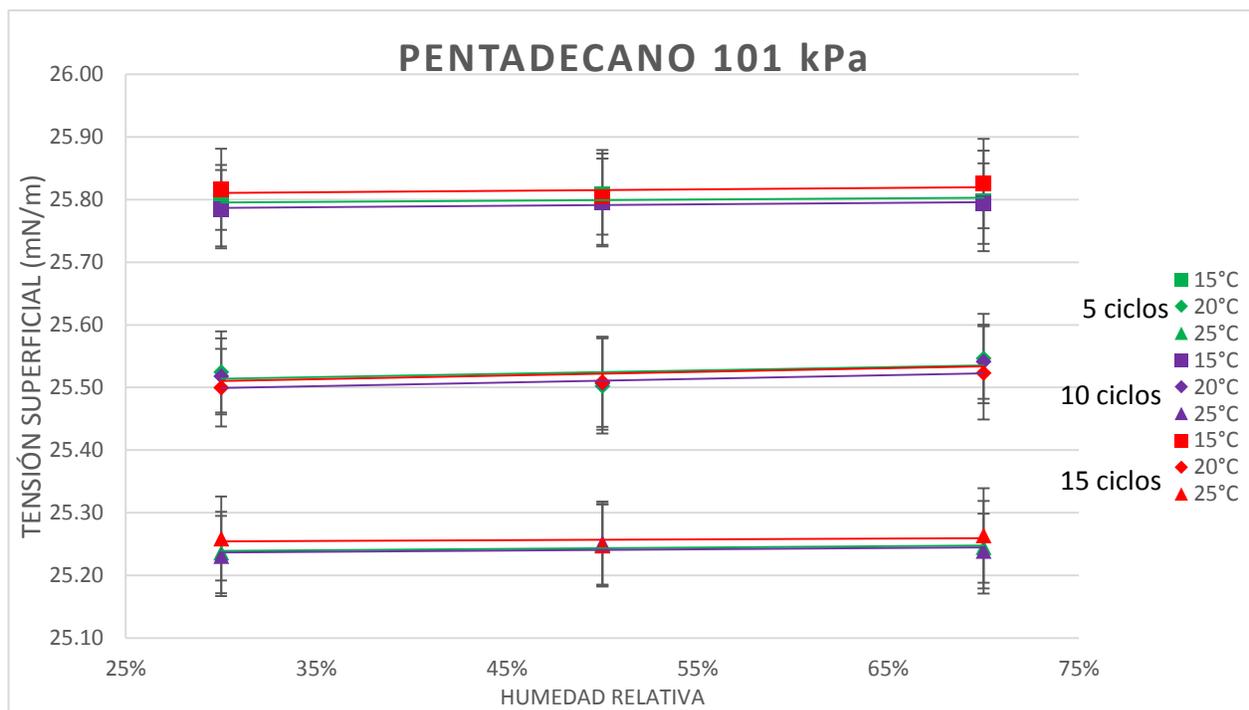


Figura 4.56 Tensión superficial de pentadecano 101 kPa (sin dos primeros valores de la serie)

Finalmente se eliminaron los dos primeros datos de la serie de cada uno de los ciclos para cada factor en cada nivel, donde tampoco se encontró diferencia significativa entre haber quitado datos o no como se puede observar en las tablas correspondientes, debido a que si se consideran todos los resultados sin eliminar datos como en el líquido anterior, se obtiene una incertidumbre relativa igual a 0.25 % y quitando el primer y segundo dato de cada una de las series de todos los resultados nos arroja una incertidumbre relativa de 0.25 % cada una, por lo que se puede observar que este líquido tiene un comportamiento estable desde el inicio de cada una de las series en los diferentes niveles de cada factor.

4.2.3 Análisis de Varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de tensión superficial de pentadecano (*mN/m*)

Para llevar a cabo el análisis de varianza de los resultados se realizaron los siguientes arreglos de matrices donde están contenidos los resultados para cada nivel del factor de humedad inicialmente y de esta manera favorecer el manejo de la información que se pretendía analizar.

Tabla 4.14 Suma de resultados de pentadecano en 30% H.R.

		30%			
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C		25.804	25.818	25.798	
		25.804	25.820	25.795	
		25.790	25.818	25.821	
		77.398	77.456	77.414	232.267
20°C		25.522	25.529	25.528	
		25.512	25.527	25.528	
		25.523	25.520	25.502	
		76.557	76.576	76.558	229.691
25°C		25.245	25.245	25.240	
		25.227	25.245	25.240	
		25.227	25.250	25.263	
		75.698	75.739	75.743	227.181
TOTAL	229.653	229.772	229.714	689.139	

Tabla 4.15 Suma de resultados de pentadecano en 50% H.R.

50%				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	25.792	25.851	25.822	
	25.792	25.849	25.806	
	25.776	25.831	25.811	
	77.360	77.531	77.439	232.330
20°C	25.538	25.547	25.506	
	25.519	25.560	25.511	
	25.509	25.552	25.513	
	76.567	76.658	76.530	229.755
25°C	25.229	25.257	25.252	
	25.234	25.247	25.254	
	25.242	25.241	25.250	
	75.704	75.745	75.756	227.204
TOTAL	229.630	229.934	229.725	689.290

Tabla 4.16 Suma de resultados de pentadecano en 70% H.R.

70%				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	25.803	25.837	25.802	
	25.804	25.837	25.802	
	25.796	25.832	25.828	
	77.403	77.506	77.432	232.341
20°C	25.524	25.540	25.549	
	25.528	25.540	25.549	
	25.523	25.536	25.526	
	76.575	76.615	76.624	229.814
25°C	25.258	25.256	25.246	
	25.254	25.251	25.246	
	25.243	25.241	25.265	
	75.754	75.747	75.757	227.259
TOTAL	229.732	229.868	229.814	689.414

Tabla 4.18 Suma de resultados de pentadecano en interacción temperatura-humedad.

		HUMEDAD			
		30 %	50 %	70 %	TOTAL
TEMPERATURA	15°C	25.804	25.792	25.803	
		25.804	25.792	25.804	
		25.790	25.776	25.796	
		25.818	25.851	25.837	
		25.820	25.849	25.837	
		25.818	25.831	25.832	
		25.798	25.822	25.802	
		25.795	25.806	25.802	
		25.821	25.811	25.828	
		232.27	232.33	232.34	696.94
		25.522	25.538	25.524	
		25.512	25.519	25.528	
	25.523	25.509	25.523		
	25.529	25.547	25.540		
	25.527	25.560	25.540		
	25.520	25.552	25.536		
	25.528	25.506	25.549		
	25.528	25.511	25.549		
	25.502	25.513	25.526		
	229.69	229.76	229.81	689.26	
	25.245	25.229	25.258		
	25.227	25.234	25.254		
	25.227	25.242	25.243		
	25.245	25.257	25.256		
	25.245	25.247	25.251		
	25.250	25.241	25.241		
	25.240	25.252	25.246		
	25.240	25.254	25.246		
	25.263	25.250	25.265		
	227.18	227.20	227.26	681.64	
	TOTAL	689.14	689.29	689.41	
				2067.84	

Tabla 4.19 Suma de resultados de pentadecano en interacción humedad-presión.

		PRESIÓN			
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
30 %	HUMEDAD	25.804	25.818	25.798	
		25.804	25.820	25.795	
		25.790	25.818	25.821	
		25.522	25.529	25.528	
		25.512	25.527	25.528	
		25.523	25.520	25.502	
		25.245	25.245	25.240	
		25.227	25.245	25.240	
		25.227	25.250	25.263	
		229.65	229.77	229.71	689.14
		25.792	25.851	25.822	
		25.792	25.849	25.806	
50 %	HUMEDAD	25.776	25.831	25.811	
		25.538	25.547	25.506	
		25.519	25.560	25.511	
		25.509	25.552	25.513	
		25.229	25.257	25.252	
		25.234	25.247	25.254	
		25.242	25.241	25.250	
		229.63	229.93	229.73	689.29
70 %	HUMEDAD	25.803	25.837	25.802	
		25.804	25.837	25.802	
		25.796	25.832	25.828	
		25.524	25.540	25.549	
		25.528	25.540	25.549	
		25.523	25.536	25.526	
		25.258	25.256	25.246	
		25.254	25.251	25.246	
25.243	25.241	25.265			
229.73	229.87	229.81	689.41		
TOTAL	689.02	689.57	689.25	2067.84	

Tabla 4.20 ANOVA de tensión superficial de pentadecano.

FUENTE VARIACIÓN	DE	SUMA CUADRADOS	DE GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	f CALCULADA	Valor -P
EFFECTOS PRINCIPALES						
Temperatura		4.3318	2	2.1659	26673.330	1.351E-81
Presión		0.0058	2	0.0029	35.870	1.227E-10
Humedad		0.0014	2	0.0007	8.611	5.676E-04
INTERACC. DE 2 FACTORES						
Temp.-Presión		0.0026	4	0.0007	8.012	8.971E-04
Temp.-Humedad		0.00015	4	3.6954E-05	0.455	0.637
Presión-Humedad		0.0014	4	0.0003	4.231	0.020
INTERACC. DE 3 FACTORES						
Temp.-Pres.-Hum.		0.0020	8	0.0002	3.004	0.058
ERROR		0.0044	54	8.12E-05		
TOTAL		4.3495	80			

Los resultados del presente análisis de varianza evalúa los resultados obtenidos para la medición de tensión superficial del pentadecano, uno de los materiales más estables en densidad pero uno de los más complejos de medir en tensión superficial debido a su comportamiento experimental durante la medición misma. El factor de mayor influencia es la temperatura y los otros dos fueron de muy poco impacto debido a que las diferencias encontradas dentro de la suma de cuadrados para cada uno de los factores principales fue la mayor como se observa en el resumen de la Tabla 4.20. La combinación de dos factores como presión y temperatura, presentaron variabilidad en los resultados pero aun así no son de gran impacto para considerarlos como de interés debido a que el valor-P se encuentra muy por debajo del valor donde se vuelve significativa la hipótesis que la interacción de estos dos factores tienen impacto en el resultado de tensión superficial. En general la varianza que se tiene para este líquido particular muestra una alta estabilidad de los resultados.

4.3 Resultados de la medición tensión superficial de etilenglicol en los diferentes niveles de los diferentes factores.

El tercer líquido medido en tensión superficial y que se utiliza como material de referencia en densidad, se comportó de maneta muy estable como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 4.21 Resultados experimentales de tensión superficial de Etilenglicol (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	49.093	49.055	49.087	50.201	50.352	50.247	51.309	51.310	51.447
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	49.080	49.066	49.063	50.223	50.311	50.247	51.366	51.330	51.443
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	49.058	49.090	49.103	50.212	50.285	50.227	51.348	51.312	51.428
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
20 °C	5 Ciclos	48.563	48.588	48.605	49.758	49.883	49.738	50.934	50.895	50.946
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	48.548	48.625	48.593	49.756	49.842	49.724	50.938	50.910	50.954
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	48.532	48.672	48.591	49.736	49.807	49.738	50.928	50.897	50.959
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.11	± 0.11	± 0.10
25 °C	5 Ciclos	48.172	48.145	48.089	49.387	49.402	49.320	50.480	50.442	50.483
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	48.166	48.137	48.077	49.381	49.389	49.316	50.483	50.444	50.478
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	48.149	48.159	48.054	49.383	49.334	49.325	50.487	50.452	50.471
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10

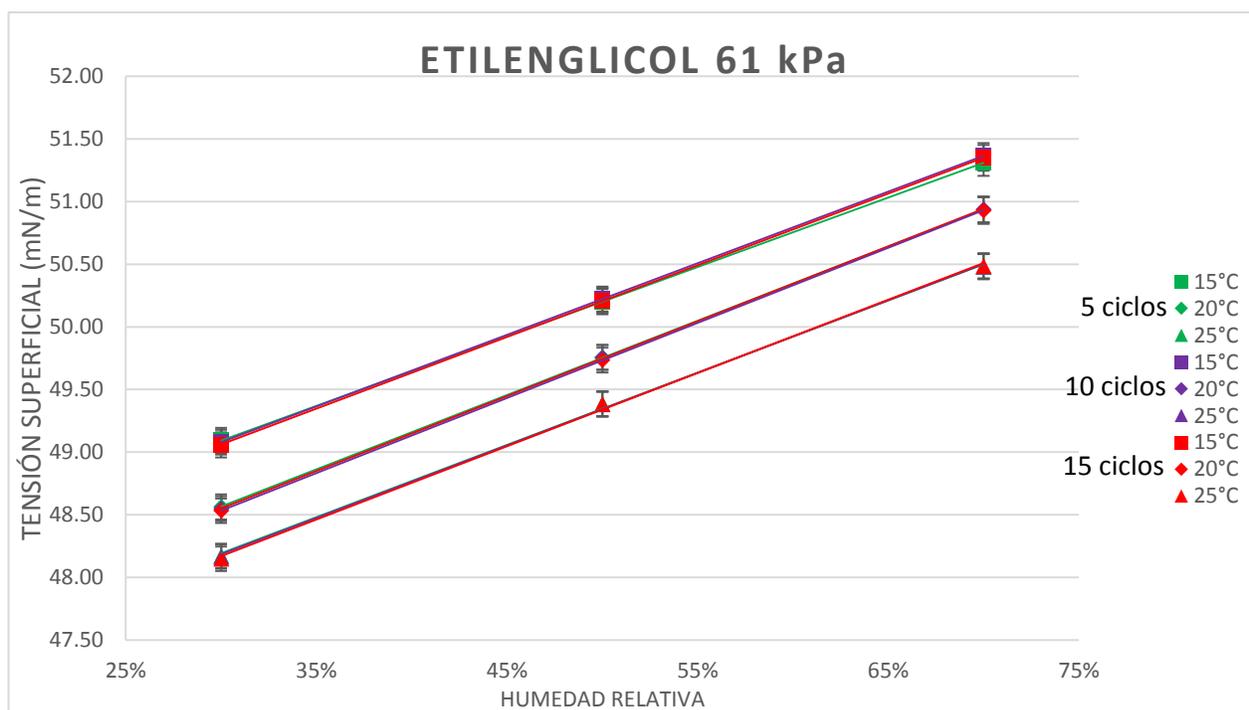


Figura 4.57 Tensión superficial de etilenglicol a 61 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)

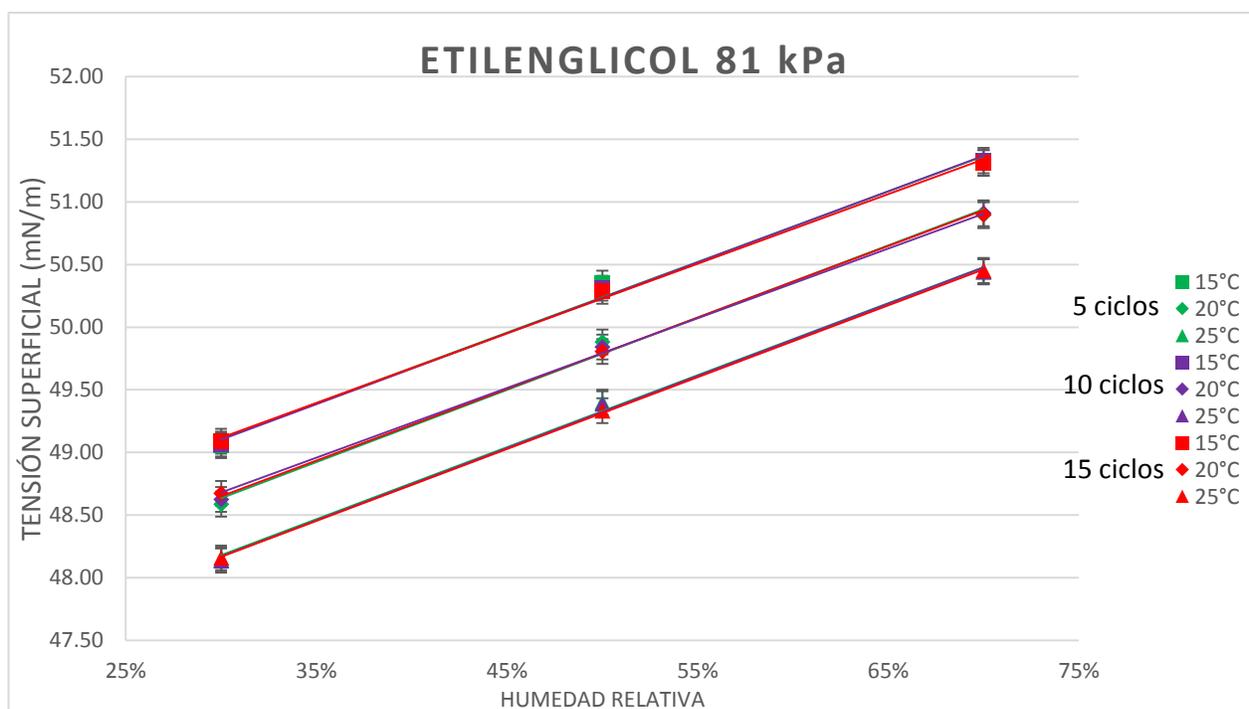


Figura 4.58 Tensión superficial de etilenglicol a 81 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)

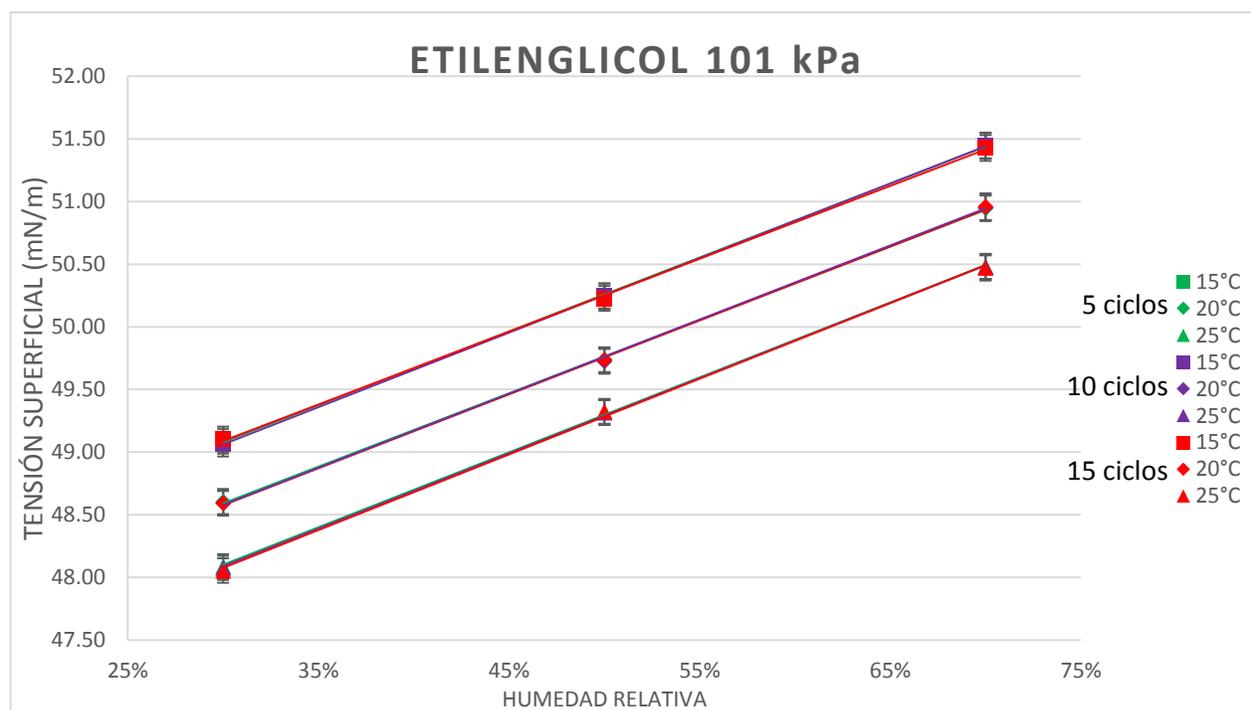


Figura 4.59 Tensión superficial de etilenglicol a 101 kPa (15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 % H.R., 50 % H.R. y 70 % H.R.)

Las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 muestran una tendencia inversa a la que presentó el agua, presentando un incremento en la tensión superficial a medida que la humedad creció, aunque de la misma manera que los demás líquidos la influencia de la temperatura fue inversamente proporcional al comportamiento de la tensión superficial.

4.3.1 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol quitando el primer valor obtenido.

El eliminar el primer dato de la serie de resultados no fue de influencia ya que el material tuvo un comportamiento muy estable como en el pentadecano. Los resultados se muestran en la tabla 4.22.

Tabla 4.22 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol sin considerar el primer valor (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	49.087	49.050	49.078	50.200	50.351	50.245	51.302	51.306	51.446
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	49.076	49.064	49.058	50.223	50.310	50.246	51.363	51.328	51.442
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	49.055	49.088	49.100	50.211	50.285	50.226	51.345	51.310	51.426
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
20 °C	5 Ciclos	48.556	48.584	48.599	49.758	49.882	49.737	50.928	50.891	50.945
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	48.544	48.623	48.590	49.755	49.841	49.724	50.932	50.908	50.953
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	48.530	48.671	48.589	49.735	49.807	49.738	50.920	50.896	50.958
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.11	± 0.10
25 °C	5 Ciclos	48.170	48.140	48.085	49.386	49.401	49.320	50.480	50.441	50.482
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	48.165	48.134	48.074	49.381	49.389	49.316	50.482	50.444	50.478
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	48.148	48.157	48.053	49.383	49.334	49.325	50.486	50.452	50.470
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10

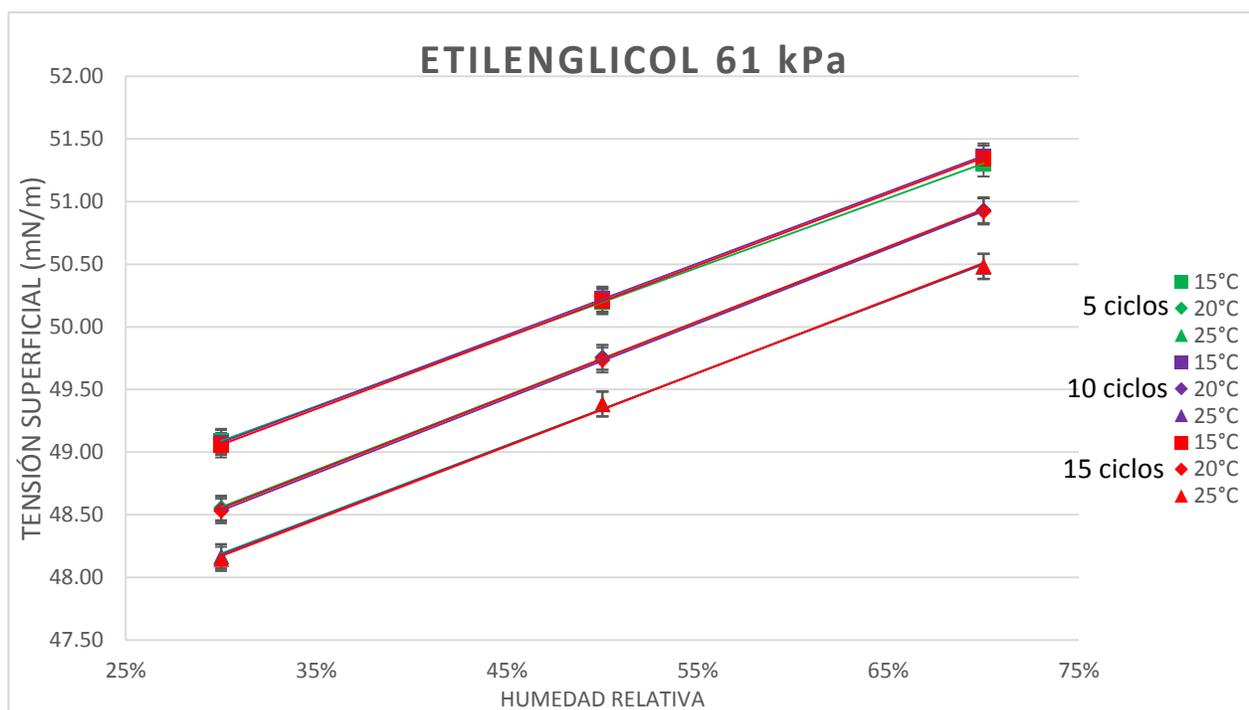


Figura 4.60 Tensión superficial de etilenglicol a 61 kPa (sin el primer resultado de la serie)

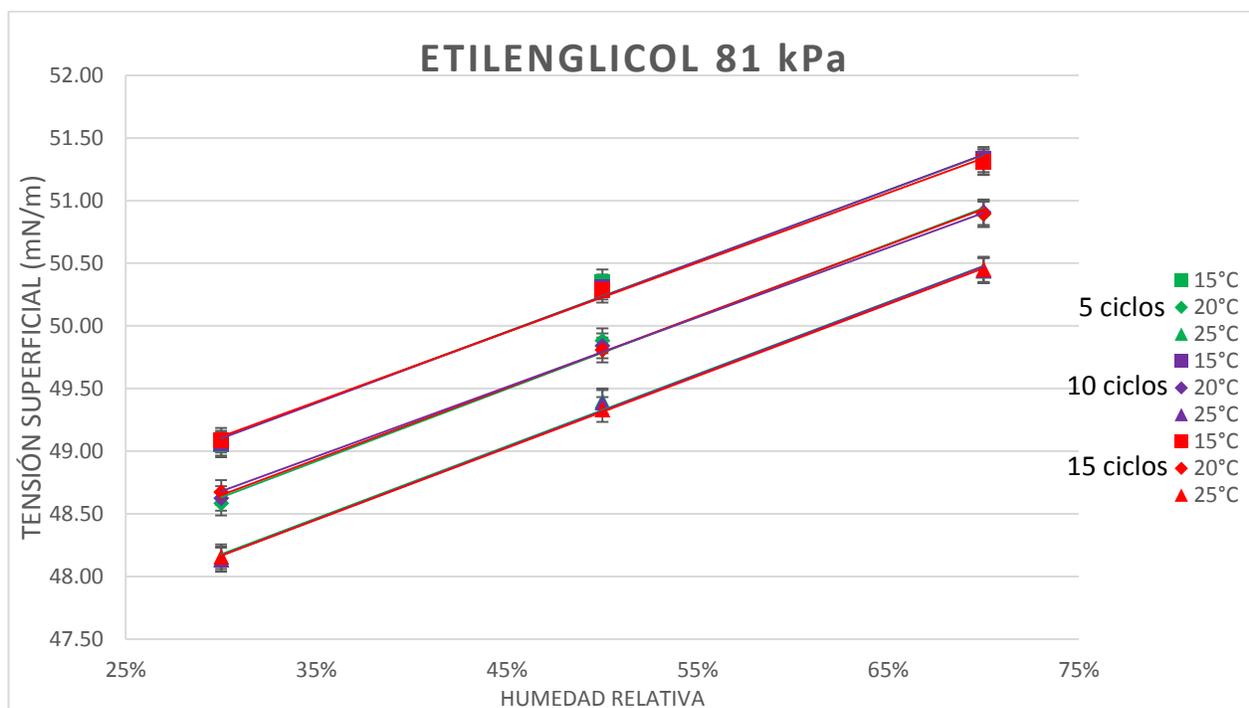


Figura 4.61 Tensión superficial de etilenglicol a 81 kPa (sin el primer resultado de la serie)

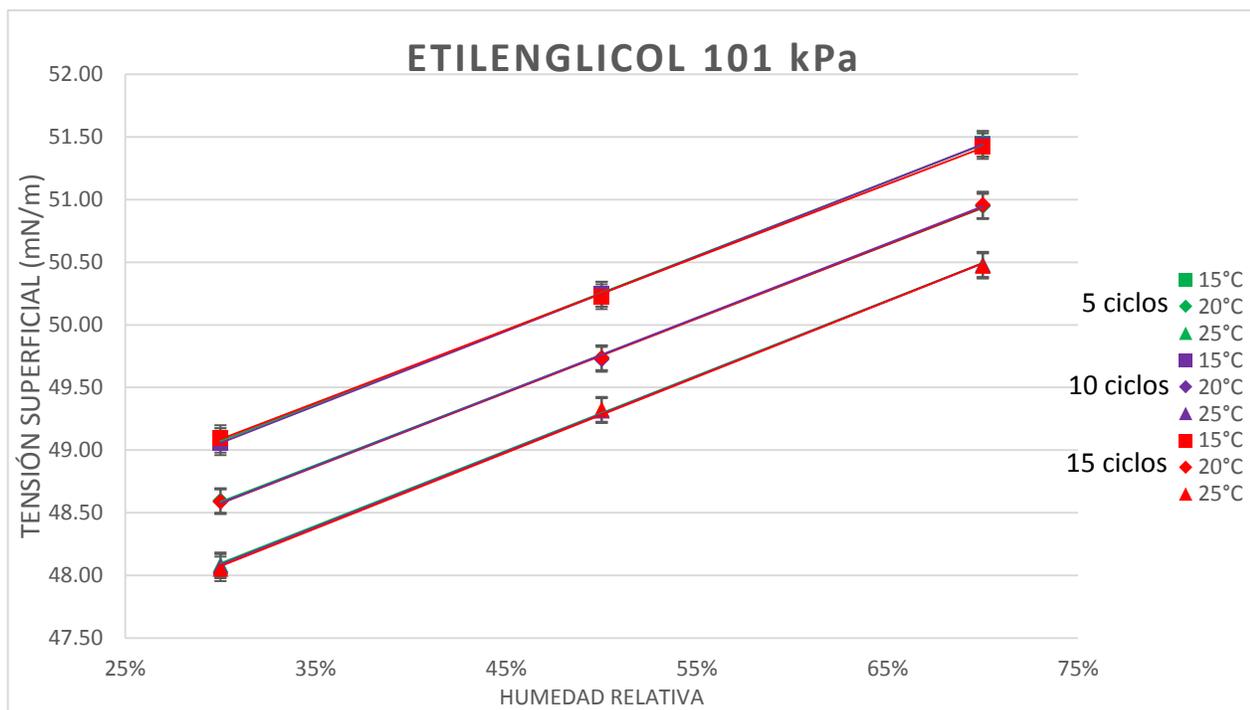


Figura 4.62 Tensión superficial de etilenglicol a 101 kPa (sin el primer resultado de la serie)

Otra característica encontrada de la medición experimental de este líquido es que la estimación de incertidumbre es la más baja encontrada en comparación con la de los otros dos líquidos, además de que es consistente entre los diferentes niveles como se observa en las figuras 4.23, 4.24 y 4.25.

4.3.2 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol quitando los dos primeros valores obtenidos

Finalmente, se eliminó el primer y segundo dato de la serie de resultados con lo que se observó que no existe gran diferencia de resultados entre ellos, lo que indica que este líquido también es muy estable desde el inicio de cada número de ciclos como se viene reflejando en todas las gráficas de las figuras 4.20 a la 4.28.

Tabla 4.23 Resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol sin considerar los dos primeros valores de la serie (mN/m).

		30 % H.R.			50 % H.R.			70 % H.R.		
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa	61 kPa	81 kPa	101 kPa
15 °C	5 Ciclos	49.085	49.050	49.077	50.200	50.351	50.245	51.301	51.305	51.445
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	49.075	49.064	49.058	50.223	50.309	50.245	51.362	51.328	51.442
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	49.055	49.088	49.100	50.211	50.285	50.226	51.345	51.310	51.426
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
20 °C	5 Ciclos	48.555	48.584	48.599	49.758	49.882	49.737	50.927	50.891	50.945
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	48.544	48.623	48.590	49.755	49.840	49.724	50.931	50.908	50.952
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	48.530	48.671	48.589	49.735	49.807	49.738	50.919	50.897	50.957
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.11	± 0.10
25 °C	5 Ciclos	48.170	48.140	48.085	49.386	49.401	49.320	50.480	50.441	50.482
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	10 Ciclos	48.164	48.134	48.074	49.381	49.389	49.316	50.482	50.443	50.478
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10
	15 Ciclos	48.147	48.157	48.052	49.383	49.334	49.325	50.486	50.451	50.470
	<i>U (K=2)</i>	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10	± 0.10

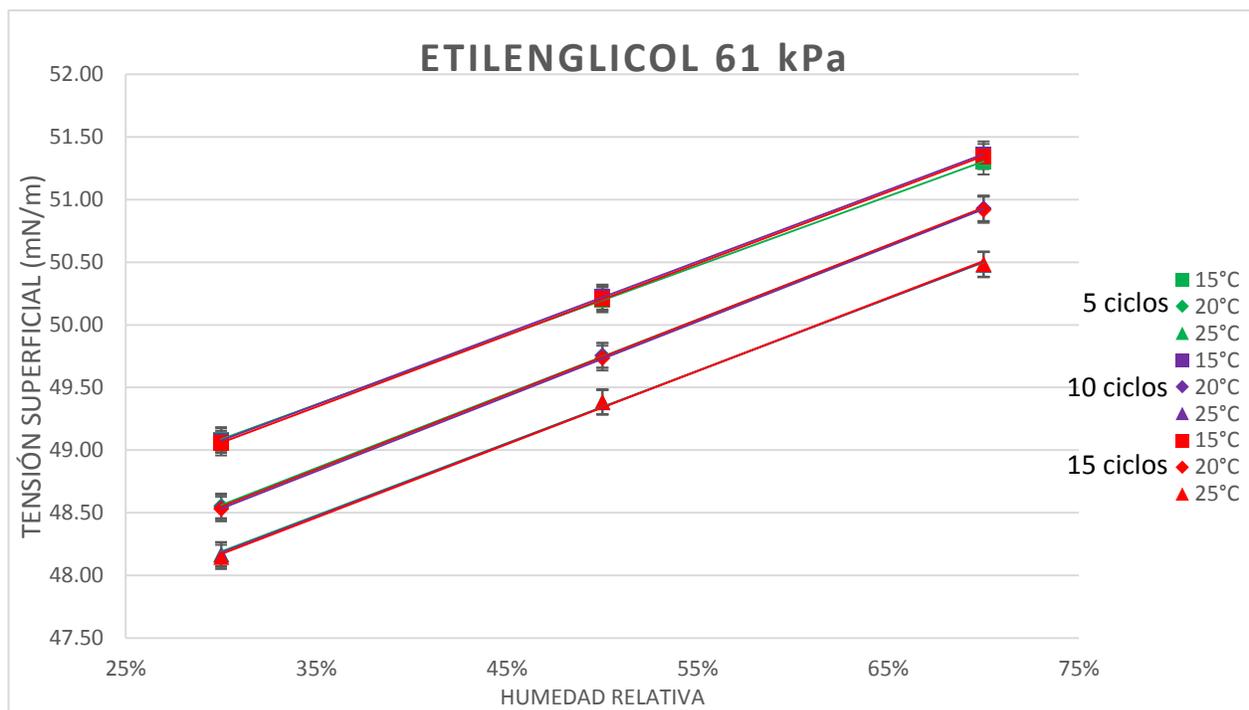


Figura 4.63 Tensión superficial de etilenglicol a 61 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)

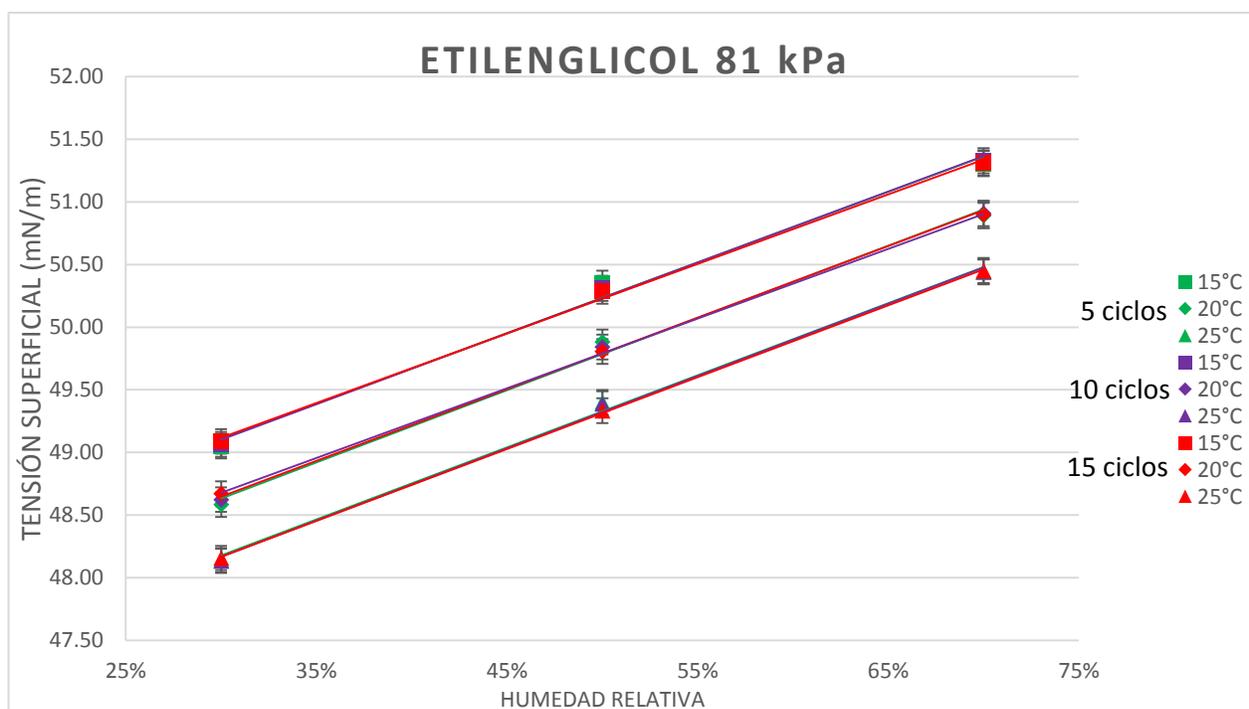


Figura 4.64 Tensión superficial de etilenglicol a 81 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)

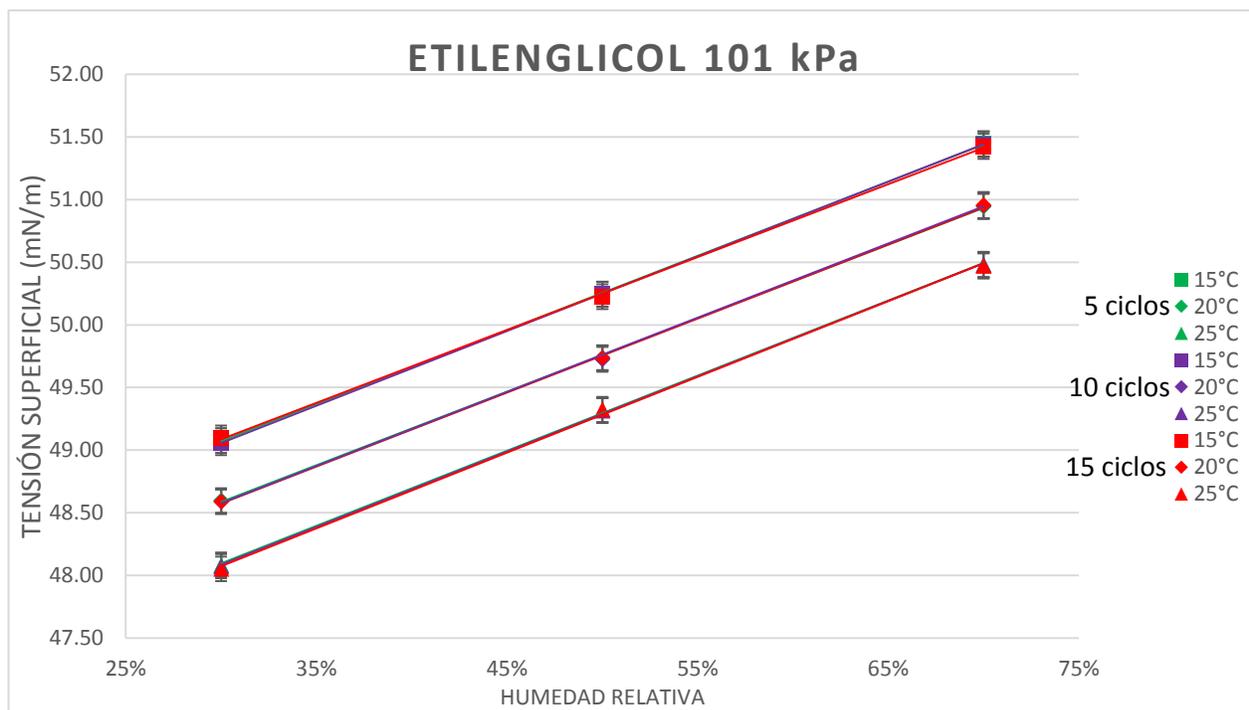


Figura 4.65 Tensión superficial de etilenglicol a 101 kPa (sin dos primeros resultados de la serie)

Así como en el Pentadecano no existió una diferencia significativa al eliminar los primeros datos de las series de ciclos de medición, en el etilenglicol tampoco se encontró una diferencia de no considerar esos datos debido a que en los tres diferentes análisis se encontró una incertidumbre relativa de 0.20 % para cada uno.

4.3.3 Análisis de Varianza (ANOVA) de los resultados experimentales de tensión superficial de etilenglicol (mN/m)

Se realizó un análisis de varianza para los resultados experimentales de este líquido obteniendo los resultados de todo el proceso que se muestran en las tablas siguientes.

Tabla 4.24 Suma de resultados de etilenglicol en 30% H.R.

30%				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	49.093	49.055	49.087	
	49.080	49.066	49.063	
	49.058	49.090	49.103	
	147.23	147.21	147.25	441.70
20°C	48.563	48.588	48.605	
	48.548	48.625	48.593	
	48.532	48.672	48.591	
	145.64	145.89	145.79	437.32
25°C	48.172	48.145	48.089	
	48.166	48.137	48.077	
	48.149	48.159	48.054	
	144.49	144.44	144.22	433.15
TOTAL	437.36	437.54	437.26	1312.16

Tabla 4.25 Suma de resultados de etilenglicol en 50% H.R.

50%				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	50.201	50.352	50.247	
	50.223	50.311	50.247	
	50.212	50.285	50.227	
	150.64	150.95	150.72	452.30
20°C	49.758	49.883	49.738	
	49.756	49.842	49.724	
	49.736	49.807	49.738	
	149.25	149.53	149.20	447.98
25°C	49.387	49.402	49.320	
	49.381	49.389	49.316	
	49.383	49.334	49.325	
	148.15	148.13	147.96	444.24
TOTAL	448.04	448.60	447.88	1344.52

Tabla 4.26 Suma de resultados de etilenglicol en 70% H.R.

70%				
	61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
15°C	51.309	51.310	51.447	
	51.366	51.330	51.443	
	51.348	51.312	51.428	
	154.02	153.95	154.32	462.29
20°C	50.934	50.895	50.946	
	50.938	50.910	50.954	
	50.928	50.897	50.959	
	152.80	152.70	152.86	458.36
25°C	50.480	50.442	50.483	
	50.483	50.444	50.478	
	50.487	50.452	50.471	
	151.45	151.34	151.43	454.22
TOTAL	458.27	457.99	458.61	1374.87

Tabla 4.28 Suma de resultados de etilenglicol en interacción temperatura-humedad.

		HUMEDAD				
		30 %	50 %	70 %	TOTAL	
TEMPERATURA	15°C	49.093	50.201	51.309		
		49.080	50.223	51.366		
		49.058	50.212	51.348		
		49.055	50.352	51.310		
		49.066	50.311	51.330		
		49.090	50.285	51.312		
			49.087	50.247	51.447	
			49.063	50.247	51.443	
			49.103	50.227	51.428	
			441.70	452.30	462.29	1356.29
		20°C	48.563	49.758	50.934	
			48.548	49.756	50.938	
	48.532		49.736	50.928		
	48.588		49.883	50.895		
	48.625		49.842	50.910		
	48.672		49.807	50.897		
		48.605	49.738	50.946		
		48.593	49.724	50.954		
		48.591	49.738	50.959		
		437.32	447.98	458.36	1343.66	
	25°C	48.172	49.387	50.480		
		48.166	49.381	50.483		
		48.149	49.383	50.487		
		48.145	49.402	50.442		
		48.137	49.389	50.444		
		48.159	49.334	50.452		
		48.089	49.320	50.483		
		48.077	49.316	50.478		
		48.054	49.325	50.471		
		433.15	444.24	454.22	1331.61	
	TOTAL	1312.16	1344.52	1374.87	4031.56	

Tabla 4.29 Suma de resultados de etilenglicol en interacción humedad-presión.

		PRESIÓN			
		61 kPa	81 kPa	101 kPa	TOTAL
30 %	HUMEDAD	49.093	49.055	49.087	
		49.080	49.066	49.063	
		49.058	49.090	49.103	
		48.563	48.588	48.605	
		48.548	48.625	48.593	
		48.532	48.672	48.591	
		48.172	48.145	48.089	
		48.166	48.137	48.077	
		48.149	48.159	48.054	
		437.36	437.54	437.26	1312.16
		50.201	50.352	50.247	
		50.223	50.311	50.247	
50.212	50.285	50.227			
49.758	49.883	49.738			
49.756	49.842	49.724			
49.736	49.807	49.738			
49.387	49.402	49.320			
49.381	49.389	49.316			
49.383	49.334	49.325			
448.04	448.60	447.88	1344.52		
51.309	51.310	51.447			
51.366	51.330	51.443			
51.348	51.312	51.428			
50.934	50.895	50.946			
50.938	50.910	50.954			
50.928	50.897	50.959			
50.480	50.442	50.483			
50.483	50.444	50.478			
50.487	50.452	50.471			
458.27	457.99	458.61	1374.87		
TOTAL	1343.67	1344.13	1343.75	4031.56	

Tabla 4.30 ANOVA de tensión superficial de etilenglicol.

FUENTE VARIACIÓN	DE	SUMA CUADRADOS	DE GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	f CALCULADA	Valor -P
EFFECTOS PRINCIPALES						
Temperatura		11.287	2	5.643	16211.283	9.167E-76
Presión		0.004	2	0.002	6.413	0.003
Humedad		72.852	2	36.426	104639.035	1.294E-97
INTERACC. DE 2 FACTORES						
Temp.-Presión		0.028	4	0.007	19.769	3.613E-07
Temp.-Humedad		0.014	4	0.004	10.187	0.0002
Presión-Humedad		0.053	4	0.013	38.044	4.899E-11
INTERCC. DE 3 FACTORES						
Temp.-Pres.-Hum.		0.016	8	0.002	5.776	0.005
ERROR		0.019	54	0.0003		
TOTAL		84.272	80			

En los tres diferentes análisis de varianzas que se observan en las tablas de cada uno de los tres líquidos, observamos que existen diferencias significativas en los resultados experimentales de tensión superficial dados por los efectos principales, así mismo en las interacciones por pares en las diferentes combinaciones de los tres factores.

4.4 Trazabilidad de las mediciones

La trazabilidad es la propiedad de las mediciones que permite relacionar el resultado de medida con un valor de referencia, por lo que es indispensable para construir la confianza en las mediciones.

La trazabilidad de una medición está relacionada con la disseminación de la unidad correspondiente a esa medición. La expresión del valor de una magnitud incluye la referencia a una unidad de medida, la cual ha sido elegida por acuerdo, y por tanto, las medidas de la misma magnitud deben estar referidas a la misma unidad. Aun cuando la definición de trazabilidad no impone limitaciones sobre la naturaleza de las referencias determinadas, es conveniente lograr la uniformidad universal de las mismas mediante el uso de las unidades del Sistema Internacional de Unidades, SI, las cuales ya han sido convenidas en el marco de la Convención del Metro [23].

Es importante señalar que para que los resultados tengan trazabilidad hacia las unidades de base del SI, se debe cumplir con los requisitos de la ISO-17025 vigente.

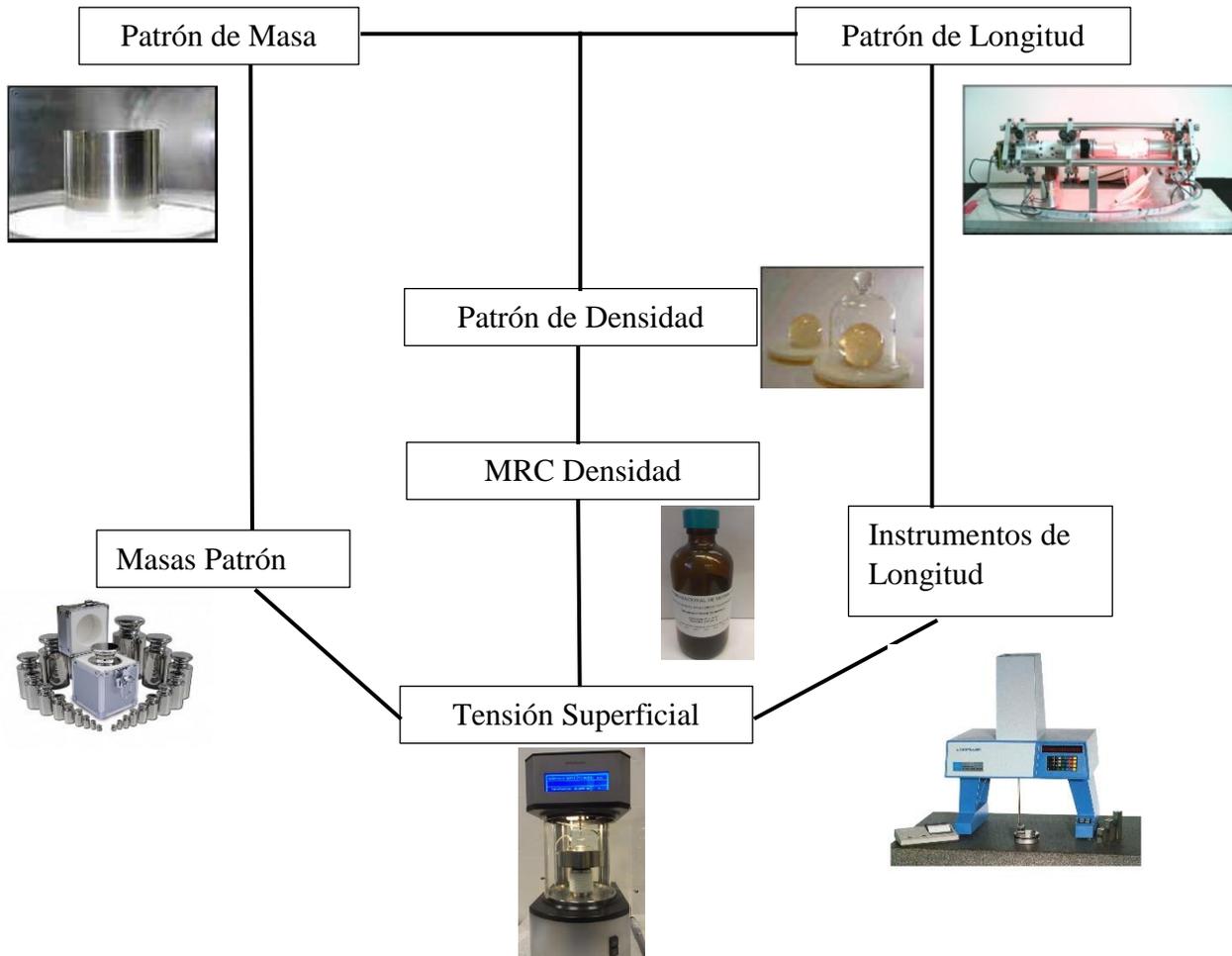


Figura 4.66 Trazabilidad de las mediciones de tensión superficial.

4.5 Buenas prácticas de medición

Con la intención de realizar mediciones de densidad de manera confiable, se presentan a continuación algunas recomendaciones,

- Mantener las condiciones ambientales dentro de los valores adecuados de trabajo.
- Establecer medidas para controlar la entrada de polvo al área destinada para la medición.
- El personal del laboratorio y/o el usuario deben asegurarse que todas las partes del instrumento estén correctamente instaladas previo a su uso.
- Durante la limpieza del sistema de medición del tensiómetro se deben eliminar los residuos del MR (Material de Referencia) (agua, pentadecano o etilenglicol) (o de cualquier otra sustancia) para no contaminar los líquidos, afectando con esto el valor de tensión superficial de las muestras.
- Todas las indicaciones del instrumento deben tomarse solo cuando el instrumento ha alcanzado la estabilidad. El laboratorio debe tener un criterio para determinar el tiempo de estabilización de las indicaciones y, cuando estas estén estables tomar las indicaciones correspondientes.
- Asegurar la limpieza de los materiales; vaso y anillo, con el uso adecuado de los solventes recomendados por el fabricante.
- Mantenimiento y almacenamiento adecuado de las muestras para que no se contaminen o se degraden.

Conclusiones Generales.

En el presente trabajo se encontró una metodología en la que se prueba una capacidad de realizar mediciones de tensión superficial de líquidos, bajo condiciones ambientales diversas emulando las que se podrían tener en distintos lugares del mundo.

Además de esto, se encontraron niveles de incertidumbre en los tres líquidos de un orden similar lo que favorece al método de análisis que se desarrolló durante toda la experimentación. Estas Incertidumbres relativas para los líquidos utilizados fueron: URel (Agua) = 0.23 %, URel (Pentadecano) = 0.25 % y URel (Etilenglicol) = 0.20 %.

Por otro lado se genera una referencia de nivel nacional donde; haciendo uso de la trazabilidad de las mediciones de cada factor de influencia en la tensión superficial, se da mayor certidumbre a los resultados obtenidos, y en posteriores eventos se participará en comparaciones internacionales que le dará mayor solidez a esta magnitud en específico.

Finalmente, este trabajo marca la pauta para el desarrollo de nuevos trabajos en el futuro próximo ya que se podrían desarrollar materiales de referencia certificados que coadyuven en el fortalecimiento de las mediciones trazables a patrones nacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. V. Gupta, **Practical density measurement and hydrometry**, Series in Measurement Science and Technology, IOP Publishing, 2002.
- [2] Luis M. Peña, J. Carlos Pedraza, Luis O. Becerra, Carlos A. Galvan, **A new image processing system for hydrometer calibration developed at CENAM**, International Conference Cultivating metrological knowledge, November, 2007
- [3] Luz Ma. Centeno, Laura del Carmen Burgos, Luis Omar Becerra, **Determinación de la densidad del agua tipo I astm utilizada en cenam con patrones sólidos de densidad**, Centro Nacional de Metrología, Octubre 2004.
- [4] Díaz Julio C, Becerra Luis O, Peña Luis M, Pulido Olga V, Castillo Florianne, Bravo Ulises. **CÁLCULO DE TENSIÓN SUPERFICIAL MEDIANTE EL MÉTODO DE PESADA HIDROSTÁTICA**, CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, SIMPOSIO DE METROLOGÍA 2006
- [5] Palacios A. Joaquín, **Superficies e intercaras. Agnes Pockels, Investigadora Doméstica**. Contactos, Revista de educación en Ciencias e Ingeniería, No. 87 enero-marzo 2013. Universidad Autónoma Metropolitana
- [6] *Hans-Jürgen Butt, Karlheinz Graf, Michael Kapp*, **Physics and Chemistry of Interfaces** pag. 5, 2003 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA.
- [7] Jeffrey Penfold, **The structure of the surface of pure liquids**, Rep. Prog. Phys. 64 (2001) 777–814
- [8] Elias I Franses, Osman A Basaran, and Chien-Hsiang Chang, **Techniques to measure dynamic surface tensión**, Colloid & Interface Science 1996, 1:296-303
- [9] N. B. Vargaftik, B. N. Volkov and L. D. Voljak, **International Tables of the Surface Tension of Water**, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 12, No. 3, 1983.
- [10] G. J. GITTENS, **VARIATION OF SURFACE TENSION OF WATER WITH TEMPERATURE**, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 30, No. 3, July 1969
- [11] Gonzalo Vázquez, Estrella Álvarez, and José M. Navaza, **Surface Tension of Alcohol - Water from 20 to 50 °C**, Journal of Chemical and Engineering Data, Vol. 40, No. 3, 1995.
- [12] C. JHO, D. NEALON, S. SHOGBOLA, AND A. D. KING, JR. **Effect of Pressure on the Surface Tension of Water: Adsorption of Hydrocarbon Gases and Carbon Dioxide on Water at Temperatures between 0 and 50°C**, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 65. No. 1, June 1, 1978

- [13] José L. Pérez-Díaz, Marco A. Álvarez-Valenzuela, Juan C. García-Prada, **The effect of the partial pressure of water vapor on the surface tension of the liquid water-air interface**, Journal of Colloid and Interface Science 381 (2012) 180–182
- [14] Lloyd Trefethen, **Surface Tension in Fluid Mechanics**, National Committee for Fluid Mechanics Films, Education Development Center 1969
- [15] Yunus A. Cengel, John M. Cimbala, **MECÁNICA DE FLUIOS FUNDAMENTOS Y APLICACIONES**, MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE MEXICO, 2004.
- [16] Claudia Santo, Joselaine Cáceres, **Método de cuckow para la calibración de aerómetros utilizando agua destilada adicionada con un tensoactivo como fluido patrón**, Laboratorio Tecnológico del Uruguay – LATU, Octubre 2006
- [17] International Standard, 649/1, Laboratory glassware - **Density hydrometer for general purposes –Part 1: Specification.**
- [18] International Standard, 649/2, **Laboratory glassware - Density hydrometer for general purposes –Part 2: Test methods and use.**
- [19] F. W. Ckuckow. **A new method of high accuracy for the calibration of reference standard hydrometers.** J. S. C. I. February, 1949.
- [20] S. I. d. Metrología, **SIM Guidelines on the calibration of hydrometers - Cuckow method**, Querétaro, México: Impreso Celma, 2016.
- [21] M Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto and N. Bignell, **Recommended table for the density of water between 0 C and 40 C based on recent experimental reports**, Metrologia, 2001, 301-308
- [22] Sugden, S., **"The Variation of Surface Tension with Temperature and some Related Functions,"** J. Chem. Soc., 125, 32 (1924).
- [23] NMX-EC-17025-IMNC-2000 – **Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.**
- [24] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - **“Guide to the expression of uncertainty in measurements”**, GUM 1995
- [25] William D. Harkins and Hubert F. Jordan, **A method for the determination of surface and interfacial tension from the maximum pull on a ring**, Kent chemical laboratory of the University of Chicago, Mayo 1930
- [26] H. H. Zuidema and George W. Waters, **Ring Method for the Determination of Interfacial Tension**, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 13, Mayo 1941

- [27] NMX-Z-055-IMNC-2009, **Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM).**
- [28] NMX-CH-140-IMNC-2002, **Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.**

ANEXO A

Certificados de calibración

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA



Certificado de Calibración

CALIBRATION CERTIFICATE

Hoja 1/3

Cliente: Centro Nacional de Metrología / Patrón Nacional de Densidad
Customer Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Querétaro, México, C.P. 76246

Instrumento: Tensiómetro
Instrument

Marca: DATAPHYSICS
Brand name

Modelo: DCAT11
Model

No. de serie: G01F0113F9F3
Serial number

No. de identificación:
ID number

Lugar donde se efectuó la calibración: Instalaciones del CENAM
Place where the calibration was carried out

No. de certificado: / *Certificate number*
CNM-CC-730-101/2016

No. de servicio: / *Service Number*
160648

Fecha de emisión: / *Date of issue*
2016-04-19

Fecha de calibración: / *Calibration date*
2016-02-25

		Firma electrónica
Responsable de la calibración: / <i>Calibrated by</i>	María Guadalupe Contreras Calderón	P0070-651-21-301052
Aprobó: / <i>Approved by</i>	Sandra Magaly Ramírez Jiménez	N0749-516-21-301058

Notas: [Notes]

- Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del instrumento. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del instrumento calibrado como de las prácticas para su manejo y uso. [The user is responsible for establishing re-calibration periods, based on the characteristics of the instrument and the conditions of handling and use.]
- No es recomendable la reproducción parcial de este certificado, ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados. [Partial reproduction may lead to misleading interpretations.]
- Este certificado se emite de manera electrónica. La versión oficial puede ser consultada en el domicilio electrónico <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx> con la contraseña entregada a la empresa identificada como "Cliente". Aún sin contar con esta contraseña, los datos del equipo calibrado pueden obtenerse en el mismo portal con el número de certificado. [This is an electronic certificate. The official version may be obtained at the website <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx>, using the password provided to the customer identified at the top of this page. Identification information for the instrument calibrated may be obtained at the same site without the need of a password.]

Resultados de la Calibración
Calibration Results

Prueba de excentricidad:

Variación máxima de lectura obtenida en la prueba carga excéntrica.

Debido a las características del Instrumento no se puede realizar la prueba de excentricidad.

Prueba de repetibilidad:

<i>d</i>	Carga	Repetibilidad
0.000 01 g	1 g	0.000 045 g

Prueba de error de indicación: (Intervalo de 0 g a 1.50 g)

Carga de prueba g	Error * g	Incertidumbre ** g
0	+0.000 03	0.000 01
0.50	+0.000 05	0.000 11
0.60	+0.000 08	0.000 11
0.70	+0.000 09	0.000 11
0.80	+0.000 14	0.000 11
0.90	+0.000 15	0.000 11
1.00	+0.000 16	0.000 11
1.50	+0.000 14	0.000 11

Observaciones:

Estos resultados pueden variar si se presentan perturbaciones que puedan alterar el funcionamiento normal del instrumento, si se modifican los parámetros internos programados de la balanza y por otras causas en las que se encuentran:

- 1) No ejecutar el ajuste interno de la balanza (CAL de usuario).
- 2) No ambientar la balanza.
- 3) Variación de la tensión eléctrica.
- 4) Variación significativa de las condiciones ambientales en el lugar donde se realizan las actividades de pesaje.
- 5) No conectar la balanza un tiempo mínimo (30 minutos) antes de su utilización.
- 6) Mover el instrumento del lugar donde se efectuó la calibración.

***Error:**

El error de indicación está expresado en valor de masa convencional.

**** Incertidumbre de medida:**

La incertidumbre de la medición tiene un nivel de confianza de al menos el 95%. La incertidumbre de la medición fue estimada de acuerdo a la norma NMX-CH-140-IMNC 2002 *Guía para la expresión de la Incertidumbre en las Mediciones*, equivalente al documento JCGM 100:2008 (*GUM 1995 with minor corrections*) *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM. First edition – September 2008.*

Condición del instrumento:

Sin observaciones.

No es recomendable la reproducción parcial de este certificado, ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados.

No. de Certificado: CNM-CC-730-101/2016

No. de servicio: 160648

Hoja 3/3

Condiciones ambientales de medición:

Temperatura ambiental: 22.61 °C ± 2.88 °C

Humedad relativa: 36.7 % ± 0.6 %

Presión atmosférica: 81349 Pa ± 28 Pa

Patrones de medida:

Juego de pesas de la marca Sartorius, clase de exactitud: E₂. Certificado de calibración CNM-CC-730-250/2015.

Trazabilidad:

Las pesas que se emplearon para este servicio tienen trazabilidad hacia el Patrón Nacional de Masa No. 21

Procedimiento utilizado:

CNM-730-AC-P.179 Procedimiento para la calibración de balanzas de indicación electrónica y de intervalo continuo - Método de comparación directa contra patrones de masa

Densidad del aire:

La densidad del aire se calculó de acuerdo a la referencia: Picard, R.S. Davis, M Gläser and K. Fujii, "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)", Metrologia 45 (2008), 149-155. La fórmula CIPM-2007 para la densidad del aire produce un incremento no mayor a 10 µg/kg en el valor de masa de los patrones de acero inoxidable calibrados con el patrón nacional de masa, prototipo de Pt-Ir No. 21.

Equipo de medición complementario:

Termohigrómetro marca Vaisala, Núm. de serie: 540148602103, con certificado de calibración Núm. CNM-CC-420-088/2015 para temperatura y CNM-CC-420-080/2015 para humedad relativa.

Barómetro marca Druck modelo DPI 740, Núm. de serie: 74003280, con certificado de calibración Núm. CNM-CC-720-398/2014.

Nota:

El resultado de las mediciones objeto de este certificado está expresado en términos del Sistema General de Unidades de Medida, consistente con el Sistema Internacional de Unidades. Los patrones nacionales de medida son las referencias con las cuales se realizan experimentalmente dichas unidades en México.

----- FIN DEL CERTIFICADO -----

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

Certificado de Calibración

CALIBRATION CERTIFICATE

Hoja 1/2

Cliente: Centro Nacional de Metrología / Equipos/Mediciones de Densidad
Customer Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Querétaro, México, C.P. 76246

Instrumento: Anillo de platino identificado como R-A
Instrument

Marca: Dataphysics
Brand name

Modelo: RG11
Model

No. de serie: Sin serie
Serial number

No. de identificación: Sin identificación
ID number

Lugar donde se efectuó la calibración: Instalaciones de CENAM.
Place where the calibration was carried out

No. de certificado: / *Certificate number*
CNM-CC-740-276/2017

No. de servicio: / *Service Number*
171961

Fecha de emisión: / *Date of issue*
2017-06-13

Fecha de calibración: / *Calibration date*
2017-06-12

		Firma electrónica
Responsable de la calibración: / <i>Calibrated by</i>	Eduardo Francisco Herrera Martínez	N0658-240-21-389525
Aprobó: / <i>Approved by</i>	Carlos Colín Castellanos	N0238-174-21-389677

Notas: [Notes]

- Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del instrumento. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del instrumento calibrado como de las prácticas para su manejo y uso. [The user is responsible for establishing re-calibration periods, based on the characteristics of the instrument and the conditions of handling and use.]
- No es recomendable la reproducción parcial de este certificado, ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados. [Partial reproduction may lead to misleading interpretations.]
- Este certificado se emite de manera electrónica. La versión oficial puede ser consultada en el domicilio electrónico <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx> con la contraseña entregada a la empresa identificada como "Cliente". Aún sin contar con esta contraseña, los datos del equipo calibrado pueden obtenerse en el mismo portal con el número de certificado. [This is an electronic certificate. The official version may be obtained at the website <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx>, using the password provided to the customer identified at the top of this page. Identification information for the instrument calibrated may be obtained at the same site without the need of a password.]

No. de Certificado: CNM-CC-740-276/2017

No. de servicio: 171981

Hoja 2/2

Patrón y trazabilidad:

Microscopio marca Leitz, con certificado de calibración CNM-CC-740-167/2015, trazable al Patrón Nacional de Longitud CNM-PNM-2.

Condiciones Ambientales: Temperatura de 20 °C con variaciones que no excedieron de ± 0.5 °C.

Condiciones del Instrumento: Sin observaciones.

Procedimiento utilizado: 740-AC-P.147.

Desarrollo:

La calibración se realizó en el laboratorio de Micrometrología D014-A, con un microscopio Leitz modelo Libra 200, con ampliación de 50X, número de serie 418631, utilizando un método de comparación contra la escala del microscopio.

RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN:

Tabla I. Resultado de la calibración.

Cota	Valor medido mm
Diámetro externo	19.463
Diámetro interno	18.718

Incertidumbre de medida* U = 0.002 mm

Notas

- (*) "La incertidumbre de medida se obtuvo multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura $k = 2$, el cual corresponde un nivel de confianza de aproximadamente 95 % bajo la suposición de que la función de densidad de probabilidad del mensurando es normal. La incertidumbre de medida fue estimada de acuerdo a la norma NMX-CH-140-IMNC 2002 Guía para la expresión de la Incertidumbre en las Mediciones, equivalente al documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM. First edition – September 2008*"
- El valor de la incertidumbre de medida expresado en este documento no incluye las contribuciones por deriva y transporte del instrumento calibrado.
- El resultado de las mediciones objeto de este Certificado están expresadas en términos del Sistema Internacional de Unidades. Los patrones nacionales de medición son las referencias con las cuales se realizan experimentalmente dichas unidades en México.

No es recomendable la reproducción parcial de este certificado, ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados.

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

Certificado de Calibración

CALIBRATION CERTIFICATE

Hoja 1/2

Cliente: <i>Customer</i>	Centro Nacional de Metrología / Dirección de Masa y Densidad Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Querétaro, México, C.P. 76246	
Instrumento: <i>Instrument</i>	Anillo de platino identificado como R-A	
Marca: <i>Brand name</i>	Dataphysics	
Modelo: <i>Model</i>	RG11	
No. de serie: <i>Serial number</i>	Sin serie	
No. de identificación: <i>ID number</i>	Sin identificación	
Lugar donde se efectuó la calibración: <i>Place where the calibration was carried out</i>	Instalaciones de CENAM.	
No. de certificado: / <i>Certificate number</i> CNM-CC-740-278/2017	No. de servicio: / <i>Service Number</i> 171962	
Fecha de emisión: / <i>Date of issue</i> 2017-06-14	Fecha de calibración: / <i>Calibration date</i> 2017-06-14	
Responsable de la calibración: / <i>Calibrated by</i>	Eduardo Francisco Herrera Martínez	Firma electrónica N0658-240-21-389943
Aprobó: / <i>Approved by</i>	Carlos Colín Castellanos	N0238-174-21-389972

Notas: [Notes]

- Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del instrumento. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del instrumento calibrado como de las prácticas para su manejo y uso. [The user is responsible for establishing re-calibration periods, based on the characteristics of the instrument and the conditions of handling and use.]
- No es recomendable la reproducción parcial de este certificado, ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados. [Partial reproduction may lead to misleading interpretations.]
- Este certificado se emite de manera electrónica. La versión oficial puede ser consultada en el domicilio electrónico <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx> con la contraseña entregada a la empresa identificada como "Cliente". Aún sin contar con esta contraseña, los datos del equipo calibrado pueden obtenerse en el mismo portal con el número de certificado. [This is an electronic certificate. The official version may be obtained at the website <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx>, using the password provided to the customer identified at the top of this page. Identification information for the instrument calibrated may be obtained at the same site without the need of a password.]

No. de Certificado: CNM-CC-740-278/2017

No. de servicio: 171962

Hoja 2/2

Patrón y trazabilidad:

Microscopio marca Leitz, con certificado de calibración CNM-CC-740-167/2015, trazable al Patrón Nacional de Longitud CNM-PNM-2.

Condiciones Ambientales: Temperatura de 20 °C con variaciones que no excedieron de ± 0.5 °C.

Condiciones del Instrumento: Sin observaciones.

Procedimiento utilizado: 740-AC-P.145.

Desarrollo:

La calibración se realizó en el laboratorio de Micrometrología D014-A, con un microscopio Leitz modelo Libra 200, con ampliación de 50X, número de serie 418631, utilizando un método de comparación contra la escala del microscopio.

RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN:

Tabla I. Resultado de la calibración.

Cota	Valor medido mm
Diámetro de alambre	0.37

Incertidumbre de medida* U = 0.01 mm

Notas

- (*) "La incertidumbre de medida se obtuvo multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura $k = 2$, el cual corresponde un nivel de confianza de aproximadamente 95 % bajo la suposición de que la función de densidad de probabilidad del mensurando es normal. La incertidumbre de medida fue estimada de acuerdo a la norma NMX-CH-140-IMNC 2002 Guía para la expresión de la Incertidumbre en las Mediciones, equivalente al documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM. First edition – September 2008*"
- El valor de la incertidumbre de medida expresado en este documento no incluye las contribuciones por deriva y transporte del instrumento calibrado.
- El resultado de las mediciones objeto de este Certificado están expresadas en términos del Sistema Internacional de Unidades. Los patrones nacionales de medición son las referencias con las cuales se realizan experimentalmente dichas unidades en México.

No es recomendable la reproducción parcial de este certificado, ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados.