

**FACTIBILIDAD DEL USO
DE LAS RESPUESTAS DIELECTRICA Y ULTRASÓNICA
PARA INFERIR MOJABILIDAD DE ROCAS DE YACIMIENTO**

Lic. Oneida J. León M.

**Trabajo de Grado presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar por el título de Magister Scientiarum
en Geofísica, Mención Prospección**

Caracas, Abril 2002

**Certifico que he leído este Trabajo de
Grado y que lo encuentro apropiado tanto
en su formato como su contenido y
apariencia externa.**

PhD. Mariela Araujo

Tutor Académico

Dra. Y. Carolina Araujo

Tutor Industrial

30 de Abril del 2002

**Tesis de Grado aprobado en nombre de la
Universidad por el siguiente Jurado:**

PhD. Mariela Araujo

Tutor - Coordinador

MSc. Winston Poblete

Jurado Principal

MSc. María Teresa Vives

Jurado Principal

***Quien no comprende una mirada,
tampoco comprenderá una larga explicación...***

Pablo Neruda

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a la empresa PDVSA-Intevep, por permitir el desarrollo de la parte experimental y de investigación de este trabajo en sus instalaciones, en especial a las tutoras del trabajo la Dra. Mariela Araujo y la Dra. Y. Carolina Araujo. De igual manera quisiera dar gracias a muchas de las personas que laboran en el área de Interacción Roca-Fluido por su disposición a colaborar con el autor de este trabajo para el mejor desempeño en los laboratorios de Intevep, ellos son: Hernán Guzmán, gracias por tu dedicación y paciencia, Sr. Heriberto Sánchez, gracias por auxiliarme en todo momento, Marcelo Lago, Roque Quenza, Freddy Grau y muy particularmente a Diana Ortiz y Teodelys García, por su colaboración y orientación en el desarrollo de la parte experimental de este trabajo.

A la Fundación Gran Mariscal de Ayacucho, cuyo financiamiento me permitió realizar los estudios de Maestría.

De manera muy especial quisiera agradecer a Rommel Whilchy, por tener siempre la gentileza de colaborar con los frecuentes traslados rápidos desde Caracas a las instalaciones de Intevep y por su apoyo incondicional.

Por último, pero no menos importante, a mis padres, gracias por estar siempre para mí, a ustedes les debo lo que soy.

A todos Mil Gracias!

INDICE

	Pág.
LISTA DE TABLAS	1
LISTA DE FIGURAS	2
RESUMEN	4
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	6
CAPITULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1 Núcleos	12
2.2 Evaluación de Propiedades Petrofísica	13
2.2.1 Porosidad	13
2.2.2 Permeabilidad	15
2.2.3 Mojabilidad	18
2.3 Propiedades Eléctricas	20
2.3.1 Mecanismos y Procesos de Transporte	20
2.3.2 Conductividad Eléctrica	21
2.3.3 Materiales Dieléctricos	23
2.3.4 Polarización de Maxwell – Wagner (MW)	25
2.3.5 Modelo de Sillars	28
2.3.6 Modelo de Lysne	30
2.3.7 Efecto de la Ley de Potencia	30

2.4 Propiedades Acústicas	32
2.4.1 Parámetros que Afectan las Velocidades de las Ondas	34
CAPITULO III Parte Experimental	39
3.1 Limpieza de Muestras	40
3.2 Medidas de Porosidad	41
3.3 Medidas de Permeabilidad Absoluta	41
3.4 Medidas de Mojabilidad	42
3.4.1 Método de Amott – Harvey	42
3.4.2 Técnicas Analíticas de Superficie	45
3.5 Fluidos Empleados	46
3.6 Medidas Dieléctricas	47
3.7 Medidas Acústicas	49
CAPITULO IV Resultados y Discusión	53
4.1 Análisis Convencionales	53
4.2 Análisis Especiales	53
4.3 Medidas Dieléctricas	56
4.3.1 Dependencia de la Permitividad Dieléctrica con la Frecuencia	56
4.3.2 Dependencia de la Permitividad Dieléctrica	

con la Saturación de la Muestra	65
4.4 Medidas Acústicas	77
4.4.1 Dependencia de la Velocidad de la Onda	
con la Saturación de la Muestra	77
4.4.2 Dependencia de la Amplitud de la Onda	
con la Saturación de la Muestra	82
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS	90
NOMENCLATURA	94
APÉNDICE A	98
APÉNDICE B	99
APÉNDICE C	100
APÉNDICE D	129
APÉNDICE E	130
APÉNDICE F	132
APÉNDICE G	134
APÉNDICE H	135
APÉNDICE I	136

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Clasificación de los materiales según su conductividad	21
Tabla 2.2 Tipos de Polarización	23
Tabla 3.1 Definición de los índices de mojabilidad	44
Tabla 3.2 Fluidos empleados en cada muestra estudiada	46
Tabla 3.3 Compuestos empleados en la preparación de un litro de agua de formación del pozo Ful-13	46
Tabla 4.1 Resultados de análisis convencionales	53
Tabla 4.2 Volúmenes medidos	54
Tabla 4.3 Índices de Amott – Harvey y saturación irreducible de agua	54
Tabla 4.4 Mojabilidad de las Muestras	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 2.1 Diagrama de la polarización Maxwell – Wagner en un sistema Petróleo – Agua – Roca a saturación irreducible de agua, asumiendo la condición de mojado al agua	26
Fig. 2.2 Respuesta en frecuencia del efecto de polarización MW	27
Fig. 3.1 Representación esquemática del procedimiento experimental ..	39
Fig. 3.2 Sistema Dean – Stark	40
Fig. 3.3 Permeámetro de perfil PDPK – 400	42
Fig. 3.4 Representación triangular de los índices de Amott	44
Fig. 3.5 Analizador de impedancias modelo HP 4192A	47
Fig. 3.6 Equipo de ultrasonido	51
Fig. 4.1 Representación triangular de los índices de Amott – Harvey para las muestras en estudio	55
Fig. 4.2 Componentes de la permitividad dieléctrica para SW = 100% ..	57
Fig. 4.3 Componentes de la permitividad dieléctrica para dos muestras de mojabilidad fuerte al agua con SW = 100%	58
Fig. 4.4 Componentes de la permitividad dieléctrica para SW = 60%	59
Fig. 4.5 Componentes de la permitividad dieléctrica para SW = 30%	60
Fig. 4.6 Componentes de la permitividad dieléctrica para SO = 100% ...	62
Fig. 4.7 Componentes de la permitividad dieléctrica para SO = 80%	63
Fig. 4.8 Componentes de la permitividad dieléctrica para SO = 60%	64
Fig. 4.9 Componentes de la permitividad dieléctrica para 50 KHz, en el sistema agua–aire	66
Fig. 4.10 Componentes de la permitividad dieléctrica para 100 KHz, en el sistema agua–aire	67
Fig. 4.11 Componentes de la permitividad dieléctrica para 500 KHz, en el sistema agua–aire	68
Fig. 4.12 Componentes de la permitividad dieléctrica para 1 MHz, en el sistema agua–aire	69

Fig. 4.13	Componentes de la permitividad dieléctrica para 8 MHz, en el sistema agua–aire	70
Fig. 4.14	Componentes de la permitividad dieléctrica para 13 MHz, en el sistema agua–aire	71
Fig. 4.15	Componentes de la permitividad dieléctrica para 22 KHz, en el sistema agua–crudo	73
Fig. 4.16	Componentes de la permitividad dieléctrica para 100 KHz, en el sistema agua–crudo	74
Fig. 4.17	Componentes de la permitividad dieléctrica para 500KHz, en el sistema agua–crudo	75
Fig. 4.18	Componentes de la permitividad dieléctrica para 1MHz, en el sistema agua–crudo	75
Fig. 4.19	Componentes de la permitividad dieléctrica para 13 MHz, en el sistema agua–crudo	76
Fig. 4.20	Gráficos de velocidad de la onda en función de la saturación de agua	78
Fig. 4.21	Gráficos de velocidad de la onda en función de la saturación de crudo	81
Fig. 4.22	Gráficos de amplitud de la onda en función de la saturación de agua	84
Fig. 4.23	Gráficos de amplitud de la onda en función de la saturación de crudo	86

RESUMEN

El término mojabilidad se define como la tendencia relativa que posee un fluido a adherirse a una superficie sólida en presencia de otro fluido inmisible, tratando de ocupar la mayor área en contacto con dicho sólido. La condición de mojado de las rocas es una propiedad de gran influencia sobre la distribución de fluidos en el medio poroso.

Actualmente, la mojabilidad de las rocas de yacimiento se determina a partir de pruebas de laboratorio costosas, de manera que la factibilidad de inferir la condición de mojado mediante el uso de las respuestas acústica y dieléctrica permitiría su evaluación en campo de manera rápida y relativamente a bajo costo. En este trabajo se reportan resultados de un estudio experimental orientado a dicha evaluación. Se estudió todo el rango de saturación (0 – 100%) para sistemas agua-aire y crudo-agua.

Se evaluó la dependencia de la permitividad dieléctrica generalizada con la frecuencia en rocas de yacimiento con diferente condición de mojado, en el rango entre 10 KHz y 13 MHz. Para el sistema agua-aire los valores de ϵ'' son significativamente mayores a los valores de ϵ' . Se ponen de manifiesto efectos de conductividad de los iones presentes en el agua de formación para bajas frecuencias. Para altas frecuencias las curvas se solapan indicando la presencia de un fenómeno distinto a la conducción. En el sistema crudo-agua se observa que se solapan las curvas de las muestras mojada al agua y fraccional para ϵ' y ϵ'' con 100% saturación de crudo,

diferenciándose sus comportamientos con la disminución de saturación de crudo. Para ϵ' se observan los mayores valores de permitividad. La permitividad de la muestra mojada al crudo tiene una dependencia exponencial en todo el rango de frecuencia para ambos parámetros calculados.

Para las medidas acústicas, se estudió la dependencia de la velocidad y la amplitud de las ondas compresionales (P) y transversales (S1 y S2) con la saturación de las muestras a 3000 psi y 6000 psi de presión de confinamiento. Con respecto a la velocidad, se infiere la influencia de parámetros tales como: cambios en la densidad de la muestra con la saturación, porosidad, rigidez de la muestra a altas saturaciones del fluido que moja la roca y la mojabilidad de estas. También se observa efectos sobre la mojabilidad con el porcentaje de la saturación del fluido que moja la roca en la amplitud de las ondas en los sistemas agua-aire y crudo-agua.

Capítulo I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha venido mostrando gran interés por el estudio de rocas de yacimiento, no sólo por su relevancia económica en la explotación petrolera, sino por su asociación con problemas de frontera en el área de ciencias.

La búsqueda del petróleo, y a su vez el entendimiento de los fenómenos y procesos a los cuales está sometido el medio poroso de una roca de yacimiento, normalmente asociado a grandes profundidades, conduce a la exploración e investigación de la alta complejidad de los mismos, por ser un sistema sometido a grandes esfuerzos y presiones que pueden estar alterando las propiedades de los fluidos en su interior.

En este trabajo, se estudiará la factibilidad del uso de medidas dieléctricas y ultrasónicas para inferir la mojabilidad de rocas de yacimiento. Este tema de investigación está relacionado a una de las áreas de mayor interés para la industria petrolera como lo es la Caracterización y Simulación de Yacimientos.

La mojabilidad se define como la tendencia relativa que posee un fluido a adherirse a una superficie sólida en presencia de otro fluido inmisible, tratando de ocupar la mayor área en contacto con dicho sólido. La condición de mojado de la roca es una propiedad de gran influencia sobre la distribución de fluidos en el medio poroso, ésta se considera como parámetro de diseño en la selección de estrategias de explotación de

yacimientos.

Hasta ahora la mojabilidad de la roca se ha venido determinando a partir de pruebas de laboratorio costosas, de manera que el uso de las respuestas acústica y dieléctrica para inferir la mojabilidad permitiría su evaluación directamente en campo, a partir de la información de registros.

El interés fundamental en la respuesta dieléctrica de las rocas de yacimiento, está en la posibilidad de investigar sus propiedades físicas de una manera rápida, precisa, no destructiva y relativamente económica. Aunque no existen modelos que expliquen y describan perfectamente las observaciones experimentales, se acepta de manera universal^[1] que las propiedades de transporte eléctricas y dieléctricas de las rocas dependen de la permitividad y conductividad de los fluidos que saturan sus poros (agua, aceite y gas), o de sus respectivas saturaciones, y la manera como éstos fluidos se encuentran distribuidos en el espacio poroso.

Las propiedades dieléctricas de las rocas sedimentarias saturadas tienen interés académico (científico) y práctico (por ejemplo en geofísica de pozo). Desde el punto de vista científico, las rocas sedimentarias saturadas se consideran como un material poroso con un interesante comportamiento. De hecho las investigaciones en esta área han conducido a la publicación de gran número de trabajos. Desde el punto de vista geofísico, las propiedades eléctricas de las rocas sedimentarias son importantes en la prospección eléctrica y registros de pozos^[2]. Entre las propiedades petrofísicas que afectan la respuesta dieléctrica se encuentra la mojabilidad.

Investigaciones recientes^[3], muestran la posibilidad de evaluar la mojabilidad de rocas de yacimientos petrolíferos mediante mediciones in situ (a fondo de pozo) usando medidas dieléctricas. La metodología propuesta se basa en la comparación de las conductividades y parámetros dieléctricos de la formación, medidas con una herramienta de alta frecuencia (> 20 MHz) y una de baja frecuencia (10 KHz).

Los efectos de la mojabilidad en las propiedades dieléctricas de las rocas han sido divididos en dos categorías: efectos de conectividad que dominan a baja frecuencia (por debajo de 1 KHz), y efectos de forma, que aparecen entre frecuencias intermedias y altas (10 KHz).

Para entender como la mojabilidad afecta la respuesta dieléctrica de la roca, hay que recordar que ésta propiedad gobierna la distribución de los fluidos dentro del espacio poroso, y ya que el agua y el aceite poseen propiedades dieléctricas distintas, se esperan diferencias considerables en el espectro dieléctrico de rocas de acuerdo con la propiedad de mojado.

La aplicación de un campo eléctrico a una roca producirá efectos diferentes dependiendo de la mojabilidad de la misma. En el caso de una roca mojada al agua, los iones disueltos en el agua son capaces de moverse en la película de agua que recubre los poros y viajar distancias relativamente largas antes de ser atrapadas dentro de una interfaz agua/roca o una interfaz agua/petróleo. Para una roca mojada al petróleo, que contenga petróleo y agua (a saturación irreducible de agua), la distancia que recorren

los iones, los cuales están contenidos en gotas esféricas de agua dentro de los poros más grandes o en glóbulos que se extienden sobre varios poros, será más o menos del orden del diámetro de dichos poros. La diferencia en la forma de las inclusiones de agua crea dos respuestas eléctricas diferentes, y puede ser empleada en la determinación de la mojabilidad de la roca.

Además de la caracterización dieléctrica, en los últimos años se ha mejorado la caracterización de yacimientos, gracias a los avances técnicos en el estudio de ondas acústicas y tecnología de registro sísmico. Las velocidades de ondas acústicas que se propagan a través de rocas de yacimiento dependen de parámetros tales como: porosidad, propiedades de los fluidos contenidos en el medio poroso, saturación, litología, contenido de arcilla, geometría y otras propiedades físicas.

En la industria petrolera, la aplicación tecnológica de las ondas acústicas ha sido limitada a la medición de ondas acústicas compresionales y ondas acústicas de corte, mientras que en el laboratorio y en el campo las medidas acústicas se aplican en la determinación de porosidad, calibración e interpretación de registros sísmicos, identificación de litología, determinación clásica de parámetros elásticos de rocas, para el mejoramiento de la interpretación sísmica, así como en el reconocimiento de microfracturas y en la evaluación de daños a la formación.

En la literatura^[4] se ha reportado, que estudios sistemáticos de las variaciones de las propiedades acústicas en un medio poroso, permiten

visualizar la dependencia de éstas con propiedades tales como porosidad, saturación de fluido y presión. También se han realizado análisis de velocidades acústicas en sedimentos de suelos oceánicos y estudios de las variaciones de la velocidad acústica en función de la presión, saturación y viscosidad del fluido intersticial presente en los poros de las rocas de yacimiento.^[5,6]

En la actualidad se han desarrollado nuevas herramientas para el estudio de las ondas de ultrasonido en medios porosos, por ejemplo el Perfil Sónico de Porosidad (PSP-300), que se utiliza para determinar las propiedades necesarias para la evaluación de reservas y caracterización de los yacimientos.

Así mismo, se ha demostrado^[7,8] que la relación entre velocidades de las ondas compresionales y de corte es constante para todo tipo de roca, y que ésta relación puede ser usada para evaluar la litología de la formación, mediante un gráfico del recíproco de la velocidad de onda compresional o de corte en función de la porosidad, que conduce a una relación lineal para un tipo de roca particular.

Uno de los métodos empleados en la industria del petróleo como un proceso rutinario para restaurar la permeabilidad de la roca en zonas cercanas a los pozos, es la creación de fracturas controladas hidráulicamente, cuyo diseño e implantación requiere del conocimiento de las propiedades elásticas de la roca de la formación, las características de la fractura y la extensión de fractura vertical, todos éstos parámetros pueden

ser inferidos a partir de las medidas acústicas.

Las propiedades mecánicas de la roca son parámetros de entrada claves en muchos modelos analíticos y numéricos utilizados para predecir la estabilidad de un pozo productor de petróleo. Se ha mostrado la existencia^[8] de una buena correlación entre la resistencia intrínseca de la formación y las constantes elásticas dinámicas determinadas a partir de mediciones de velocidad acústica y densidad.

Estudios ultrasónicos previos^[9] concluyen que la velocidad de la onda dentro de la roca está asociada a la mojabilidad de la roca, encontrándose que las rocas con mojabilidad al aceite tienen velocidades mayores que las mojadas al agua, lo cual constituiría una valiosa herramienta para inferir la condición de mojado de una roca a través de mediciones sísmicas.

En el capítulo 2, se presentan los fundamentos teóricos que soportan este trabajo, en el capítulo 3 se describen los equipos y técnicas empleadas en los análisis realizados a las muestras objeto de estudio. Los resultados y su discusión se reportan en el capítulo 4 y finalmente se presentarán las conclusiones acerca de la factibilidad de emplear el conocimiento de las propiedades dieléctricas y características acústicas para inferir la mojabilidad de las rocas y derivados de esta investigación.

Capítulo II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se exponen los conceptos fundamentales necesarios para entrar en el contexto del trabajo. Los estudios que aquí se reportan fueron realizados en muestras de rocas de yacimiento denominadas (núcleos).

2.1. Núcleos

Se denomina núcleo a la muestra de roca que es tomada de un pozo a una profundidad determinada, preservando su estructura geológica y sus características fisicoquímicas de la mejor manera posible, con la finalidad de realizarle análisis petrofísicos y geológicos.

Una toma de núcleos es posible realizarla en pozos de cualquier tipo: exploratorio, en desarrollo y de avanzada; y de acuerdo al tipo de herramienta que se emplee para extraer un núcleo del subsuelo, pueden ser clasificados en: núcleos convencionales, convencionales con tubo de PVC, en manga de goma, presurizados y orientados.

Cuando el núcleo llega al laboratorio, se toman porciones más pequeñas del mismo (tapones), que son cilindros de menor dimensión que se adaptan a la longitud y diámetro de las celdas de los equipos donde se les realizarán los análisis de interés. Las muestras de roca pueden ser consolidadas y no consolidadas dependiendo del grado de compactación. Para realizar los análisis posteriores, los tapones requieren de una limpieza previa con la finalidad de remover fluidos residuales y/o contaminantes, y

luego se restauran las condiciones originales de la roca.

2.2. Evaluación de Propiedades Petrofísicas

Un yacimiento es por naturaleza un medio poroso. En general, los medios porosos son agregados de elementos sólidos (granos, matriz, etc.), cuyos intersticios forman por sí mismos la red de poros^[11]. Estos intersticios dentro del cuerpo poroso originan las diferencias en el comportamiento físico de los sólidos densos (como los minerales) y las sustancias porosas, las cuales son ensambles complicados en los que la presencia del fluido, incluso en pequeñas cantidades, introduce una mayor complejidad.

Las propiedades petrofísicas de rocas de yacimiento se evalúan a partir de análisis convencionales, los cuales consisten en la determinación de las propiedades básicas (permeabilidad absoluta, porosidad y saturación de fluidos); y análisis especiales que se emplean para determinar las características del flujo de los fluidos (permeabilidad relativa, presión capilar y mojabilidad).

2.2.1. Porosidad

En los intersticios de las rocas de yacimiento es donde se acumulan fluidos (petróleo, gas y agua); siendo la porosidad la medida cuantitativa de la capacidad para acumular fluidos. La porosidad ϕ está definida como la relación entre el volumen hueco o espacio poroso V_p y el volumen total de la roca V .

$$\phi = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{V_m}{V}, \quad V_m = V - V_p \quad (2.1)$$

donde V_m es el volumen de la sustancia sólida o matriz. De este modo es suficiente medir dos de estos tres parámetros para calcular la porosidad.

La porosidad es una cantidad adimensional que puede ser expresada en fracción decimal o porcentaje. Para medir la porosidad existen diversos métodos^[11,12], dependiendo del método empleado, se puede medir la porosidad conectada (*porosidad efectiva*), o la porosidad total (*absoluta*, es decir considerando el volumen total de poros estén o no interconectados). Sin embargo, sólo la porosidad efectiva es de interés para la ingeniería de yacimiento, debido a que sólo los volúmenes de hidrocarburos almacenados en los poros interconectados pueden ser parcialmente extraídos del yacimiento. La diferencia entre ambas cantidades se denomina *porosidad no efectiva*.

En general, la porosidad es el resultado de varios procesos geológicos, físicos y químicos, y según el tiempo de depositación, la porosidad se clasifica en primaria o intergranular y secundaria o inducida. La *porosidad primaria* se originó simultáneamente con la depositación de los sedimentos que forman la roca, y los poros formados de esta manera son intersticios de granos individuales de sedimento. La *porosidad secundaria* se refiere a la que se originó por procesos geológicos depositacionales (tectónicos, químicos, disolución) subsiguientes a la formación de las rocas.

Entre los factores que afectan la porosidad se pueden mencionar: La

distribución de tamaño de granos, la forma de granos, el empaque (que también depende de la geometría y distribución de los granos), la presencia de partículas finas, la cementación, la acción química, el fracturamiento, y la compactación.

Experimentalmente la porosidad puede determinarse de dos modos: directamente a través de medidas de volúmenes o indirectamente midiendo pesos y calculando los volúmenes una vez conocidas las densidades de los diferentes materiales estudiados.

2.2.2. Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad característica de la roca que determina la capacidad que tiene un fluido de moverse a través de sus poros interconectados. Además es una propiedad anisotrópica de los medios porosos, es decir, depende de la dirección en que se mida.

En 1856, el ingeniero Francés Henry Darcy^[13] encontró una relación fundamental entre el flujo laminar de un fluido viscoso a través de los poros de un medio poroso.

$$k = -\eta \cdot \frac{u}{\Delta p} \quad (2.2)$$

donde k es la permeabilidad de la roca, u la densidad de flujo volumétrico, (velocidad de filtración), p es la presión del fluido y η es la viscosidad dinámica del fluido. Esta relación es sólo válida para los casos isotrópicos, suponiendo que el fluido es inerte y que la roca es homogénea. En el caso

de un material anisotrópico la permeabilidad debe ser considerada como un tensor.

La permeabilidad de la roca es una propiedad de la misma y no del fluido que pasa a través de ella, siempre que el fluido considerado ocupe el 100% del espacio poroso. Si en una roca todo el espacio poroso interconectado está saturado por un solo fluido, se define entonces la propiedad de la roca llamada *permeabilidad absoluta*. Adicionalmente, la permeabilidad es una propiedad anisotrópica, por lo que depende de la dirección en la que se mide, siendo mayor en dirección paralela a los planos de depositación de los estratos.

Aunque la Ley de Darcy se considera independiente del estado del fluido, Klinkenberg observó que cuando el fluido es un gas, la permeabilidad es función de la presión media, ya que cuando un líquido fluye a través de un medio poroso, las moléculas adyacentes a las paredes quedan inmovilizadas por la fuerza de atracción y en ese punto su velocidad es cero, mientras que cuando fluye un gas, las moléculas adyacentes a las paredes tienen cierta velocidad (por su característica no mojante), que depende en parte del camino libre medio a través de los poros, así Klinkenberg introdujo la siguiente corrección para la permeabilidad medida:

$$k_{\infty} = \frac{k_g}{1 + \frac{b}{\bar{p}}} \quad (2.3)$$

donde k_{∞} es la permeabilidad absoluta de Klinkenberg, k_g es la

permeabilidad del gas medida a la presión $\bar{p}$ y b es un parámetro que muestra la influencia del tamaño de poro y el camino libre medio del gas dentro del espacio poroso. Es importante mencionar, que la corrección a la permeabilidad al gas medida es significativa en el caso de muestras poco permeables a bajas presiones, y que para muestras con alta permeabilidad, la corrección de Klinkenberg es similar tanto a bajas presiones como a altas presiones de gas.

La ecuación de Darcy supone un único fluido circulando a través del medio poroso, pero en la realidad la gran mayoría de los yacimientos contienen al menos agua de formación y petróleo, y en algunos casos existe además gas, entonces el término de permeabilidad debe estar asociado con una de las fases individuales presente, surge así el concepto de *permeabilidad relativa*. La permeabilidad relativa se define como la relación entre la permeabilidad efectiva del fluido individual y la permeabilidad absoluta de la roca, siendo la *permeabilidad efectiva* la permeabilidad de cada fase a saturaciones específicas cuando están presentes dos o más fluidos.

La importancia de estas propiedades físicas de las rocas (porosidad y permeabilidad absoluta) reside en el hecho de que estos parámetros por sí mismos son propiedades fundamentales para la caracterización de cualquier yacimiento, incluyendo la dinámica del reservorio y sus procesos. La permeabilidad parece ser la propiedad más importante para todos los

procesos dinámicos del yacimiento, ya que controla cuando la roca puede transmitir fluidos, mientras que la porosidad tiene influencia en la mayoría de las propiedades físicas (velocidad de ondas elásticas, conductividad eléctrica y térmica, etc.).

2.2.3. Mojabilidad

La tendencia de un fluido a adherirse a una superficie sólida tratando de ocupar la mayor área de contacto posible, en presencia de otro fluido inmiscible se denomina mojabilidad.

En el área de yacimientos, la mojabilidad es la medida de la afinidad de la superficie de la roca por el petróleo o por el agua, determinando así la ubicación relativa de estos dentro del medio poroso. El conocimiento de esta propiedad permite al ingeniero de yacimiento diseñar las estrategias para obtener una mejor recuperación del petróleo.

La mojabilidad de una superficie mineral depende de factores tales como: composición química del crudo, presión, temperatura, naturaleza de las paredes de los poros de las rocas, química del agua (concentración, pH, presencia de iones) y la presencia de componentes activos en la superficie.

Entre las condiciones de mojado se pueden mencionar^[12]:

♦ *Mojabilidad Completa o Uniforme:* Comprende superficies minerales que presentan una afinidad marcada por un fluido. El fluido mojante se distribuye en el espacio poroso entre la superficie de los poros y la fase no mojante.

- ♦ *Mojabilidad Débil:* Considera aquellas superficies minerales que no poseen una afinidad muy marcada por un fluido, pero significativa si se compara con la afinidad hacia otros fluidos. Si el nivel de presión capilar lo permite, los fluidos comparten el espacio poroso separados por interfaces, cuya intersección con la superficie mineral originan un ángulo de contacto.
- ♦ *Mojabilidad Intermedia o Neutra;* Refiere aquellas superficies minerales que no presentan preferencia marcada por algún fluido, presentando también un ángulo de contacto.
- ♦ *Mojabilidad Fraccional:* Considera las rocas en las que una porción es fuertemente mojada por agua y el resto fuertemente mojada al petróleo.
- ♦ *Mojabilidad Mixta:* En este caso las zonas de la roca mojadas por petróleo forman partes continuas a través de los poros grandes, mientras que los poros pequeños permanecen mojados por agua.
- ♦ *Mojabilidad Dalmatiana:* Es un tipo de mojabilidad fraccional a escala de segmento de poro.

Existen diversos métodos para evaluar la mojabilidad de superficies sólidas^[12]. Se tienen métodos que permiten una evaluación cuantitativa a través de la medición de ángulos de contacto y mediante técnicas analíticas de superficie como las espectroscopias de fotoelectrón de rayos X (XPS) y de ion dispersado (ISS)^[14,15,16]; también se dispone de métodos que permiten una evaluación cualitativa, entre estos se pueden mencionar el análisis de las curvas de permeabilidad relativa versus saturación de la fase mojante,

pruebas de imbibición espontánea de agua o petróleo, pruebas de adhesión, medición de tiempo de inmersión/hundimiento, pruebas de avance capilar, etc.

2. 3. Propiedades Eléctricas

Las propiedades eléctricas son propiedades de transporte causadas por el movimiento de carga. Este transporte de carga se lleva a cabo por una variedad de procesos que incluyen migración, difusión y convección.

2.3.1. Mecanismos y Procesos de Transporte

Mientras la mayoría de las propiedades eléctricas están directamente relacionadas al proceso de transporte de carga por sí mismo, bien sea en el medio completo o en la transferencia de cargas entre las intercaras de medios diferentes, algunas propiedades eléctricas, sin embargo, están relacionadas a la distribución de carga inmediatamente antes o después del transporte, o a la acumulación de cargas en las discontinuidades durante el transporte de carga^[17].

En general, los materiales están constituidos por partículas cargadas (moléculas, átomos, electrones, iones, etc.). Cuando una onda electromagnética incide sobre un material y lo atraviesa, las partículas cargadas forman corrientes que modifican la propagación de la onda con respecto a la que tendría en el vacío, originando así tres fenómenos básicos: conducción, polarización y magnetización, estos tres fenómenos están caracterizados por la conductividad (Siemens/m), la permitividad o constante

dieléctrica (faradio/m) y la permeabilidad magnética (Henry/m) respectivamente. Es así, como dependiendo del mecanismo predominante un material puede clasificarse como conductor, dieléctrico o magnético. Estas propiedades son evaluadas mediante tres cantidades físicas: la resistencia, la capacitancia y la inductancia.

2.3.2. Conductividad Eléctrica

La conductividad (σ) es una medida de la facilidad con la que la corriente eléctrica fluye a través del material, numéricamente es expresada como el inverso de la resistividad (ρ). Aquellos cuerpos que permiten el paso de los portadores de carga eléctrica a través de ellos son eléctricamente conductores. Estos portadores pueden ser electrones o iones, por lo que pueden distinguirse dos tipos de conductividad: electrónica e iónica, en este último caso, si el medio no es gaseoso se denominan electrólitos. La tabla 2.1 resume el tipo de conductividad^[18] presente en cada caso.

Tabla 2.1 *Clasificación de los materiales según su conductividad*

CONDUCTIVIDAD	
<i>Electrónica</i>	<i>Iónica</i>
Metales	Electrolitos Sólidos (Dieléctricos)
Semiconductores	Electrolitos Líquidos

La conductividad en los metales puede atribuirse al hecho de que los

electrones de valencia de sus átomos pueden moverse libremente entre la red cristalina que estos forman. Mientras que en los semiconductores la banda de valencia y la banda de conducción están separadas por una *zona prohibida*.

En los cuerpos dieléctricos o aislantes los electrones están fuertemente ligados a los átomos. Esto puede ser debido a que existan enlaces covalentes o enlaces iónicos. En este último caso, la red cristalina forma un electrolito sólido (grupo al cual pertenecen la mayoría de los minerales). Los constituyentes con carga positiva y negativa están ligados mutuamente en un agregado neutro y su movimiento en masa no representa ningún transporte neto de carga. Sin embargo, las fuerzas moleculares que mantienen a las partículas unidas son de naturaleza elástica, y en presencia de un campo eléctrico, las regiones con carga positiva y negativa, tienden a separarse en la dirección del campo, originando en consecuencia una distorsión mecánica y eléctrica.

En el caso de los electrolitos líquidos, los portadores de la corriente eléctrica en las disoluciones acuosas son los cationes y los aniones. Al aplicar un campo eléctrico, estos se dirigen hacia los electrodos respectivos según el signo de su carga, siendo la velocidad de los iones proporcional a la intensidad del campo eléctrico aplicado, así como también depende de la temperatura, la concentración y del tamaño del ion.

2.3.3. Materiales Dieléctricos

Cuando se induce una carga eléctrica a un material y ésta puede permanecer localizada en la región en la que se genera por un período considerable de tiempo, se dice que el material es dieléctrico o aislante.

En un material dieléctrico las fuerzas que producen un campo externo determinan pequeños desplazamientos relativos (en escala atómica) de las cargas de signos opuestos. La extensión de estos desplazamientos depende de la mayor o menor rigidez con la que las cargas estén unidas. Este desplazamiento de cargas en consecuencia a la aplicación del campo externo se denomina polarización. En la tabla 2.2 se presentan los diferentes tipos de polarización.

Tabla 2.2 *Tipos de Polarización.*

TIPO	CARACTERÍSTICAS
Interfacial o de Maxwell-Wagner (<i>MW</i>)	Producida por la acumulación de cargas en las superficies límites o de separación entre materiales diferentes
Electrónica	Originada por el desplazamiento de los electrones de cada átomo con respecto a su núcleo
Iónica	Originada por desplazamientos de los iones respecto de su posición de equilibrio en la red cristalina
Dipolar	Producida por la orientación de las moléculas cuando éstas poseen momento eléctrico permanente y pudiéndose considerar como dipolos (cuerpos paraeléctricos)

Si alguno de los componentes de la roca presenta conductividad apreciable en los límites de sus granos, aparecen polarizaciones interfaciales.

Cuando se aplica a un dieléctrico un campo de frecuencia alta, la reorientación de las moléculas polares o la relajación de las cargas desplazadas no puede seguir en fase la variación del campo, y se produce un retraso entre éste y la polarización. Este desfase es causa de una absorción de energía por parte del dieléctrico.

La constante dieléctrica de las rocas (ε); es función de sus componentes, de la proporción de estos, y del modo en que se agrupan. Mediante esta constante se describe la interacción de la roca con un campo eléctrico que a su vez es función de la frecuencia angular del campo eléctrico aplicado a la roca.

Las propiedades dieléctricas de una roca saturada (agua y petróleo) se expresan mediante la permitividad compleja generalizada $\varepsilon(\omega)$ (ecuación 2.4), la cual puede ser determinada a través de medidas de laboratorio.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_p(\omega) - i \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} \quad (2.4)$$

donde ω es la frecuencia angular del campo eléctrico aplicado a la roca, $i = \sqrt{-1}$ es la unidad imaginaria, $\varepsilon_0 = 8,854 * 10^{-12}$ farad/m es la permitividad al vacío, $\varepsilon_p(\omega)$ es la contribución de todos los efectos de polarización que ocurren, σ_{dc} es la conductividad d.c. del fluido.

El primer término de la ecuación (2.4), $\varepsilon_p(\omega)$, consiste de una parte real y una parte imaginaria y se puede escribir como:

$$\varepsilon_p(\omega) = \varepsilon_p'(\omega) - i\varepsilon_p''(\omega) \quad (2.5)$$

El segundo término de la ecuación (2.4), es una cantidad imaginaria pura, y es la contribución de los iones libres responsables de la conductividad d.c. del fluido.

Para rocas saturadas de agua y petróleo, las polarizaciones tipo electrónicas, atómica y dipolar se activan en el rango de frecuencia entre 100 Hz y 40 MHz, dando una contribución constante a $\varepsilon_p(\omega)$, mientras que la polarización interfacial es un efecto dominante, que depende de la frecuencia. En este trabajo se medirá la constante dieléctrica en un rango de frecuencia entre 50 Hz y 13 MHz, donde la variación de $\varepsilon_p(\omega)$ con la frecuencia depende esencialmente de la polarización de Maxwell-Wagner.

2.3.4. Polarización de Maxwell-Wagner (MW)

En la ecuación (2.4), $\varepsilon_p(\omega)$ describe la interacción de la materia con un campo eléctrico externo. La parte real de $\varepsilon_p(\omega)$ mide cuanta energía del campo eléctrico es almacenada en el material. La parte imaginaria de $\varepsilon_p(\omega)$ es la medida de la disipación o pérdidas en el material respecto al campo eléctrico.

En un sistema heterogéneo, como rocas saturadas con agua o petróleo, donde coexisten la fase conductora y aislante, la polarización interfacial es activada por un campo eléctrico, bajo el cual los iones disueltos en el agua se concentran en las regiones donde las propiedades eléctricas presentan discontinuidades, esto es, en las interfases agua-petróleo o en las paredes de los poros. Esta concentración de cargas produce una

polarización MW. Cuando se retira el campo eléctrico externo, los iones retornan a su distribución aleatoria (Fig. 2.1).

La constante de tiempo que controla el proceso se denomina tiempo de relajación τ , y su recíproco es la frecuencia de relajación que para la polarización MW está en el rango de frecuencias entre 10kHz y 100MHz, dependiendo del tipo de roca, la salinidad del agua y la distribución espacial del agua.

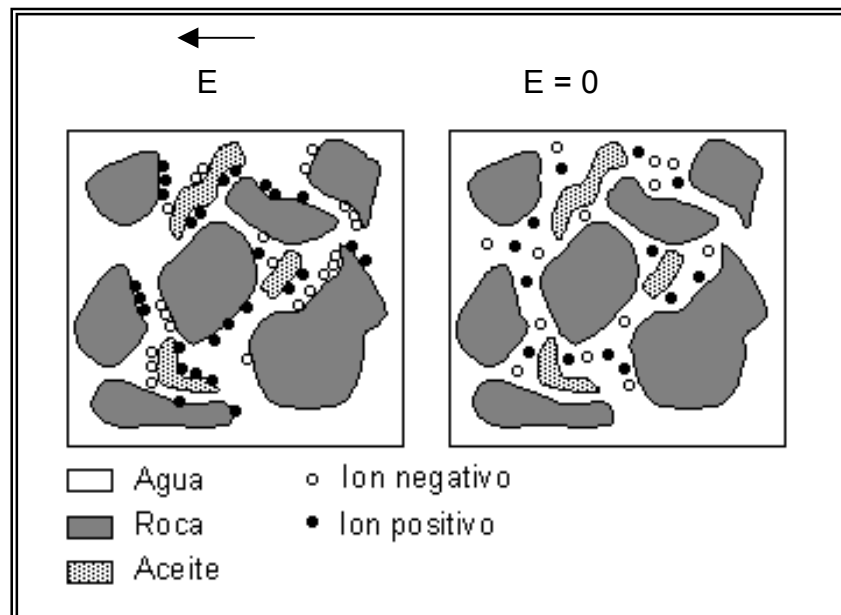


Fig. 2.1 Diagrama de la polarización Maxwell-Wagner en un sistema Petróleo - Agua - Roca a saturación irreducible de agua, asumiendo la condición de mojado al agua.

En la figura 2.2, se muestra la tendencia de ε_p en función de la frecuencia, ω , de un campo eléctrico externo hipotético cuando se activa la polarización MW.

A frecuencias bajas el campo eléctrico alterno es lo suficientemente lento, así que los iones son capaces de seguir las variaciones del campo. Como se supone que la polarización está completamente desarrollada, $\varepsilon'_p(\omega)$ toma su valor máximo y el factor de pérdida $\varepsilon''_p(\omega)$ es directamente proporcional a la frecuencia. Cuando aumenta la frecuencia $\varepsilon''_p(\omega)$ aumenta, pero $\varepsilon'_p(\omega)$ comienza a decrecer debido al desfase entre las fluctuaciones de los iones y el campo eléctrico. Para frecuencia mayores a la frecuencia de relajación, ambos términos $\varepsilon'_p(\omega)$ y $\varepsilon''_p(\omega)$ disminuyen debido a que las variaciones del campo eléctrico son tan rápidas que no influyen la difusión de los iones, desapareciendo así la polarización interfacial.

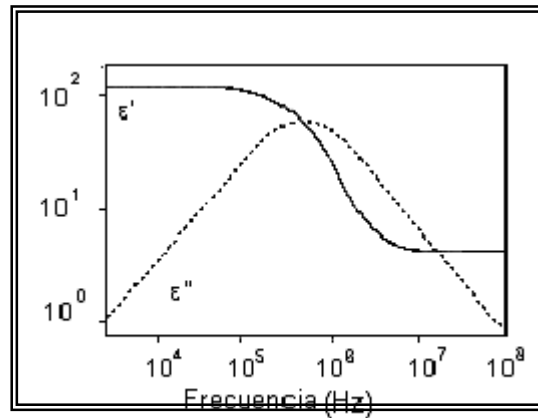


Fig. 2.2 Respuesta en frecuencia del efecto de polarización MW.

La mojabilidad de la roca gobierna la respuesta dieléctrica en el rango de frecuencia de la polarización MW. En este trabajo se estudiará la posible existencia de una relación entre la respuesta dieléctrica de la roca y la mojabilidad de la roca en el rango de frecuencia de la polarización MW debido a las diferentes distribuciones del agua y el petróleo en el espacio

poroso para diferentes saturaciones de fluido, así que se espera encontrar diferentes comportamientos dieléctricos dependiendo de la mojabilidad de la roca.

El modelo más simple de la contribución de la polarización MW a la constante dieléctrica de la roca viene dada por:

$$\varepsilon_p(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + i\omega\tau} \quad (2.6)$$

donde $\Delta\varepsilon$ es la amplitud de relajación, τ el tiempo de relajación y ε_∞ la constante dieléctrica no relajada. Estas cantidades dependen de las propiedades eléctricas y de la distribución espacial de los constituyentes de las fases presentes en la roca.

2.3.5. Modelo de Sillars

Los parámetros, $\Delta\varepsilon$, τ y ε_∞ fueron calculados por Sillars^[19] para un sistema bifásico, consistente de una fase aislante (matriz sólida y petróleo en el caso de las rocas) conteniendo una pequeña cantidad de una fase conductora dispersa (agua), asumiendo que el agua forma pequeñas inclusiones esféricas que eléctricamente no interactúan y que las esferas tiene la misma relación de forma, a/b , donde a y b son los semiejes mayor y menor del cuerpo esférico. Para este modelo propuesto por Sillars los parámetros que aparecen en la ecuación (2.6) vienen dado por:

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_m(\beta - 1) + \varepsilon_w}{\sigma_w} \quad (2.7a)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_m^2 \phi S_w g \beta^2}{\varepsilon_m(\beta - 1) + \varepsilon_w} \quad (2.7b)$$

$$\varepsilon_\infty = \varepsilon_m \left[1 + \frac{(\varepsilon_w - \varepsilon_m) \phi S_w g \beta}{\varepsilon_m(\beta - 1) + \varepsilon_w} \right] \quad (2.7c)$$

donde ε_m es la permitividad de la fase aislante, ε_w y σ_w son la permitividad y la conductividad d.c. del agua, respectivamente, ϕ es la porosidad de la roca, S_w la saturación de agua, β es un parámetro de forma de las inclusiones de agua (para esferas oblatas $\beta = 1$, para inclusiones esféricas $\beta = 3$, para esferas proladas β es mucho mayor), g es un factor relacionado a la orientación isotrópica de las esferas ($g \approx 1$ para $a/b < 10$, $g = 1/3$ para esferas proladas) y $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ farad/m es la permitividad al vacío.

Cuando la roca es mojada al petróleo, el agua ocupa los poros grandes confinada en gotas, así que $\beta = 3$. En las rocas mojadas al agua, el agua ocupa la mayoría de la superficie de la roca, así que $\beta \gg 3$. Si estos valores se sustituyen en la ecuación (2.7b), se tiene que para una misma saturación de agua, la amplitud de relajación, $\Delta\varepsilon$, es mucho mayor en las rocas mojadas al agua, y al introducir estos valores en la ecuación (2.7a) se encuentra que las rocas mojadas al agua tienen tiempos de relajación mayores que aquellas mojadas al petróleo para una misma σ_w .

2.3.6. Modelo de Lysne

Lysne extendió el modelo de Sillars^[1] a un sistema poroso en el que las inclusiones acuosas tienen una distribución dada por el factor de forma β . El resultado se expresa en la ecuación:

$$\varepsilon_p(\omega) = \varepsilon_\infty + \int_0^\infty \frac{\Delta\varepsilon(\tau) d\tau}{1 + i\omega\tau} \quad (2.8)$$

donde $\Delta\varepsilon(\tau)$ es la misma cantidad que aparece en la ecuación 2.6, pero β , g y S_w ahora se refieren a la contribución de las inclusiones con un tiempo característico τ . El modelo de Lysne no supera las limitaciones del modelo de Sillars, pero tiene mayor versatilidad. Por ejemplo, si las fases conductoras presentes tienen diferente conductividad, su contribución se suma a la ecuación (2.8) y $\Delta\varepsilon(\tau)$ representa una distribución general de tiempos de relajación.

2.3.7. Efecto de la Ley de Potencia

Para algunas rocas^[20] no es posible la aplicación de la ecuación (2.4) para describir su comportamiento, en este caso el transporte de carga es modelado por una relación tipo de Ley de Potencias (PL), en la que es necesario agregar términos a la permitividad compleja generalizada para obtener una simulación adecuada de la respuesta eléctrica de la roca, y se expresa como sigue:

$$\varepsilon_{PL}(\omega) = A \frac{(j\omega)^{N-1}}{\varepsilon_0} \quad (2.9)$$

siendo A una constante y N es un parámetro de ajuste ($0 \leq N \leq 1$).

La respuesta tipo Ley de Potencias (PL) es típica de un gran número de sólidos desordenados donde los portadores de carga están débilmente enlazados o confinados dentro de una región de poca movilidad. En estos sistemas, el transporte eléctrico es un proceso discontinuo, debido al salto de cargas de una región de baja movilidad a otra.

Los mecanismos PL indican que tanto las pérdidas como el almacenamiento de energía por el material decrecen con la frecuencia^[3]. Una característica peculiar de los mecanismos PL es que la fase no depende de la frecuencia. Normalmente, en un sistema están presentes dos regímenes que muestran comportamiento PL, un régimen de baja frecuencia ($0 < N < 0,5$) asociado con largos procesos de difusión de carga, y un régimen de alta frecuencia ($0,5 < N < 1$) asociado con mecanismos de conducción de corto rango.

Estudios previos^[1], mostraron que la respuesta dieléctrica de las rocas en el rango de frecuencia entre 100 Hz y 10 GHz puede describirse mediante la superposición de tres términos (ecuación 2.10a): una constante real (ε_∞), una función compleja de la frecuencia ($\varepsilon_{MW}(\omega)$, ecuación 2.10b) que describe la polarización Maxwell-Wagner y una función de ley de potencias compleja ($\varepsilon_{PL}(\omega)$, ecuación 2.10c) asociada con el transporte de cargas.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \varepsilon_{MW}(\omega) + \varepsilon_{PL}(\omega) \quad (2.10a)$$

donde:

$$\varepsilon_{p_{MW}}(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon}{\left[1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right]^{\beta}} \quad (2.10b)$$

$$\varepsilon_{PL}(\omega) = A \frac{(i\omega)^{N-1}}{\varepsilon_0} \quad (2.10c)$$

siendo $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ farad/m la permitividad del vacío y ε_{∞} , $\Delta\varepsilon$, τ , α , β , A y N son parámetros de ajuste. Si los portadores de carga son completamente libres, entonces en la ecuación (2.10c) $N = 0$; en este caso $\varepsilon_{PL}(\omega)$ es una cantidad imaginaria pura y el transporte de carga no es dispersivo. Si los portadores están débilmente enlazados, es decir confinados en zonas limitadas por una barrera de potencial difíciles de superar, entonces $N > 0$ y $\varepsilon_{PL}(\omega)$ tendrá una parte real que será el efecto del factor de almacenamiento $\varepsilon'_p(\omega)$.

2.4. Propiedades Acústicas

Los materiales sólidos continuos como las rocas pueden representarse como cuerpos elásticos con una relación lineal entre los esfuerzos y los desplazamientos^[21].

Numerosos trabajos en mecánica de sólidos^[22,23,24], se enfocaron en obtener estas relaciones lineales, mostrando que las propiedades de los sólidos elásticos, isotrópicos y homogéneos pueden ser especificadas con

las dos constantes de Lamé, λ y μ . También demostraron que las condiciones de equilibrio dinámico en el interior de estos sólidos resulta en la propagación de dos tipos de ondas a partir del punto donde se aplica el desplazamiento inicial.

Estos dos tipos de onda son compresionales y de cizalla viajando respectivamente a dos velocidades características, V_P y V_S :

$$V_P^2 = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \quad (2.11)$$

$$V_S^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.12)$$

donde ρ la densidad del sólido elástico. Estas expresiones corresponden a las velocidades de las ondas P y S si se considera un sistema cerrado. Estas son velocidades de referencia correspondientes a las velocidades límites de las ondas tipo P y S , cuando la frecuencia tiende a cero. En este caso límite cuasi-estático, los efectos de los contrastes de inercia y los efectos disipativos comienzan a ser despreciables.

Considerando coordenadas cartesianas, V_p obedece a la siguiente ecuación de onda escalar en una dimensión^[25]:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.13)$$

donde $\Phi(x \pm V_P t)$, siendo x la dirección de movimiento, es decir la dirección en la que varía el campo escalar Φ . En general, la dirección de movimiento de

las ondas P es perpendicular al frente de onda, pero no siempre. Considerando la ecuación del vector de onda^[25]:

$$\nabla \times \nabla \times \bar{\Psi} + \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

donde una solución es el siguiente potencial vector:

$$\bar{\Psi} = \Psi_x (x - V_S t) \hat{x} + \Psi_y (x - V_S t) \hat{y} + \Psi_z (x - V_S t) \hat{z} \quad (2.15)$$

y el movimiento asociado al vector potencial de onda está dado por:

$$\nabla \times \bar{\Psi} = -\frac{\partial \Psi_z}{\partial x} \hat{y} + \frac{\partial \Psi_y}{\partial x} \hat{z} \quad (2.16)$$

se observa, que para un conjunto de tres campos escalares que varían en la dirección x , el vector potencial de onda $\vec{\Psi}$ genera movimiento sólo en la dirección z y en la dirección y . Estas componentes son transversales a la dirección de variación del campo. En general el movimiento de las ondas S es paralelo (o cercanamente paralelo) al frente de onda, aunque con algunas excepciones.

2.4.1. Parámetros que Afectan las Velocidades de las Ondas

Los resultados de las medidas acústicas en el laboratorio pueden estar influenciadas por parámetros importantes. En la década de los 50, investigadores como Wyllie, Gregory y Gardner^[4] estudiaron las variaciones en las velocidades de las ondas acústicas en el medio poroso como función de la porosidad, la saturación y la presión. Más recientemente, en la década de los 70, los investigadores Nur^[6], Domenico^[8] y Timur^[26], analizaron las

variaciones de la velocidad como función de la presión, de la saturación y la viscosidad del fluido intersticial. A continuación se hará mención a los parámetros que tienen mayor influencia en los resultados de las velocidades de las ondas acústicas en el medio poroso.

a) Presión

Para estudiar la influencia de la presión en los parámetros acústicos, hay que considerar los diferentes tipos de presión. Según el agente que la produce, las presiones pueden ser:

- ♦ *Confinamiento* (p_c), presión ejercida por el medio sobre la muestra.
- ♦ *Poros* (p_p), presión que ejerce el fluido contenido en los poros sobre las paredes del medio.
- ♦ *Efectiva*, o presión diferencial ($p_{eff} = p_c - p_p$)

En general, la velocidad aumenta con la presión de confinamiento y con el diferencial de presión, este aumento se debe esencialmente a los contactos entre granos y a las fracturas presentes en las rocas, encontrándose para las rocas libres de fracturas que la velocidad es independiente de la presión^[11].

b) Saturación

El medio poroso natural está, en general, saturado con fluidos y el conocimiento de la influencia de estos fluidos en las propiedades acústicas es importante para la toma de decisiones en procesos de recuperación.

En el caso de tener una mezcla de dos fases (agua-aire), la velocidad

de las ondas P en rocas saturadas parcialmente, es menor que en rocas secas. En estas a su vez V_P es menor que la velocidad que presentan las rocas saturadas 100% con agua de formación. La explicación es simple, para las ondas P considerando poros esféricos, la introducción de agua en una muestra seca causa un incremento en la densidad originando así una disminución en la velocidad. En contraste, cuando la muestra está completamente saturada, es más difícil comprimir los poros, lo que causa un aumento en la velocidad. Para las ondas S, se asume que el líquido no ejerce ningún efecto en la velocidad, de modo que el efecto observado es básicamente un efecto de densidad^[11].

c) Tipo de Fluido

Más que el tipo de fluido que satura la muestra, la viscosidad del fluido afecta la velocidad de las ondas acústicas, esto se debe a la compresibilidad del fluido, observándose aumento en la velocidad a medida que la viscosidad aumenta.

d) Temperatura

La velocidad posee una dependencia débil con la temperatura, sin embargo hay una serie de factores que pueden causar variación de la velocidad con la temperatura, estos incluyen diferencias en la compresibilidad entre los diferentes elementos de matriz y de diferencias en presiones, cambios en la viscosidad del fluido que satura la roca y cambios de fase.

Así mismo, la variación en la temperatura puede causar un cambio de fase del fluido que satura la muestra (bien sea evaporación o solidificación). En 1978, Timur^[26] observó que en el caso de rocas saturadas con agua, cuando esta se congela la velocidad aumenta. De igual manera diferentes tipos de rocas mostraron un incremento significativo en la velocidad en la fase de transición del agua a vapor. Estos efectos son más fuertes en los materiales poco porosos y permeables.

e) Frecuencia

En medios atenuantes, la velocidad depende ligeramente de la frecuencia, en estos casos se dice que el medio es dispersivo.

Sí se emplea alta frecuencia, se observan efectos de dispersión, entonces la velocidad disminuye con el aumento de frecuencia y la longitud del camino de la onda es mayor, que si suponemos un camino de viaje de la onda directo. Las frecuencias más bajas son ligeramente dispersadas. En conclusión se puede decir que la velocidad varía poco con la frecuencia sí la atenuación es débil, pero la atenuación puede variar significativamente como función de la frecuencia.

f) Amplitud del Esfuerzo

La amplitud del esfuerzo resultante del paso de una onda a través de un medio depende de la amplitud de la onda. Para los esfuerzos de bajas amplitudes utilizados en experimentos sísmicos, la velocidad es independiente del esfuerzo, pero para esfuerzos excesivos hay una serie de

mecanismos involucrados, los cuales son capaces de alterar las propiedades elásticas de los materiales analizados.

Capítulo III. PARTE EXPERIMENTAL

Para este estudio se seleccionaron muestras de rocas con diferentes condiciones de mojado. El proceso experimental llevado a cabo, se representa esquemáticamente en la figura 3.1.

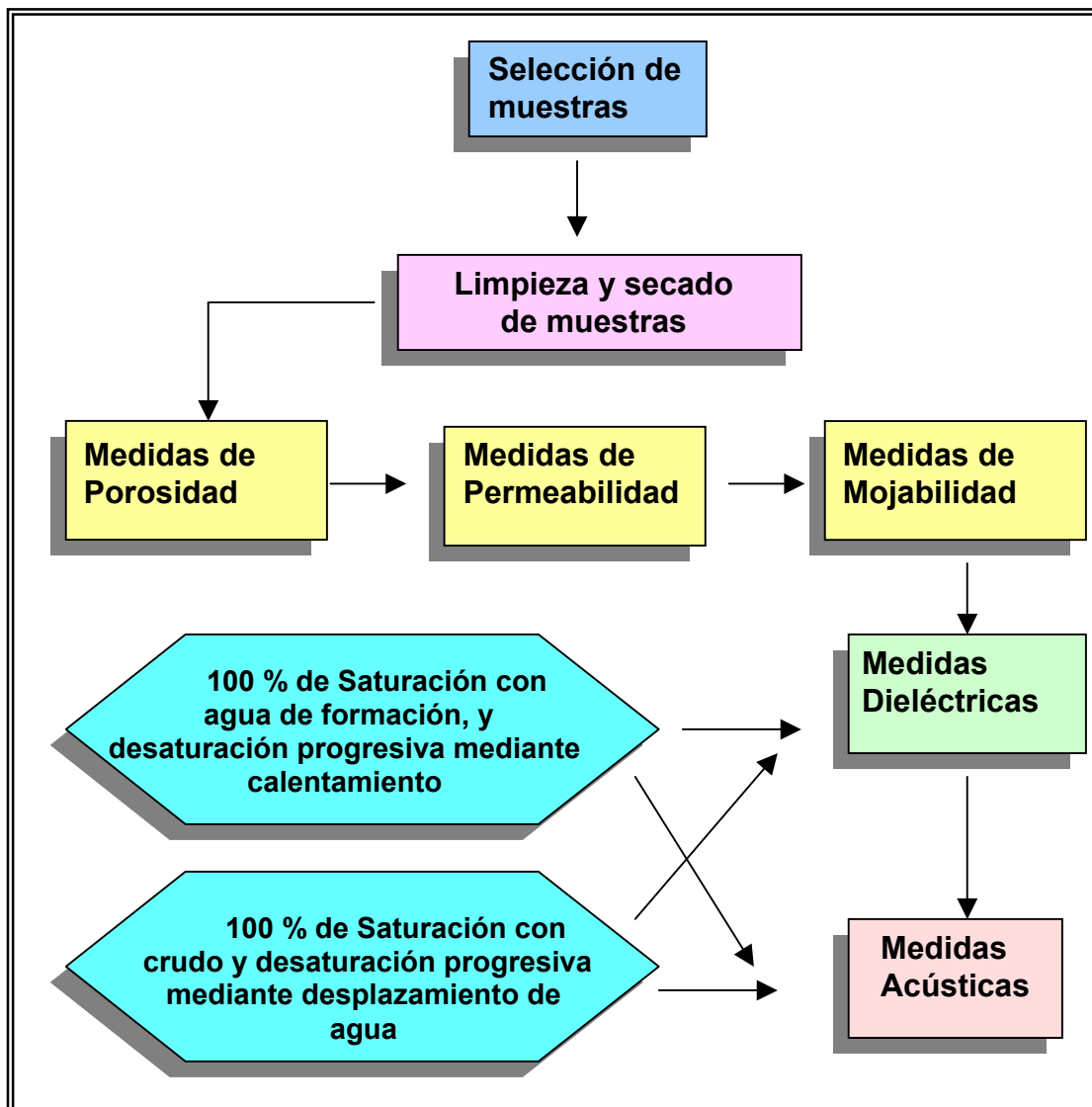


Fig. 3.1 Representación esquemática del procedimiento experimental.

3.1. Limpieza de Muestras

Previo a las pruebas experimentales, las muestras se limpiaron utilizando el método convencional de Destilación-Extracción^[12]. Este método consiste en colocar las muestras en un equipo denominado Dean-Stark o Soxhlet (Fig. 3.2) que consta de un balón aforado que contiene un solvente (en este caso Tolueno para eliminar crudo y Metanol para eliminar sales), una celda de vidrio donde está contenida la muestra conectado al balón (parte inferior) y al sistema condensador (parte superior) que consta de un canal por la cual circula el agua permitiendo así la condensación de gases.

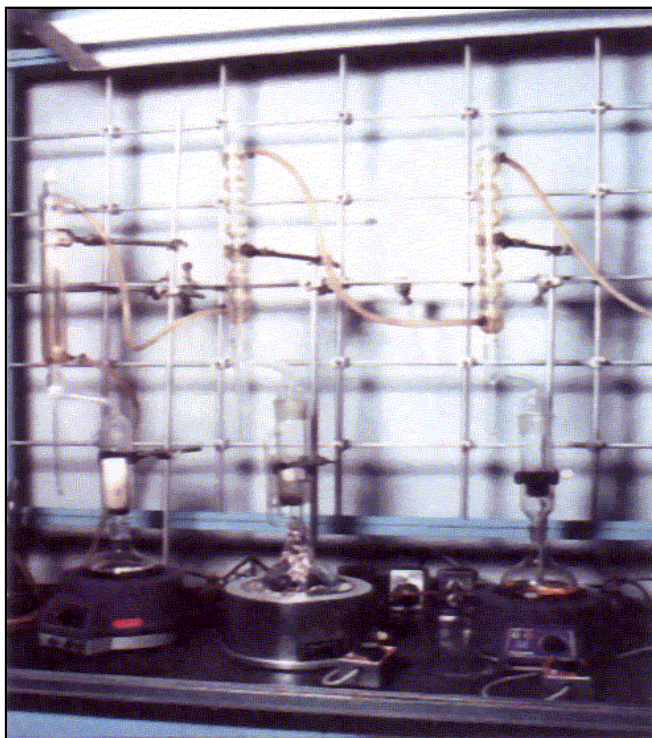


Fig. 3.2 Sistema Dean-Stark.

El proceso de limpieza se realiza mediante reflujo con un solvente caliente (tolueno o metanol) y finaliza cuando el líquido de reflujo es cristalino.

Una vez que las muestras están limpias, se les deja por un lapso de ocho horas en un horno para permitir la evaporación de restos de solventes.

3.2. Medidas de Porosidad

La porosidad y permeabilidad al aire (Klinkenberg) de los núcleos utilizados en este estudio, se midieron utilizando el porosímetro convencional de Helio CMS 300 de la Compañía Core Laboratories, Inc. Este equipo puede medir la permeabilidad en el rango entre 0,001 md hasta 5000 md y volúmenes en el rango de 0,02 cc hasta 25 cc.

El volumen poroso fué determinado por el método de la expansión de gas, donde el núcleo es presurizado con helio y se deja estabilizar esta presión. Luego el helio se expande en una cámara de volumen conocido y se deja estabilizar la presión. Usando la Ley de Boyle se determina la porosidad y mediante el uso de la técnica de la presión transeúnte de Falloff ^[27] se determina la permeabilidad.

3.3. Medidas de Permeabilidad Absoluta

La permeabilidad absoluta de las muestras fue determinada con un Permeámetro de Perfil (Modelo PDPK-400 de Core Laboratories, Fig. 3.2), cuyo principio de medición está basado en la medida de gradientes de

presión. Es un equipo de alta precisión, reproducibilidad y rápido manejo. Permite medir permeabilidades entre 0,001 y 30 Darcys.

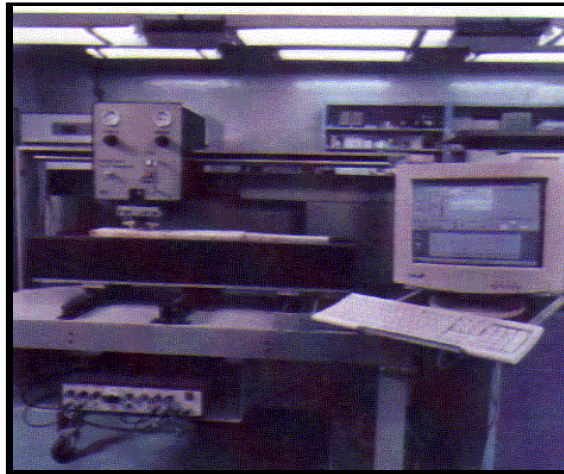


Fig. 3.3 *Permeámetro de Perfil PDPK – 400.*

3.4. Medidas de Mojabilidad

Previo a la preparación de las muestras para las medidas dieléctricas se determinó la condición de mojado de las mismas empleando dos métodos.

3.4.1. Método de Amott - Harvey

Este método permite inferir la mojabilidad de las rocas de yacimiento, combinando la imbibición espontánea con desplazamiento forzado, basándose en el hecho de que un fluido mojante será imbibido en forma espontánea, desplazando a otro no mojante.

Para llevar a cabo esta prueba, es necesario saturar las muestras de rocas con agua de formación y posteriormente centrifugarlas en petróleo

mineral hasta alcanzar la saturación irreducible de agua S_{wi} . La prueba consiste en cuatro pasos:

a) Se sumerge la muestra en agua de formación y se mide el volumen de petróleo, V_{osp} , desplazado en forma espontánea por imbibición de agua de formación.

b) Se centrifuga la muestra en agua de formación hasta alcanzar la saturación residual de petróleo S_{or} , y se mide el volumen de petróleo desplazado, V_{od} .

c) Se sumerge la muestra en petróleo mineral y se mide el volumen de agua de formación, V_{wsp} , desplazado en forma espontánea mediante imbibición de petróleo.

d) Se centrifuga la muestra en petróleo hasta alcanzar la saturación irreducible de agua y medir la cantidad de agua desplazada, V_{wd} .

Los resultados de la prueba se expresan mediante tres índices.

- Un índice de mojabilidad al agua definido por:

$$\delta_w = \frac{V_{osp}}{V_{osp} + V_{od}} \quad (3.1)$$

- Un índice de mojabilidad al petróleo definido por:

$$\delta_o = \frac{V_{wsp}}{V_{wsp} + V_{wd}} \quad (3.2)$$

- Un índice de mojabilidad neutra definido por:

$$\delta_w + \delta_o + \delta_n \equiv 1 \quad (3.3)$$

Según el valor de los índices anteriores se puede determinar la mojabilidad de la muestra de roca (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Definición de los índices de mojabilidad.

MOJABILIDAD	CONDICIONES		
Fuerte al agua	$0,7 \leq \delta_w \leq 1$	$0 \leq \delta_o \leq 0,3$	
Fuerte al aceite	$0 \leq \delta_w \leq 0,3$	$0,7 \leq \delta_o \leq 1$	
Débil al agua	$0,3 \leq \delta_w \leq 0,7$	$0 \leq \delta_o \leq 0,3$	
Débil al aceite	$0 \leq \delta_w \leq 0,3$	$0,3 \leq \delta_o \leq 0,7$	
Neutra	$0 \leq \delta_w \leq 0,3$	$0 \leq \delta_o \leq 0,3$	$0,7 \leq 1 - \delta_w - \delta_o$
Intermedia	$0 \leq \delta_w \leq 0,3$	$0 \leq \delta_o \leq 0,3$	$0,4 \leq 1 - \delta_w - \delta_o \leq 0,7$
Fraccional	$0,3 \leq \delta_w \leq 0,7$	$0,3 \leq \delta_o \leq 0,7$	

Una representación triangular de los índices de mojado (Fig. 3.4) permite identificar las diversas condiciones de mojado, en especial la mojabilidad neutra, intermedia y fraccional que son de gran impacto técnico en la recuperación del petróleo.

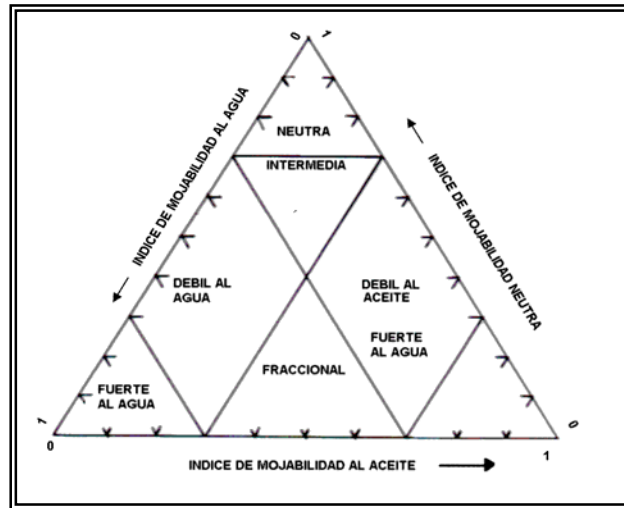


Fig. 3.4 Representación triangular de los índices de Amott.

3.4.2. Técnicas Analíticas de Superficie

La finalidad de la aplicación de técnicas analíticas de superficie, tales como la espectroscopia de fotoelectrón de Rayos X (XPS), es la determinación del análisis elemental de la superficie de la roca^[14]. La observación en el espectro XPS de ciertos picos de energía de enlace puede tomarse como indicativo de la presencia de especies elementales particulares en la superficie. Adicionalmente, la posición exacta de los picos permite indicar el estado químico de algunos de estos componentes. Es así como la XPS es útil en la caracterización cuantitativa de las capas más externas de la superficie de un sólido.

En el área de yacimientos la aplicación de XPS a las rocas, muestra que el contenido de carbono, pueden relacionarse a la mojabilidad de la roca^[28,29]. Si el contenido de carbono del tipo C-H es mayor 39% indica una superficie porosa mojada al petróleo, mientras que para contenido de C-H menor al 28% se asocia a una superficie mojada al agua. Para un contenido de C-H en el rango entre 28% y 38% se tienen las superficies con mojabilidad fraccional, neutra o intermedia. Una muestra que exhibe un contenido de C-H relativamente alto en el rango intermedio puede presentar mojado fraccional si el análisis XPS de la muestra revela un contenido significativo de Si-O de no ser así, la muestra puede ser mojada intermedia o neutra. Además, si la muestra presenta un contenido de C-H relativamente bajo en el rango intermedio podría tener mojabilidad fraccional siempre que el análisis XPS indique un contenido significativo de Si-CH, en caso contrario

la muestra será neutra o de mojabilidad intermedia.

3.5. Fluidos Empleados

Una vez realizados los análisis convencionales y especiales, se procedió a saturar las muestras con agua de formación, en el caso de establecer en la roca un sistema agua-aire; o saturarlas con crudo proveniente del pozo Ful-13, para el sistema agua-crudo. En la tabla 3.2 se presentan los fluido empleados con la roca correspondiente.

Tabla 3.2 *Fluido empleado en cada muestra estudiada.*

MUESTRA	FLUIDO
1	Aqua destilada 5000 p.p.m. NaCl
2	Agua de formación del pozo Ful-13
3	Agua destilada 5000 p.p.m. NaCl
4	Agua destilada 20000 p.p.m. NaCl

Tabla 3.3 *Compuestos empleados en la preparación de un litro de agua de formación del pozo Ful-13.*

COMPUESTO	MASA (g) $\pm 0,001$ g
NaCl	13,497
KCl	0,160
CaCl ₂	0,249
MgCl ₂ x 6H ₂ O	0,050
NaHCO ₃	1,722
Na ₂ CO ₃	0,795
Na ₂ SO ₄	0,429

Para la preparación de un litro de agua de formación, se utilizan las sales según cantidades reportadas en la tabla 3.3. Las cantidades de cada

compuesto se añaden a un litro de agua destilada previamente tratada con gas CO_2 para evitar la precipitación de sales.

3.6. Medidas Dieléctricas

Para realizar las medidas dieléctricas, se empleó un analizador de impedancias modelo HP 4192. En la figura 3.5 se muestra una foto del equipo utilizado, así como también un esquema del circuito equivalente.

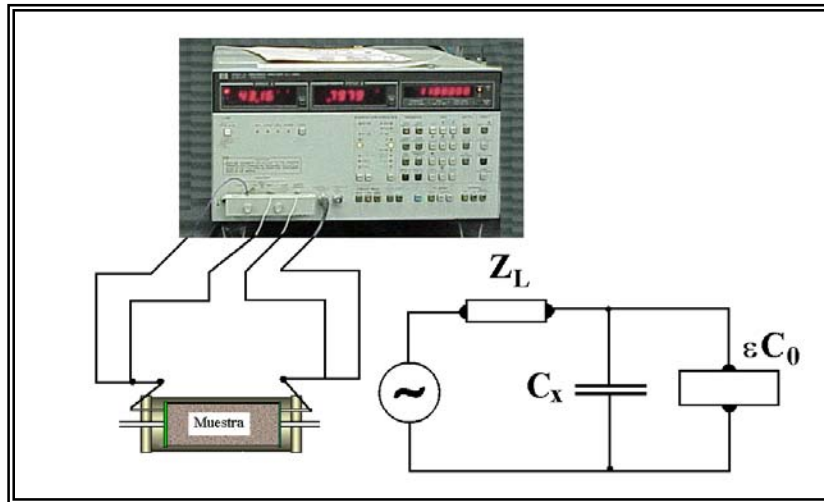


Fig. 3.5 Analizador de Impedancias modelo HP 4192A.

En el equipo, la muestra se coloca entre dos topes metálicos, formando así un condensador. El analizador permite variar de manera automática el rango de frecuencia y obtener las lecturas de la impedancia Z y el ángulo θ de su fase, la resistencia R y la capacitancia C equivalentes del circuito.

La constante dieléctrica compleja de las muestras de rocas fue calculada en el rango de frecuencias entre 50 Hz y 13 MHz a partir de las medidas de

impedancia según la siguiente ecuación^[5]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{Y_c(\omega) - Y_o(\omega)}{i\omega C_o} \quad (3.4)$$

donde la admitancia $Y_c(\omega)$ es el inverso de la impedancia cuando los topes contienen la muestra, y viene dado por:

$$Y_c(\omega) = Y_c \cos(\theta_c) + iY_c \sen(\theta_c) \quad (3.5)$$

mientras $Y_o(\omega)$ es la admitancia del circuito cuando no está la muestra colocada entre los topes, y se escribe como:

$$Y_o(\omega) = Y_o \cos(\theta_o) + iY_o \sen(\theta_o) \quad (3.6)$$

si se sustituyen las ecuaciones (3.5) y (3.6) en la ecuación (3.4), se obtiene:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{[Y_c \cos(\theta_c) + iY_c \sen(\theta_c)] - [Y_o \cos(\theta_o) + iY_o \sen(\theta_o)]}{i\omega C_o} \quad (3.7)$$

de la definición de la constante dieléctrica compleja general :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + \varepsilon''(\omega) \quad (3.8)$$

según la ecuación (3.7), se tiene:

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \frac{Y_c \sen(\theta_c) - Y_o \sen(\theta_o)}{\omega C_o} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{Y_c \cos(\theta_c) - Y_o \cos(\theta_o)}{\omega C_o} \quad (3.10)$$

Conocidos ε' y ε'' , se procede a graficarlas en función de la frecuencia para valores de saturación de agua determinados (en ambos sistemas: agua-aire, agua-crudo) en cada muestra, así como también graficar ε' y ε'' en función de la saturación de agua para frecuencias determinadas (en ambos sistemas agua-aire, agua-crudo), con el fin de observar la dependencia de los parámetros calculados con la saturación de agua y con la frecuencia, y encontrar una correlación estos parámetros y la mojabilidad de la roca.

La desaturación de la muestra se logra en el primer caso con calentamiento de la muestra por un lapso de 15 minutos a 40° C, mientras que para el sistema agua-crudo la muestra saturada en crudo se introdujo en una celda de desplazamiento de crudo mediante agua registrándose el valor de saturación cada vez que la muestra perdía un volumen determinado (medido en gotas) de crudo. En ambos casos no se obtiene un valor exacto de la saturación.

3.7. Medidas Acústicas

Previo a la realización de las medidas acústicas, se realizó corte y pulitura de las muestras de modo de garantizar extremos perfectamente paralelos. Luego que están secas las muestras se saturan con el agua de formación correspondiente (para el sistema agua-aire), y con el crudo del

pozo Ful-13 (para el sistema agua-crudo). La desaturación se logra de modo similar al proceso anterior.

El sistema utilizado para las medidas es de alta calidad y está diseñado para medir velocidades de onda ultrasónicas en núcleos de rocas como función de la presión de confinamiento y la presión del fluido en los poros. En la figura 3.6 se muestra una vista general del equipo.

El sistema posee un conjunto de transductores receptores y transmisores capaces de propagar una onda tipo P y dos ondas transversales polarizadas S1 y S2 a través de la muestra confinada bajo presión de confinamiento. Las direcciones de vibración de las dos ondas transversales se orientan 90° una respecto a la otra, facilitando la medición de la anisotropía sísmica. En este trabajo se realizarán medidas para dos valores de presión de confinamiento 3000 psi y 6000 psi a una presión de fluido en el poro constante de 1500 psi. Las velocidades se calculan a partir de los tiempos de llegada de los pulsos medidos para cada tipo de onda. Previo a la medida de los tiempos de llegada para el sistema con la muestra, se realiza la medida de estos tiempos colocando los transductores extremo con extremo. Luego la diferencia entre los tomados con la muestra incluida y estos últimos, dará el tiempo de viaje de la onda a través de la muestra.

Suponiendo un medio donde cada onda viaja a velocidad constante, se calcula la velocidad de la onda mediante la siguiente expresión de

cinemática:

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.11)$$

donde L es la longitud de la muestra y t el tiempo de tránsito de la onda a través de la muestra.



Fig. 3.6 *Equipo de Ultrasonido.*

Básicamente el equipo consta de tres componentes principales:

- ♦ Celda de presión, diseñada para generar y mantener presiones de hasta 10000 psi.

- ♦ Transductores ultrasónicos, consistentes de cristales de recepción y transmisión.
- ♦ Hardware de control electrónico, permite controlar la presión del fluido, la presión de confinamiento y seleccionar la onda a estudiar.

Adicionalmente posee dos componentes para visualizar y procesar los datos:

- ♦ Un osciloscopio Le Croy modelo 9400A, donde se puede observar la forma de la onda.
- ♦ Computador usado para procesar los datos.

En el siguiente capítulo se reportan los resultados obtenidos.

Capítulo IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis Convencionales

Los resultados de los análisis convencionales de porosidad (ϕ), volumen poroso V_p , permeabilidad al aire k_a y permeabilidad de Klinkenberg k_l , se reportan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 *Resultados análisis convencionales*

MUESTRA	$V_p \pm 0,02$ (cc)	$\phi \pm 0,1$ (%)	$k_a \pm 0,1$ (mD)	$k_l \pm 0,1$ (mD)
1	10,46	19,7	283,5	269,5
2	6,42	11,3	405,8	388,3
3	10,38	20,4	423,8	405,2
4	1,92	8,8	1,6	1,2

Las muestras analizadas presentan porosidades entre 8,8% y 20,4% y permeabilidades al aire entre 283,5 mD y 423,8 mD con la excepción de la muestra 4 que es un carbonato, que presenta una permeabilidad al aire muy baja de 1,63 mD y además tiene bajo volumen poroso.

4.2. Análisis Especiales

En la tabla 4.2, se reportan los volúmenes medidos al aplicar el método de Amott-Harvey para determinar la mojabilidad de las muestras (con excepción de la muestra 4, la cual fue sometida al análisis XPS debido a su baja permeabilidad y bajo volumen poroso) y el volumen desplazado para calcular la saturación irreducible de agua. Esta saturación se calcula

empleando la expresión:

$$\%S_{wi} = \frac{V_p - V_d}{V_p} * 100 \quad (4.1)$$

donde V_p corresponde al volumen poroso de la muestra y V_d es el volumen desplazado de agua de formación al introducir las muestras en la máquina centrífugadora durante una hora a 2000 r.p.m.

Tabla 4.2 Volúmenes medidos.

MUESTRA	$V_{osp} \pm 0,1$ (ml)	$V_{od} \pm 0,1$ (ml)	$V_{wsp} \pm 0,1$ (ml)	$V_{wd} \pm 0,1$ (ml)	$V_d \pm 0,1$ (ml)
1	2,0	0,1	0,2	3,5	6,4
2	0,1	0,2	0,1	0,1	3,9
3	2,2	0,1	0,1	2,5	6,3

En la Tabla 4.3 se reportan los valores de los índices de Amott-Harvey y la saturación irreducible de agua. Estos parámetros fueron calculados mediante las ecuaciones (3.1), (3.2), (3.3) y (4.1), respectivamente.

Tabla 4.3 Indices de Amott – Harvey y saturación irreducible de agua.

MUESTRA	δ_w	δ_o	δ_n	$\% S_{wi}$
1	0,95	0,05	0,00	38,0
2	0,33	0,50	0,17	39,0
3	0,96	0,04	0,00	39,0

La representación triangular de los índices de Amott-Harvey para las muestras en estudio se observa en la figura 4.1

La determinación de la mojabilidad de la muestra 4, se realizó mediante

XPS (véase apéndice H), la muestra presentó 47,88% de contenido de carbono del tipo C-H, lo que indica que la muestra 4 tiene mojabilidad fuerte al petróleo.

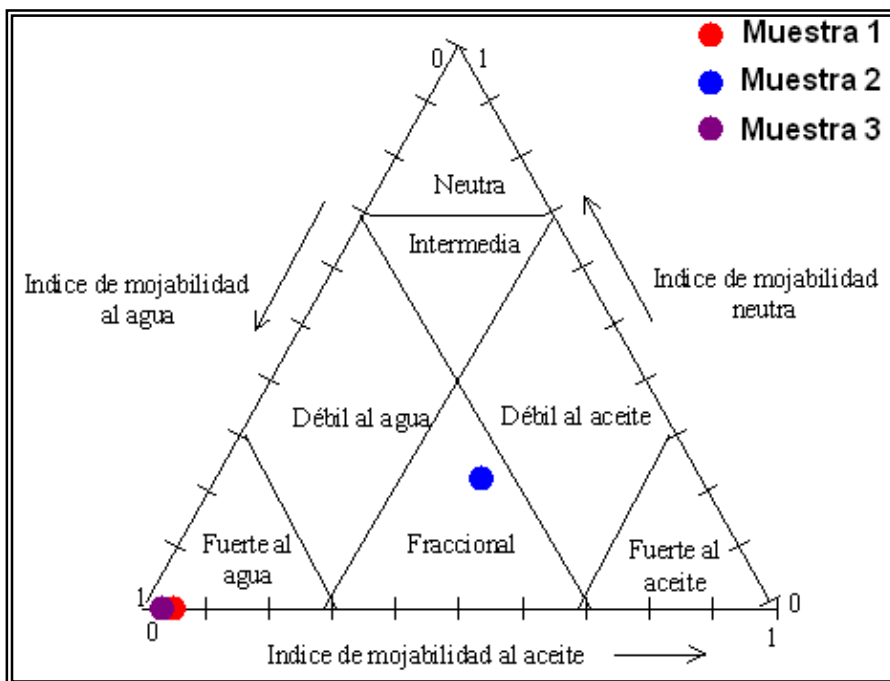


Fig. 4.1 Representación triangular de los índices de Amott-Harvey para las muestras en estudio.

En la tabla 4.4 se reporta la mojabilidad de las muestras estudiadas, observándose tres condiciones diferentes.

Tabla 4.4 Mojabilidad de las muestras

MUESTRA	MOJABILIDAD
1	Fuerte al agua
2	Fraccional
3	Fuerte al agua
4	Fuerte al crudo

4.3. Medidas Dieléctricas

Se estudió la dependencia de la permitividad dieléctrica con la frecuencia para determinados valores de saturación. Posteriormente se evaluó la dependencia de la permitividad dieléctrica con la saturación, considerando en ambos casos el sistema agua-aire y el sistema agua-crudo.

4.3.1. Dependencia de la Permitividad Dieléctrica con la Frecuencia

a) *Sistema Agua-Aire*

Se realizó un estudio del comportamiento de las dos componentes (ϵ' y ϵ'') de la permitividad dieléctrica con la frecuencia para las rocas con distinta condición de mojado, para un valor de saturación de agua determinado. El rango frecuencia barrida comprende 10 KHz-13 MHz.

A las curvas obtenidas para la componente real de la permitividad se les realizó un ajuste según la ecuaciones (2.10a), (2.10b) y (2.10c). Los parámetros de ajuste obtenidos se reportan en el apéndice E.

La figura 4.2, muestra las componentes de la permitividad dieléctrica para $S_w = 100$ (en el Apéndice D se muestran las gráficas ϵ' y ϵ'' para $S_w = 80\%$, $= 50\%$ y $S_w = 40\%$).

De los resultados mostrados en la figura 4.2, se observa que las magnitudes obtenidas para la parte imaginaria (ϵ'') de la permitividad son mayores que las obtenidas para la parte real (ϵ'). Es evidente la dependencia exponencial de las componentes de la permitividad con la

frecuencia, observándose que la dependencia es más acentuada para las muestras de mojabilidad fuerte al agua (M1) y de mojabilidad fraccional (M2), para las que se observa una disminución drástica de la permitividad a bajas frecuencias, este efecto se asocia a la conductividad de los iones presentes en el agua de formación.

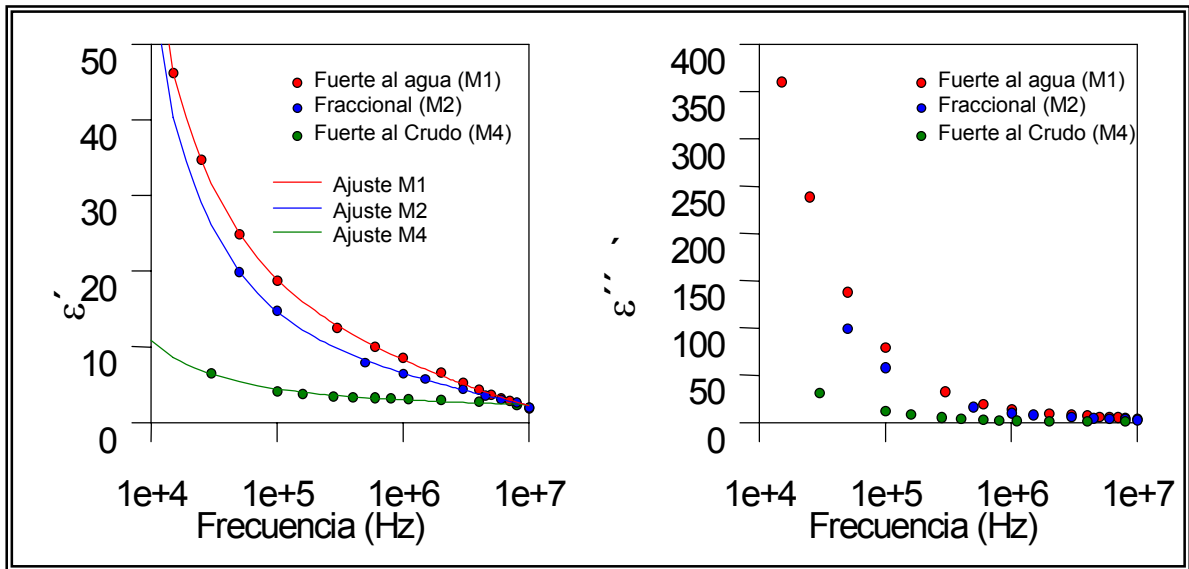


Fig. 4.2 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_w = 100\%$

Para la muestra con mojabilidad fuerte al crudo (Muestra 3, M3), esta dependencia es más débil. Esto indica que existe una diferencia entre los comportamientos de las rocas según su mojabilidad. La muestra de mojabilidad fuerte al agua (Muestra 1, M1) presenta valores de permitividad mayores a los obtenidos para los otros dos tipos de muestras. La muestra de mojabilidad fraccional (Muestra 2, M2) presenta valores de permitividad comprendidos entre los valores de la permitividad para la muestra mojada al agua y la muestra mojada al crudo. Estas diferencias en los comportamientos

asociadas a la mojabilidad son originadas por las posibles distribuciones de los fluidos dentro del medio poroso.

Para frecuencias mayores a 1 MHz se observa un solapamiento de los valores de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica. Esta tendencia también se presenta para la componente real de la permitividad para las frecuencias más altas (10 MHz) del rango medido.

En la figura 4.3, se muestra la gráfica de la dependencia de las componentes de la permitividad dieléctrica con la frecuencia para dos muestras con mojabilidad fuerte al agua con $S_w = 100\%$. Se observa que ambas muestras presentan respuesta dieléctrica similar.

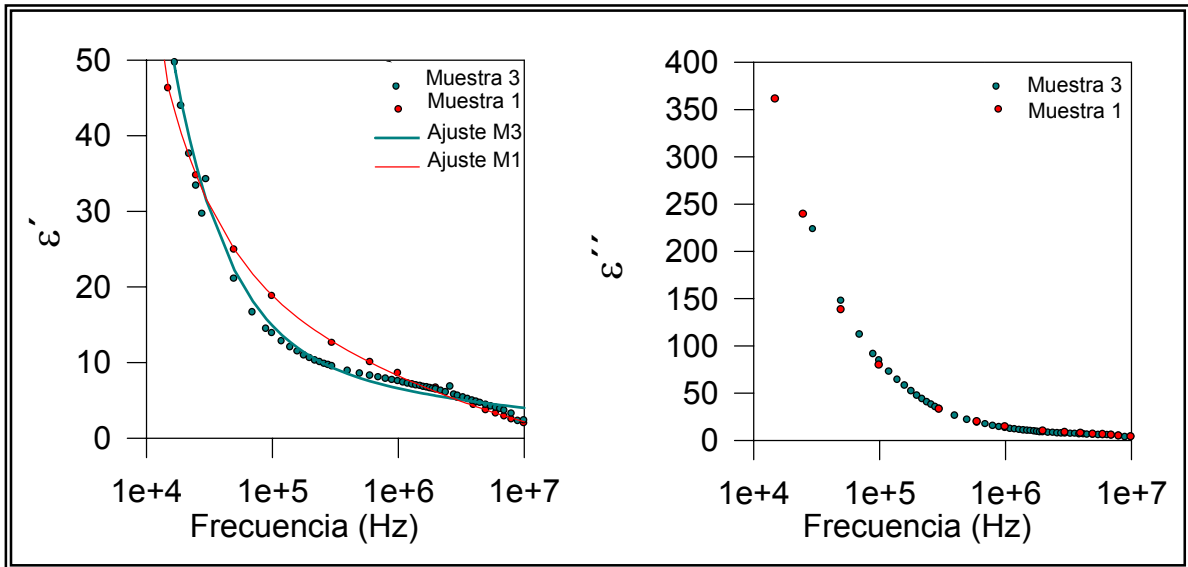


Fig. 4.3 Componentes de la permitividad dieléctrica para dos muestras de mojabilidad fuerte al agua con $S_w = 100\%$.

En la figura 4.4, se presentan las gráficas de las componentes de la permitividad para las muestras en estudio para $S_w = 60\%$. Se observa que los

valores de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica son un orden de magnitud mayor a los obtenidos para la componente real, similar al comportamiento observado en las muestras totalmente saturadas con agua, así como también se evidencia una marcada dependencia de los valores de ϵ' y ϵ'' con la frecuencia para aquellas menores a 1MHz.

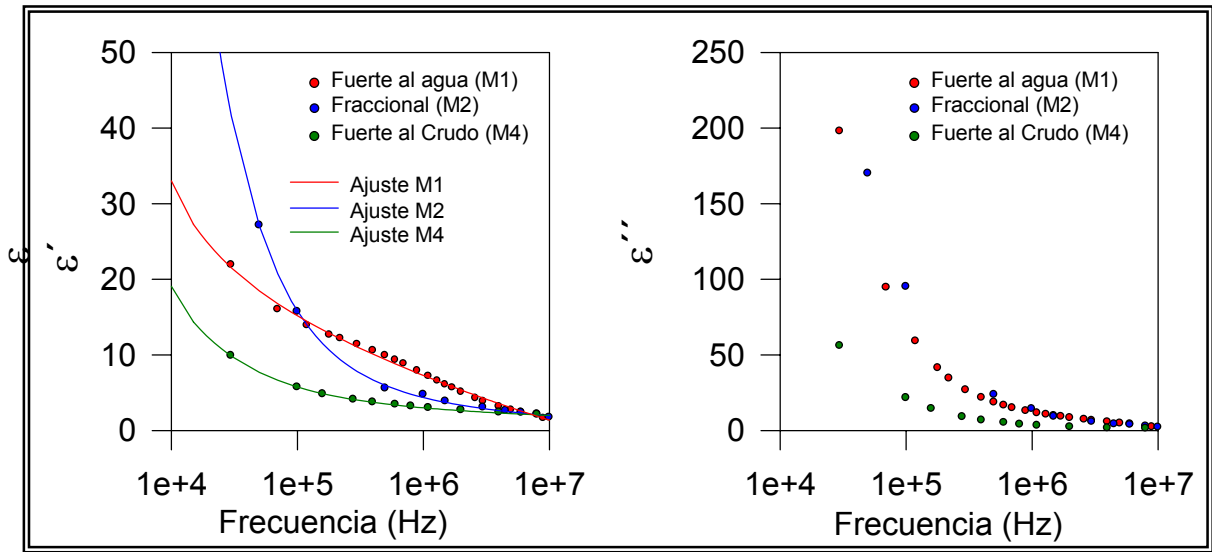


Fig. 4.4 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_W = 60\%$.

En el caso de la muestra con mojabilidad fraccional sus valores de permitividad (ϵ' y ϵ'') se hacen comparables a los valores obtenidos para la muestra con mojabilidad fuerte al agua, respectivamente. Para ambas componentes de la permitividad se observa solapamiento de las curvas a altas frecuencias.

En la figura 4.5 se puede observar que con la disminución de la saturación de agua, la muestra con mojabilidad fraccional presenta un comportamiento similar al de la muestra con mojabilidad fuerte al agua, de

este comportamiento se infiere que debido a la disminución de la concentración de agua en las muestras, la disminución de los iones libres para la conducción ocasiona que la respuesta para estas dos muestras sea similar.

Para 30% de saturación de agua se mantiene la marcada dependencia de las componentes de la permitividad con la frecuencia (frecuencia < 1 MHz). Esta tendencia es menos importante para los valores de ϵ'' en la muestra de mojabilidad fuerte al crudo.

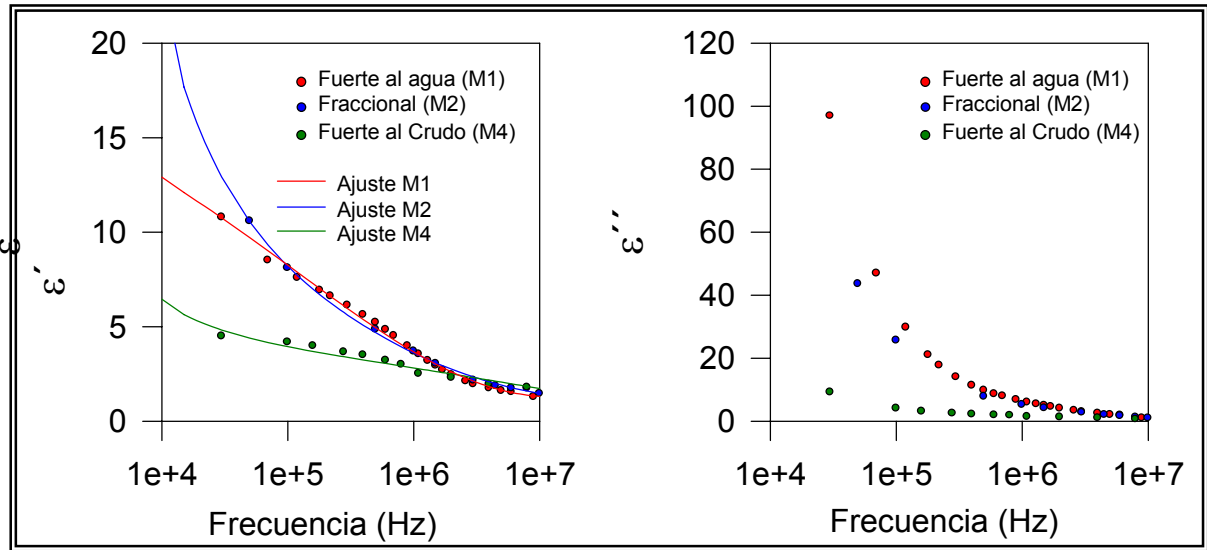


Fig. 4.5 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_w = 30\%$.

Los valores de ϵ' y ϵ'' para la muestra de mojabilidad fuerte al crudo siguen siendo menores a los obtenidos para las otras dos muestras.

Se observa un solapamiento de las curvas de las tres muestras, para cada componente de la permitividad, para frecuencias alrededor de 1 MHz. Además se mantiene la tendencia de los valores de ϵ'' con un orden de

magnitud mayor que los valores de ϵ' . Sin embargo, es importante destacar la disminución de los valores de ϵ' y ϵ'' con la saturación de agua.

b) Sistema Agua-Crudo

Las muestras en estudio fueron saturadas en crudo y posteriormente se realizó desplazamiento de crudo por agua, de manera de obtener diferentes valores de saturación de crudo (S_o). Esto permitió el estudio del comportamiento de las dos componentes (ϵ' y ϵ'') de la permitividad dieléctrica con la frecuencia para diferentes valores S_o .

Para las muestras de mojabilidad fuerte al agua y fraccional se empleó un sistema automatizado de adquisición de datos para las medidas de impedancia, resistencia y capacitancia, el cual estaba conectado al equipo analizador de impedancia, esto permitió un barrido en frecuencia desde valores muy bajos de frecuencias (5 Hz).

En la figura 4.6, se muestran los gráficos para ϵ' y ϵ'' con $S_o = 100\%$. Se observa solapamiento de las curvas correspondientes a las muestras de mojabilidad fuerte al agua y fraccional respectivamente. Es de notar la marcada diferencia de los comportamientos y valores de estas curvas con los obtenidos para las curvas correspondientes a la muestra de mojabilidad fuerte al crudo, la cual presenta valores mayores de ϵ' y ϵ'' a esta saturación.

En la gráfica de ϵ' se observa que a medida que aumenta la frecuencia, las curvas de las muestras de mojabilidad fraccional y fuerte al agua tienden

a un valor mínimo (≈ 1), mientras que la curva de la muestra de mojabilidad fuerte al crudo tiende a un mínimo (≈ 1.5).

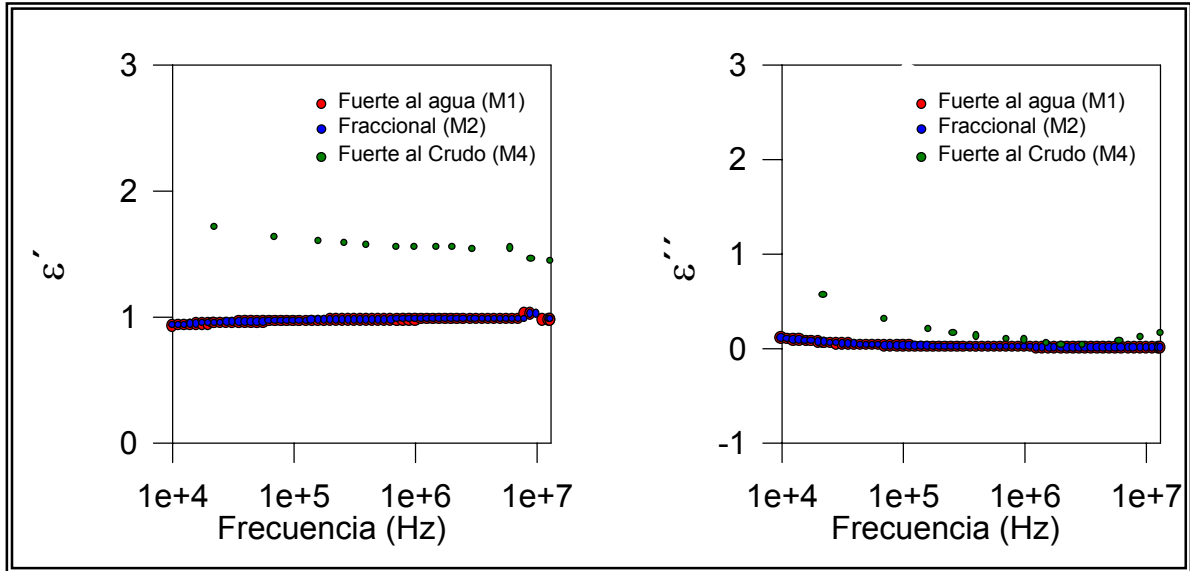


Fig. 4.6 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_o = 100\%$.

En la gráfica de ε'' , se evidencia dependencia con la frecuencia siendo más drástica para la muestra de mojabilidad fuerte al crudo pues se presenta en todo el rango de frecuencia medido, mientras para el resto de las muestras se observa este efecto sólo para bajas frecuencias (<100 KHz), tendiendo el valor de esta componente a cero. De las gráficas se puede ver que los valores de ε' son mayores que los obtenidos para ε'' .

En la figura 4.7 se muestran las gráficas de ε' y ε'' para $S_o = 80\%$, donde se observa solapamiento de las curvas correspondientes a las muestras de mojabilidad fraccional y fuerte al agua para ambas componentes de la permitividad.

En la gráfica de ε' se puede ver que ésta componente de la permitividad

disminuye drásticamente con la frecuencia para la muestra de mojabilidad fuerte al crudo (M3), tendiendo a un valor mínimo, próximo a 1,4 para las frecuencias altas, mientras que para las otras dos muestras a bajas frecuencias (< 100 KHz) hay una dependencia leve con la frecuencia.

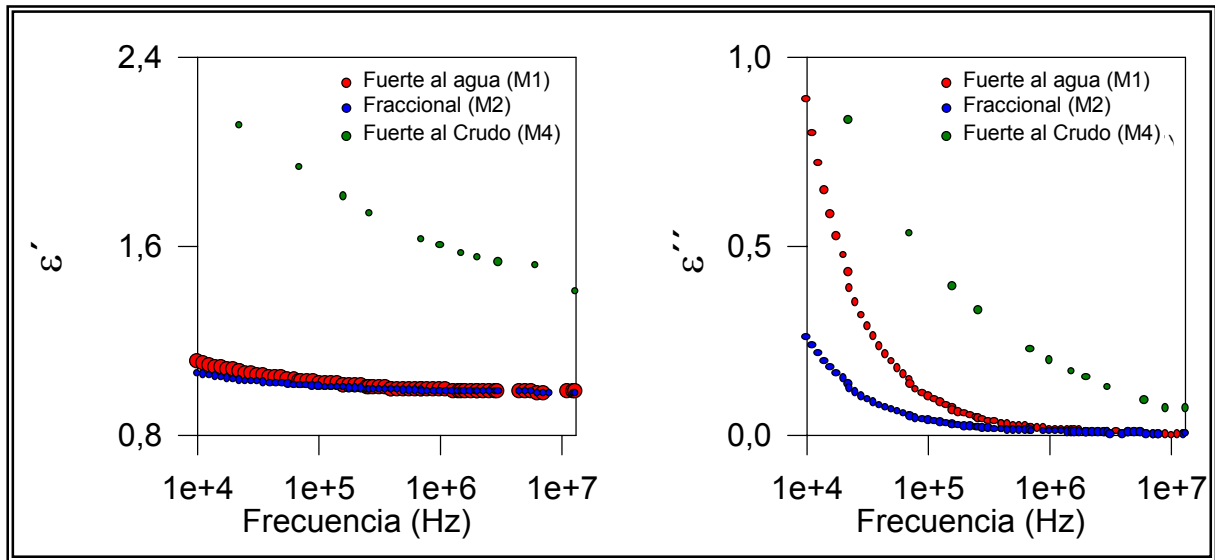


Fig. 4.7 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_o = 80\%$.

En la gráfica de ε'' se muestra que para frecuencias menores a 1 MHz existe una fuerte dependencia con la frecuencia para las curvas de las muestras de mojabilidad fraccional y fuerte al agua. De la curva de la muestra de mojabilidad fuerte al crudo se evidencia una dependencia con la frecuencia en todo el rango medido. Es importante mencionar que para ésta componente, las tres curvas tienden a cero para altas frecuencias.

Se observa que al aumentar la saturación de agua de formación en las muestras (para $S_o = 80\%$, se tiene $S_w = 20\%$) se diferencia el comportamiento

de la muestra de mojabilidad fuerte al agua del comportamiento de la muestra con mojabilidad fraccional.

En la figura 4.8, se muestran las gráficas para ε' y ε'' para $S_o = 60\%$, en las que se puede observar solapamiento para las curvas de las muestras de mojabilidad fraccional y fuerte al agua para frecuencias mayores a 1 MHz en ambas componentes de la permitividad dieléctrica. Ambas muestras presentan tendencias similares a las mostradas en las figuras 4.6 y 4.7, para cada componente, respectivamente.

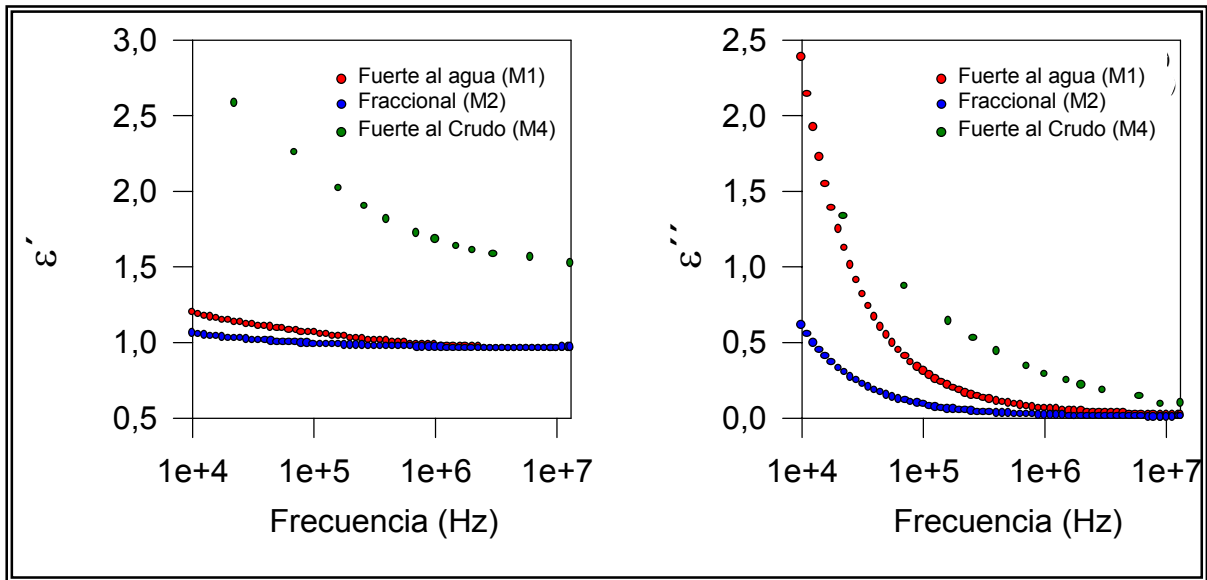


Fig. 4.8 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_o = 60\%$.

La muestra de mojabilidad fuerte al crudo (M3) presenta para la componente ε' la tendencia a un valor mínimo para altas frecuencias, siendo los valores de ésta componente de la permitividad mayores a baja frecuencia que los obtenidos para ε' en las figuras 4.6 y 4.7.

Mientras que para la componente ϵ'' , se observa que la curva de esta muestra varía notablemente con la frecuencia en todo el rango medido, tendiendo a cero a altas frecuencias.

En general, se observa que con la disminución de la saturación de petróleo en las muestras, aumentan los valores de ambas componentes de la permitividad; así como también se distinguen diferencias entre los comportamientos de las curvas para las muestras M1 y M2, donde ambas presentan un comportamiento similar para $S_o = 100\%$.

4.3.2. Dependencia de la Permitividad Dieléctrica con la Saturación de la muestra

Se hizo un estudio del comportamiento de las dos componentes de la permitividad dieléctrica (ϵ' y ϵ'') con la saturación de agua para el sistema agua-aire, y con la saturación de crudo en el sistema agua-crudo, para las rocas con distinta condición de mojado a un valor de frecuencia determinado.

a) Sistema Agua-Aire

Partiendo de una saturación de 100% agua, se tomaron los valores calculados de las componentes de la permitividad dieléctrica a una misma frecuencia, para las diferentes saturaciones de agua en las muestras.

En la figura 4.9, se muestran las gráficas de ϵ' y ϵ'' para 50 KHz. En la gráfica de ϵ' se observa dependencia de éste parámetro con la saturación, donde la curva tiende a un valor máximo para valores intermedios de saturación de agua. El máximo alcanzado varía con la mojabilidad de la

muestra (fuerte al petróleo, alrededor de $S_W = 80\%$; fuerte al agua, alrededor de $S_W = 50\%$; fraccional, alrededor de $S_W = 60\%$). Se evidencia también solapamiento de las curvas de las muestras de mojabilidad fuerte al agua y fraccional para porcentajes bajos de saturación de agua. Para la muestra de mojabilidad fuerte al agua se observa aumento del parámetro para porcentajes altos de saturación de agua.

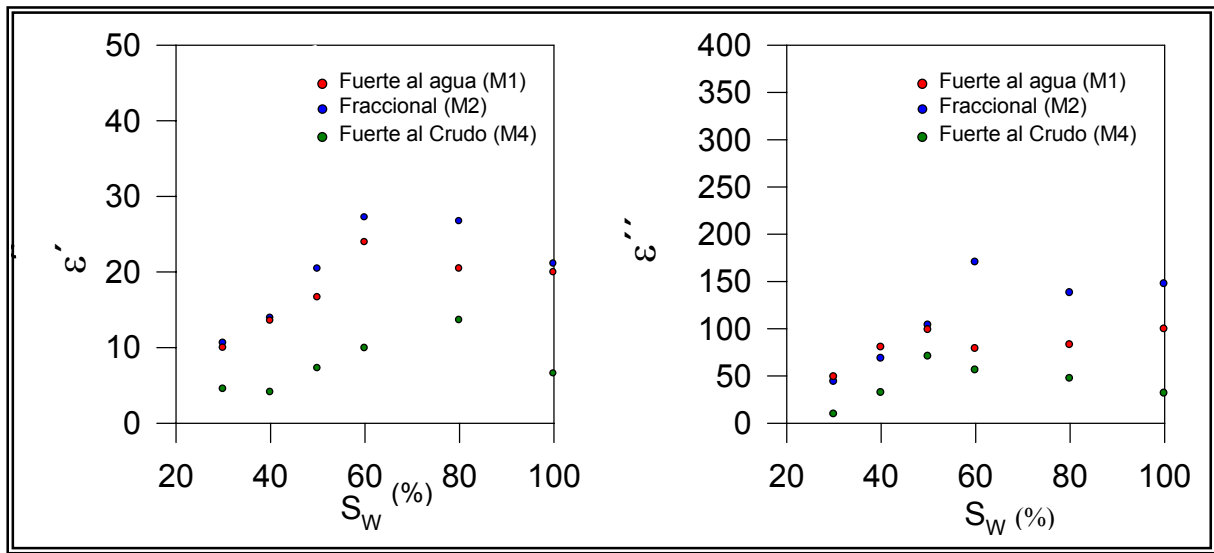


Fig. 4.9 Componentes de la permitividad dieléctrica para 50KHz en el sistema agua – aire.

Las curvas representadas en el gráfico de ϵ'' muestran un comportamiento similar al descrito para la componente real de la permitividad (máximo fuerte al petróleo, alrededor de $S_W = 50\%$; fuerte al agua, alrededor de $S_W = 50\%$; fraccional, alrededor de $S_W = 60\%$). Se observa también aumento del parámetro para altos porcentajes de saturación de agua en la muestra de mojabilidad fuerte al agua.

En la figura 4.10 se puede ver que las curvas de ε' de las muestras de mojabilidad fuerte al agua y fraccional se solapan para $S_W < 60\%$. Para la muestra de mojabilidad fuerte al agua, ε' aumenta con la saturación de agua, mientras que para la muestra de mojabilidad fraccional ε' alcanza su máximo en $S_W = 80\%$. En el caso de la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo, la curva alcanza máximo en $S_W = 80\%$. Esta última muestra presenta los menores valores de ε' .

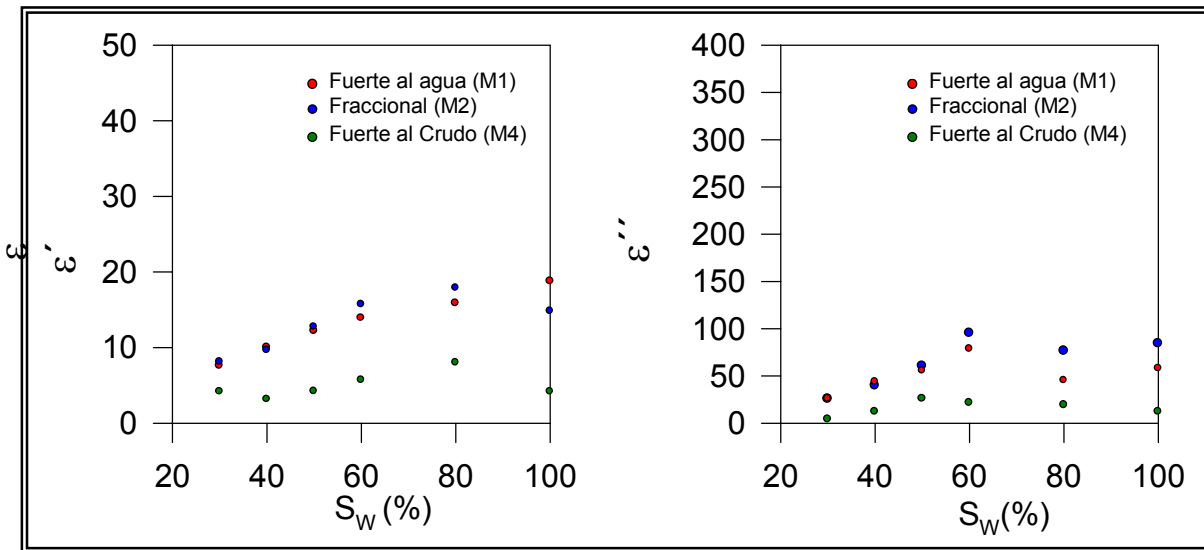


Fig. 4.10 Componentes de la permitividad dieléctrica para 100KHz en el sistema agua – aire.

Para la componente ε'' , se observa que la curva de la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo alcanza un máximo valor para $S_W = 50\%$, mientras que para la correspondiente a mojabilidad fraccional se alcanza el máximo valor de ε'' para $S_W = 60\%$.

Para saturaciones de agua mayores a 60%, la curva de ε'' para la muestra de mojabilidad fuerte al agua tiende a un valor constante.

En la figura 4.11 se muestran las gráficas de las componentes de la permitividad dieléctrica en función de la saturación de agua para 500 KHz. Para la componente real de la permitividad no se evidencia dependencia con la saturación de agua, observándose que los valores mayores de ε' corresponden a la muestra con mojabilidad fuerte al agua, mientras que la muestra de mojabilidad fraccional muestra valores de ε' intermedios entre la muestra de mojabilidad fuerte al agua y fuerte al petróleo.

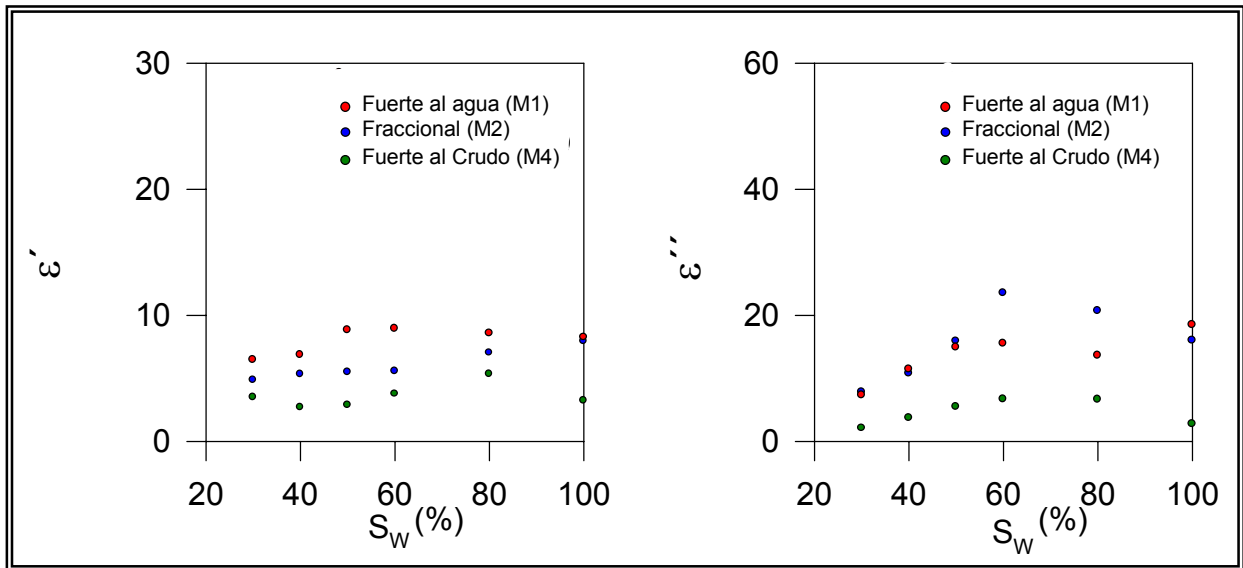


Fig. 4.11 Componentes de la permitividad dieléctrica para 500 KHz en el sistema agua – aire.

La gráfica de ε'' muestra tres curvas cuyos valores varían con la saturación de agua. La curva de la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo

presenta los valores menores de éste parámetro alcanzando un valor máximo para $S_w = 60\%$, las curvas de las otras dos muestras se solapan para bajos porcentajes de S_w . La muestra de mojabilidad fraccional alcanza un máximo valor para $S_w = 60\%$, mientras que la curva de la muestra de mojabilidad fuerte al agua pareciera tender a un valor constante de ε'' para $S_w > 60\%$.

En la figura 4.12 se muestran las gráficas de ε' y ε'' en función de la saturación de agua en las muestras para una frecuencia de 1 MHz, donde se observa que las curvas de ambas componentes de la permitividad dieléctrica presentan el mismo comportamiento observado a 500 KHz de frecuencia.

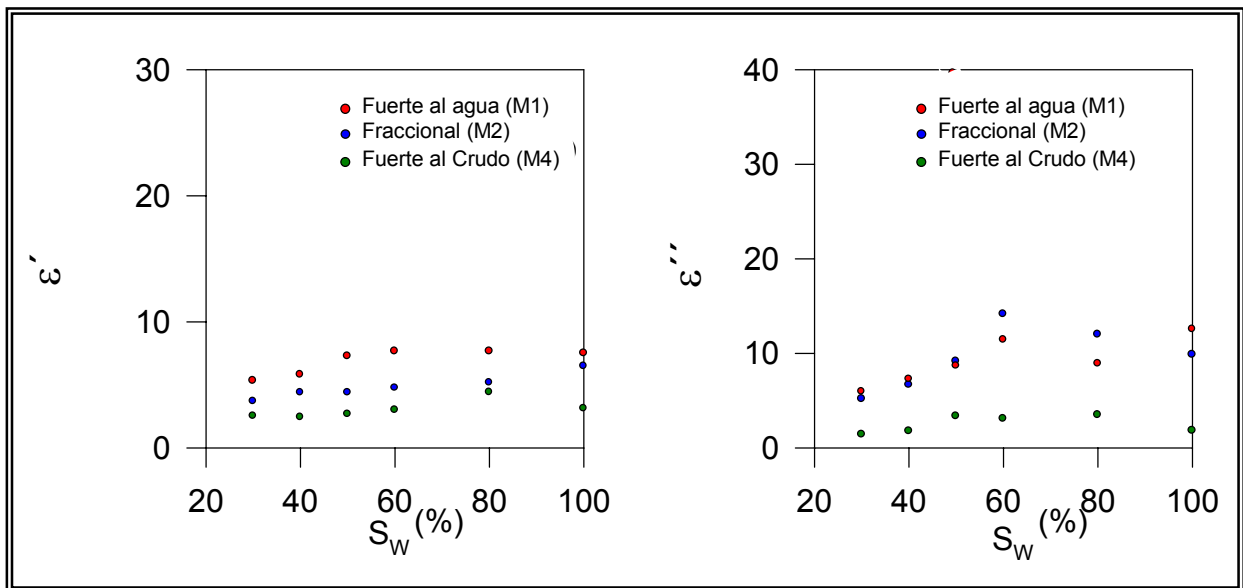


Fig. 4.12 Componentes de la permitividad dieléctrica para 1 Mhz en el sistema agua – aire.

En la figura 4.13 se muestran las gráficas de ϵ' y ϵ'' para una frecuencia de 8 MHz, se evidencia que las curvas de la componente real de la permitividad dieléctrica para las tres muestras, presentan un comportamiento similar con la saturación, observándose solapamiento en todo el rango de saturación para las curvas de las muestras de mojabilidad fraccional y fuerte al petróleo.

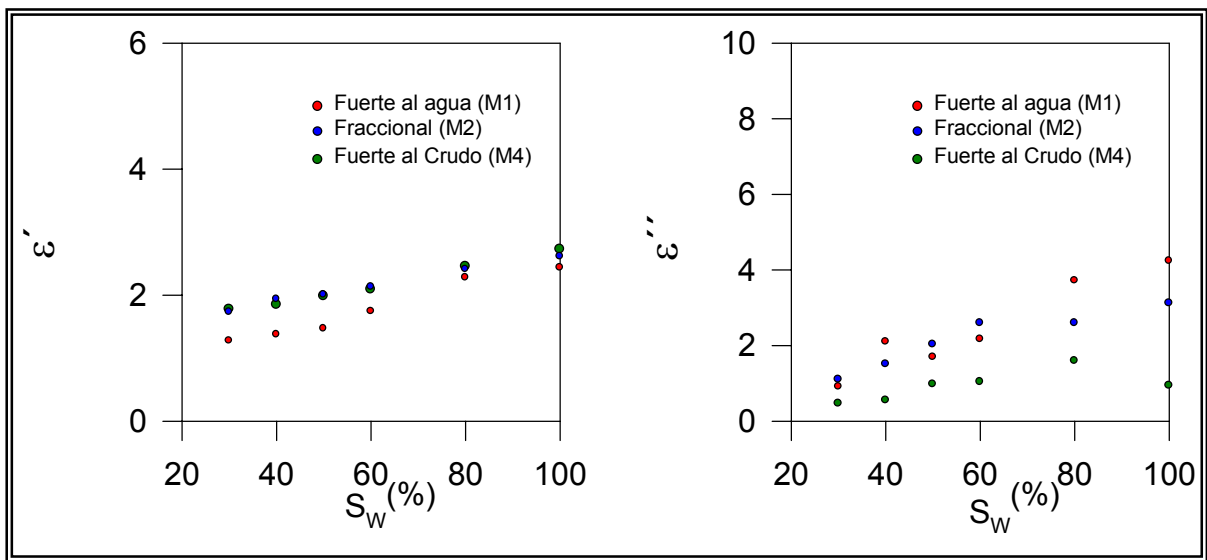


Fig. 4.13 Componentes de la permitividad dieléctrica para 8 MHz en el sistema agua – aire.

En la gráfica de la componente imaginaria se muestra que las tres curvas presentan dependencia con la saturación, siendo la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo la que presenta los valores más bajos de permitividad.

En la figura 4.14, se muestran las gráficas de ϵ' y ϵ'' en función de la saturación, para 13 MHz. Se puede distinguir la poca influencia que tiene la

saturación del agua en la componente real de la permitividad, además es de notar que con el aumento de la frecuencia los tres tipos de muestra presentan la misma tendencia. Se infiere que para altas frecuencias esta componente de la permitividad dieléctrica es menos sensible a la saturación y a la condición de mojado de las muestras.

Se observa que las curvas de las tres muestras, presentan comportamientos similares para cada componente de la permitividad.

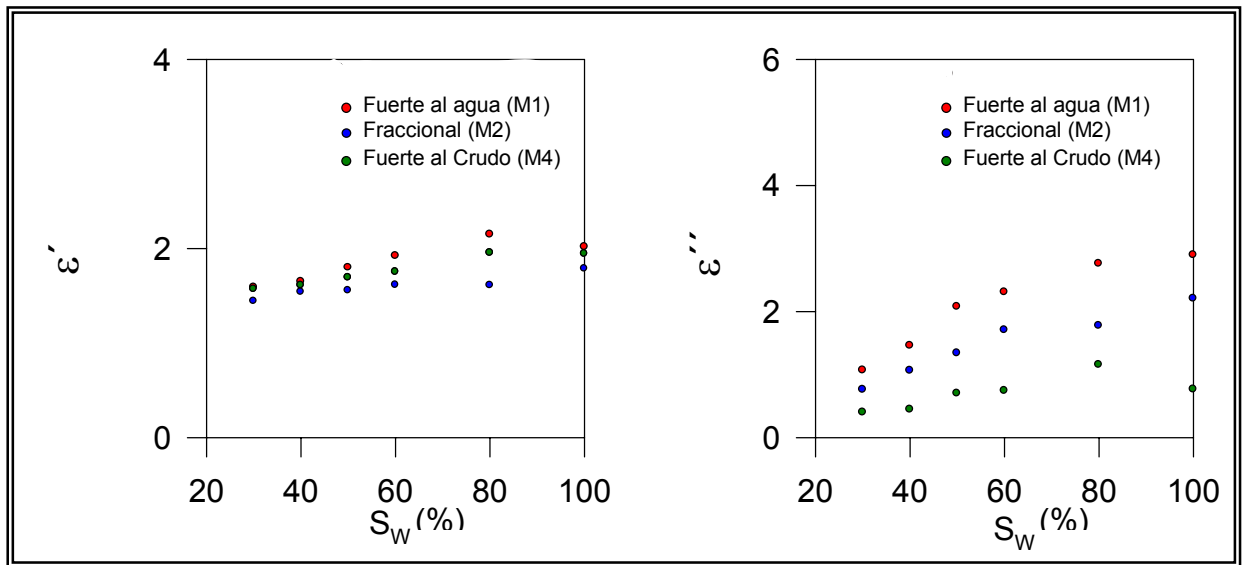


Fig. 4.14 Componentes de la permitividad dieléctrica para 13 MHz en el sistema agua – aire.

Para ϵ' se observa solapamiento de las curvas para bajas saturaciones de agua, mientras para ϵ'' se observa que las curvas tienen una dependencia con la saturación presentando una tendencia a un valor máximo de ϵ'' para una saturación crítica, que depende de la mojabilidad de la muestra. Se distingue que la curva para la muestra de mojabilidad fraccional

se encuentra entre la curva de la muestra de mojabilidad fuerte al agua (superior) y fuerte al petróleo (inferior).

De los resultados mostrados para el sistema agua – aire se concluye que para bajas frecuencias (< 500 KHz) la componente real de la permitividad tiende a disminuir con la saturación de agua en las muestras lo que indica que el efecto dominante está asociado a la conductividad de iones presentes en las muestras, mientras que las curvas que describen la dependencia de la componente imaginaria de la permitividad con la saturación de agua indican que los efectos de disipación alcanzan un máximo que depende de la mojabilidad de la muestra.

b) Sistema Agua-Crudo

A continuación se muestran los resultados del estudio del comportamiento de las componentes ϵ' y ϵ'' de la permitividad dieléctrica, con la saturación de crudo para rocas con distinta condición de mojado a valores de frecuencia determinados. Partiendo de una saturación de 100% crudo, se tomaron los valores calculados de las componentes de la permitividad dieléctrica para diferentes saturaciones de crudo en las muestras a una misma frecuencia.

En la figura 4.15 se observan las gráficas para las componentes de la permitividad para 22 KHz. Para la componente real de la permitividad se observa que las curvas de las muestras de mojabilidad fraccional y fuerte al

agua se solapan en todo el rango de saturación, mientras que para la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo la curva presenta un decaimiento con el aumento de saturación de crudo, obteniéndose para esta muestra los mayores valores de permitividad. Esto pone en evidencia el carácter conductivo de la dependencia de la permitividad con la saturación, pues a medida que aumenta el porcentaje de agua de formación contenido en la muestra, también aumenta la componente real de la permitividad para la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo.

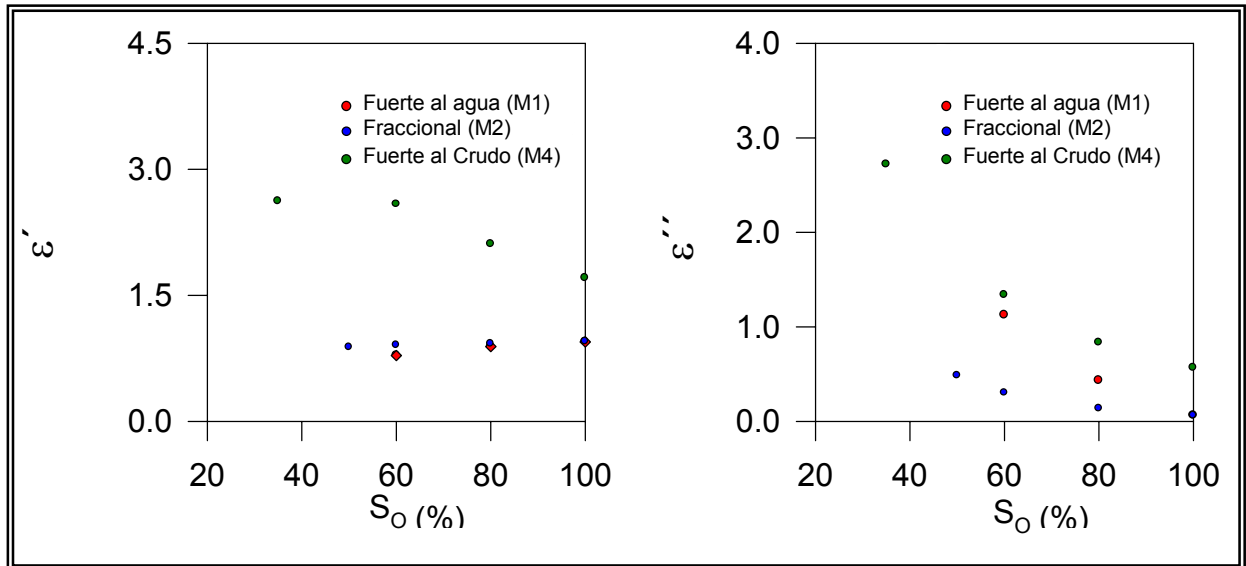


Fig. 4.15 Componentes de la permitividad dieléctrica para 22 KHz en el sistema agua – crudo.

Para la componente imaginaria de la permitividad a 22 KHz, se observa una fuerte dependencia con la saturación de crudo en la roca y con la mojabilidad de la muestra, siendo la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo la que presenta los mayores valores de ϵ'' .

En las figuras 4.16 a 4.19 se muestran las curvas de ε' y ε'' para cada muestra en función de la saturación de crudo a 100 KHz, 500 KHz, 1 MHz y 13 MHz, respectivamente. Los comportamientos de las curvas para cada componente de la permitividad son similares a los observados a 22 KHz. Se observa que los parámetros calculados mantienen sus tendencias a medida que aumenta la frecuencia. Las curvas de la componente real de la permitividad no presentan dependencia alguna con el porcentaje de saturación de crudo, observándose el solapamiento de las curvas de las muestras de mojabilidad fuerte al agua y fraccional, mientras que la curva para la muestra de mojabilidad fuerte al petróleo presenta los valores más altos del parámetro.

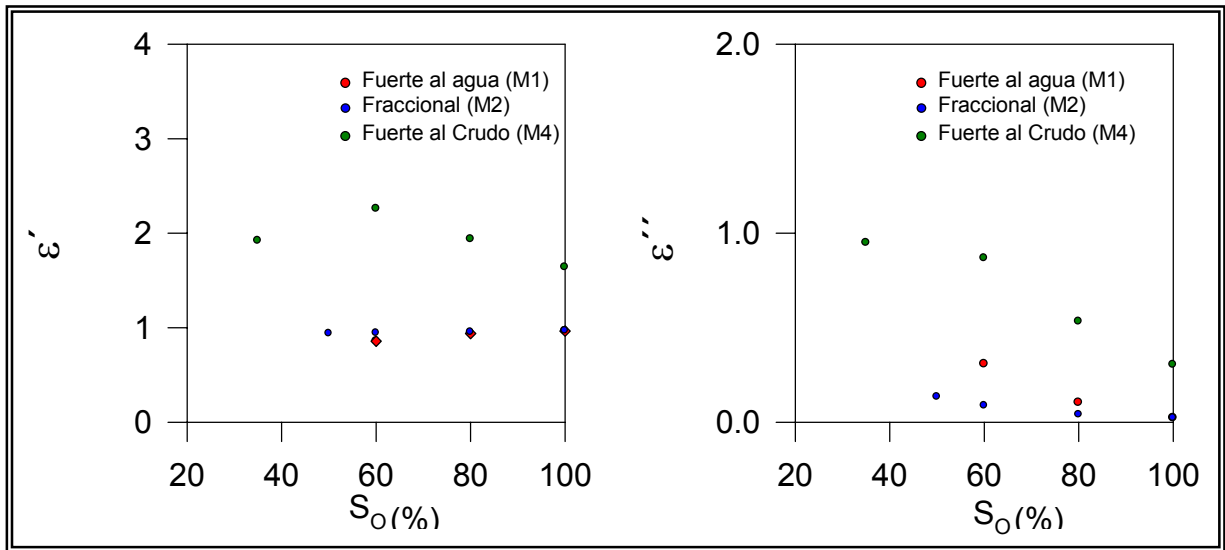


Fig. 4.16 Componentes de la permitividad dieléctrica para 100 KHz en el sistema agua – crudo.

La componente imaginaria de la permitividad presenta una fuerte

dependencia con la saturación para la muestra de mojabilidad fuerte al crudo mientras que esta dependencia es menos marcada para las otras dos muestras, cuyas curvas tienden a solaparse para altos porcentajes de saturación de crudo.

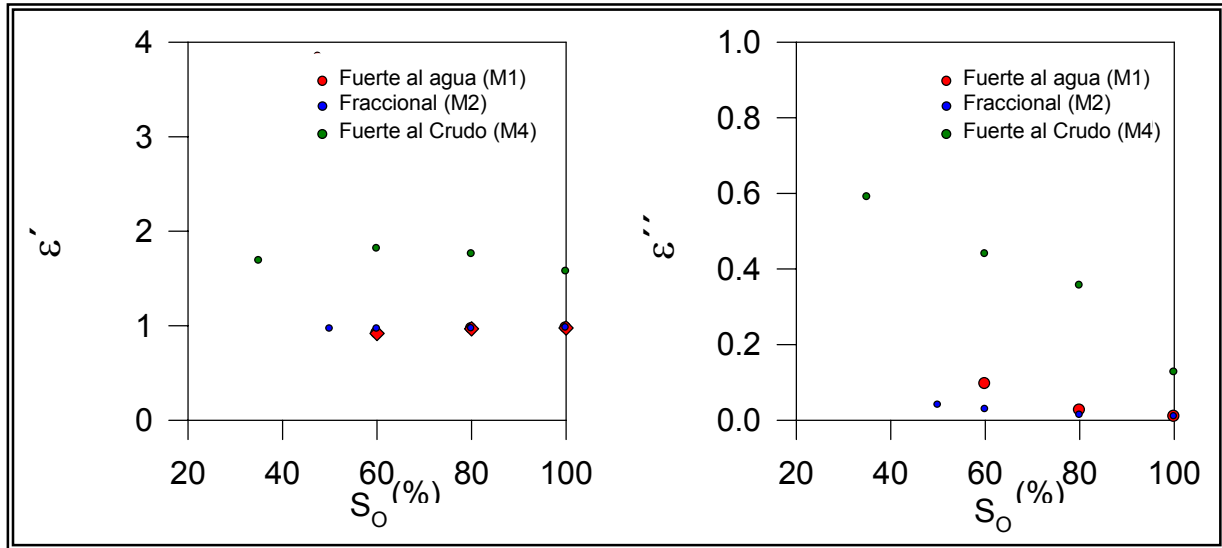


Fig. 4.17 Componentes de la permitividad dieléctrica para 500 KHz en el sistema agua – crudo.

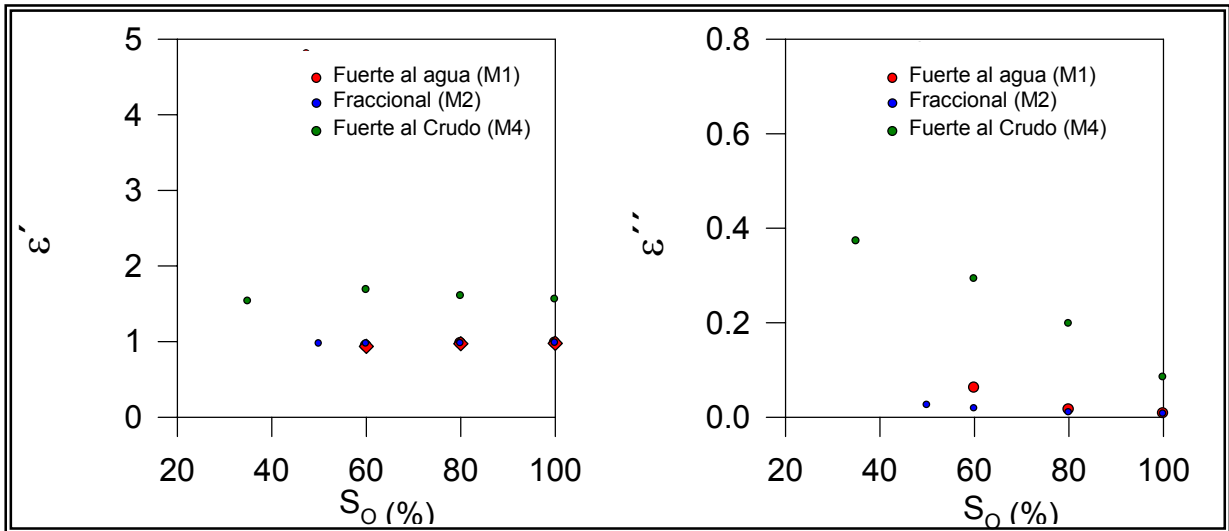


Fig. 4.18 Componentes de la permitividad dieléctrica para 1 MHz en el sistema agua – crudo.

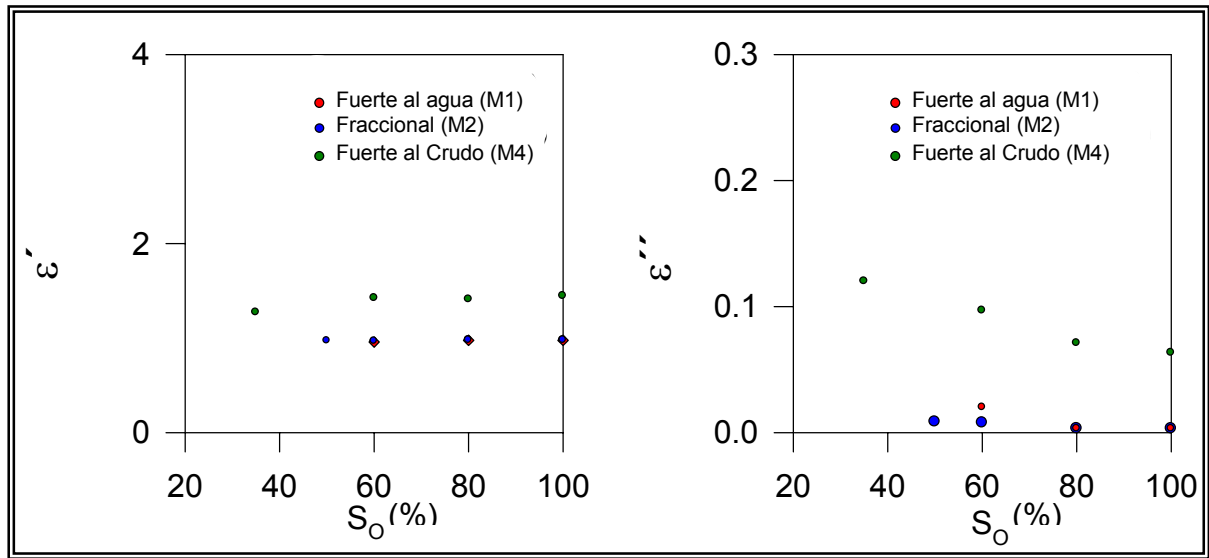


Fig. 4.19 Componentes de la permitividad dieléctrica para 13MHz en el sistema agua – crudo.

4.4. Medidas Acústicas

Para las medidas acústicas, se estudió la dependencia de la velocidad y amplitud de las ondas P, S1 y S2 con la saturación, a valores de presión de confinamiento de 3000 y 6000 psi, respectivamente manteniendo una presión de poro constante de 500 psi. Se consideraron los sistemas agua-aire y agua-crudo.

4.4.1. Dependencia de la Velocidad de la Onda Ultrasónica con la Saturación

a) Sistema Agua-Aire

Se realizó un estudio del comportamiento de las velocidades de las ondas P, S1 y S2 en función de la saturación de agua en la muestra, para las rocas con distinta condición de mojado, los gráficos se muestran en la figura 4.20, para 3000 psi (a, b y c) y 6000 psi (d, e y f) de presión de confinamiento.

Se observa que la velocidad de la onda aumenta con la presión de confinamiento, siendo la muestra con mojabilidad fraccional la que presenta mayor velocidad de onda.

Velocidad de Onda P

Para la muestra con mojabilidad fuerte al agua, se observa un descenso en la velocidad de onda P con el aumento de la saturación, hasta alcanzar un valor mínimo de velocidad a saturaciones intermedias ($S_W \approx 25\%$), y se mantiene aproximadamente constante para porcentajes mayores de saturación.

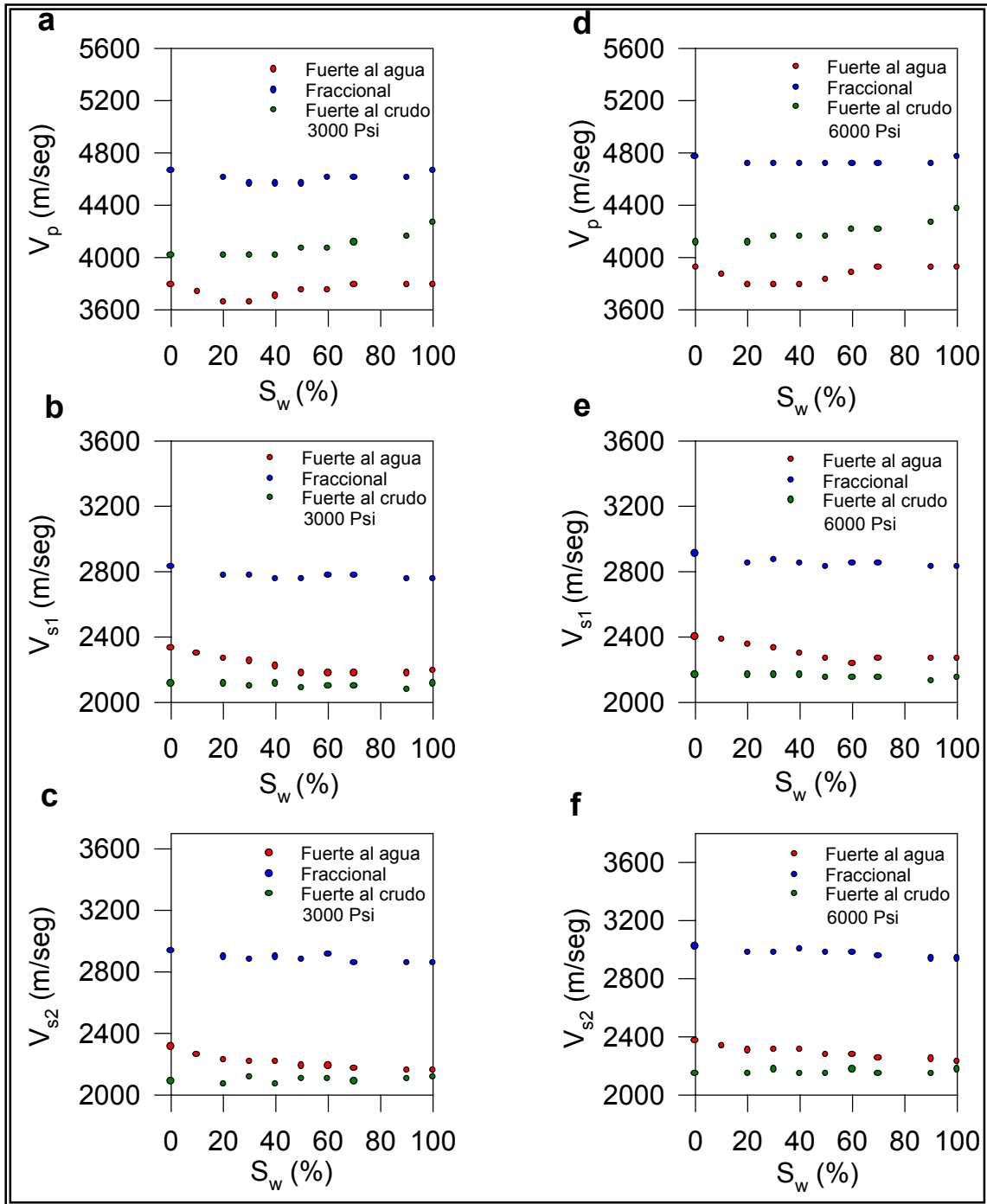


Fig. 4.20 Gráficos de velocidad de la onda en función de la saturación de agua.

Presión de Confinamiento 3000 psi: a) Velocidad de Onda P, b) Velocidad de Onda S1, c) Velocidad de Onda S2.

Presión de Confinamiento 6000 psi: d) Velocidad de Onda P, e) Velocidad de Onda S1, f) Velocidad de Onda S2.

Este comportamiento se atribuye a que a medida que aumenta la saturación de agua a partir de la roca seca, aumenta la densidad de la muestra (supuesta constante en toda la roca), lo que ocasiona la disminución en la velocidad. Progresivamente con el aumento de la saturación de agua (fluido incompresible), la muestra tiende a fortalecer su rigidez, facilitando así la transmisión de la onda P, por lo que no muestra mayor cambio en el valor de la velocidad.

Para la muestra con mojabilidad fuerte al crudo, la velocidad de la onda P presenta una débil dependencia con la saturación de agua, observándose un incremento para las saturaciones más altas. Para esta muestra debe considerarse su bajo valor del volumen poroso, lo que permite inferir una poca influencia de la cantidad de agua incompresible, sin embargo, el cambio en la rigidez de la muestra se hace notable para las saturaciones de agua más altas.

En el caso de la muestra con mojabilidad fraccional, la velocidad de onda P se mantiene aproximadamente constante en todo el rango de saturación.

Velocidad de Onda S

La forma de la curva para la muestra con mojabilidad fuerte al agua es típica para la velocidad de ondas S en muestras con porosidad $\phi > 10\%$ ^[30], que de acuerdo con la teoría de Biot ^[31] son tales que la velocidad de onda S de las rocas secas debe siempre exceder el valor de la velocidad de la misma roca cuando está completamente saturada. Mientras que las muestras

de mojabilidad fuerte al crudo y fraccional, no muestran influencia de la saturación.

b) Sistema Crudo-Agua

Se realizó un estudio del comportamiento de las velocidades de las ondas P, S1 y S2 en función de la saturación de crudo en la muestra, para las rocas con distinta condición de mojado. Las diferentes saturaciones de crudo se obtuvieron mediante desplazamiento con agua.

En la figura 4.21 se muestran los gráficos de las velocidades de cada tipo de onda en función de la saturación de crudo con 3000 psi (a, b y c) y 6000 psi (d, e y f) de presión de confinamiento, evidenciándose un incremento de las velocidades con la presión de confinamiento para las ondas P, mientras que las ondas S no presentan cambios notables.

Velocidad de Onda P

Se observa que la muestra con mojabilidad fraccional presenta los mayores valores de velocidad, mientras que para la muestra con mojabilidad fuerte al agua se obtienen los menores valores de velocidad. Para las tres muestras estudiadas, las curvas no presentan influencia de la saturación de crudo en la velocidad, en el rango de saturación estudiado. En el caso de la muestra mojada al agua y con mojado fraccional esta se puede atribuir a que el crudo rellena los espacios pendulares, y el camino de la señal es siempre la matriz de la roca excepto cuando cruza estos espacios pendulares^[4]. Mientras que la muestra de mojabilidad fuerte al crudo presenta la misma

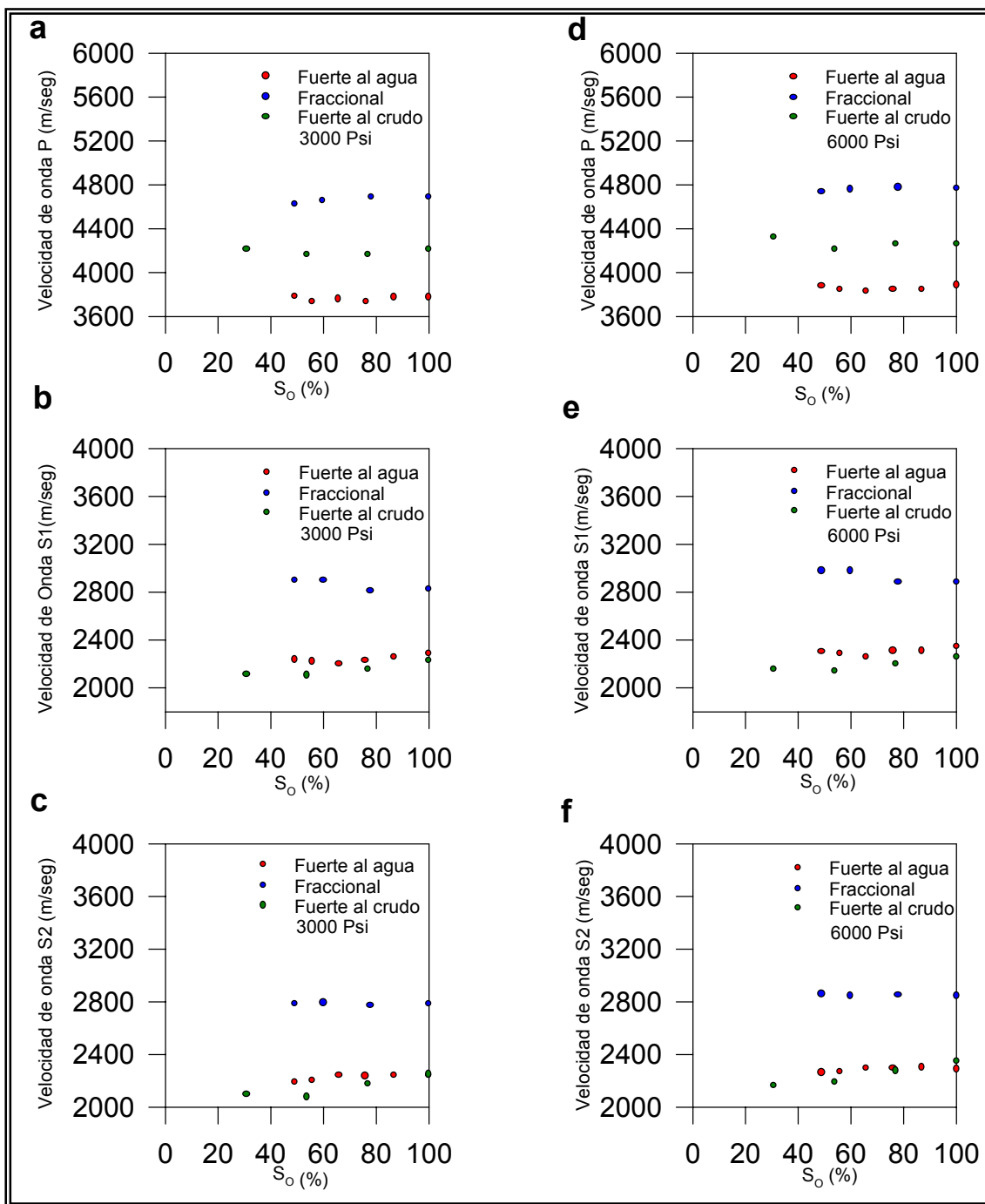


Fig. 4.21 Gráficos de velocidad de la onda en función de la saturación de crudo
 Presión de Confinamiento 3000 psi: a) Velocidad de Onda P, b) Velocidad de Onda S1, c) Velocidad de Onda S2.
 Presión de Confinamiento 6000 psi: d) Velocidad de Onda P, e) Velocidad de Onda S1, f) Velocidad de Onda S2.

velocidad para todo el rango de saturación probablemente debido a que el crudo moja siempre fácilmente su superficie, de manera que el contraste de impedancia acústica entre la roca y el fluido es relativamente pequeño.

Velocidad de Onda S

Se observa que las ondas S presentan velocidades similares en las muestras con mojabilidad fuerte al agua y fuerte al crudo, es posible que debido a la baja porosidad de la muestra mojada al crudo, esta no presenta mayor diferencia con respecto al comportamiento mostrado por la muestra mojada al agua.

En general, comparando los resultados obtenidos para los dos sistemas estudiados, se observa un leve incremento de la velocidad de las ondas en el sistema agua-crudo, manteniéndose diferencias entre las curvas asociadas al efecto de la mojabilidad.

4.4.2. Dependencia de la Amplitud de la Onda con la Saturación

Las amplitudes reportadas en este trabajo corresponden a la amplitud de la llegada del primer máximo de cada tipo de onda. Teniendo en cuenta que las señales de las ondas S1 y S2 están desfasadas en 90° (cuando S1 alcanza un máximo S2 alcanza un mínimo), las amplitudes para la onda S1 corresponden al primer mínimo y las amplitudes para las ondas S2 corresponden al primer máximo.

Sistema Agua-Aire

Se realizó un estudio del comportamiento de las amplitudes de las

ondas P, S1 y S2 en función de la saturación de agua en la muestra, para las rocas con distinta condición de mojado. En la figura 4.22 se muestran los gráficos de las amplitudes de cada tipo de onda en función de la saturación de agua con 3000 psi (a, b y c) y 6000 psi (d, e y f) de presión de confinamiento.

Amplitud de Onda P

Se observa una disminución drástica en la amplitud de la onda con la saturación, para $S_w < 50\%$ en las muestras de mojabilidad fraccional y fuerte al agua, lo que indica que la amplitud de la onda es un parámetro sensible a la presencia de agua en el medio poroso. Cuando los poros están llenos del fluido ($S_w > 50\%$) la amplitud tiende a mantener un valor aproximadamente constante.

La amplitud de la onda P para la muestra con mojabilidad fuerte al crudo no muestra influencia de la saturación en su comportamiento.

Amplitud de Onda S

Se observa que la muestra con mojabilidad fuerte al agua presenta las ondas S de mayor amplitud, mientras que este parámetro para la muestra mojada al crudo es menor y prácticamente constante en todo el rango de saturación.

De los gráficos mostrados, se observa que la amplitud de las ondas P es mayor a la amplitud de las ondas S. También, se distingue incrementos de la amplitud con el aumento de la presión de confinamiento.

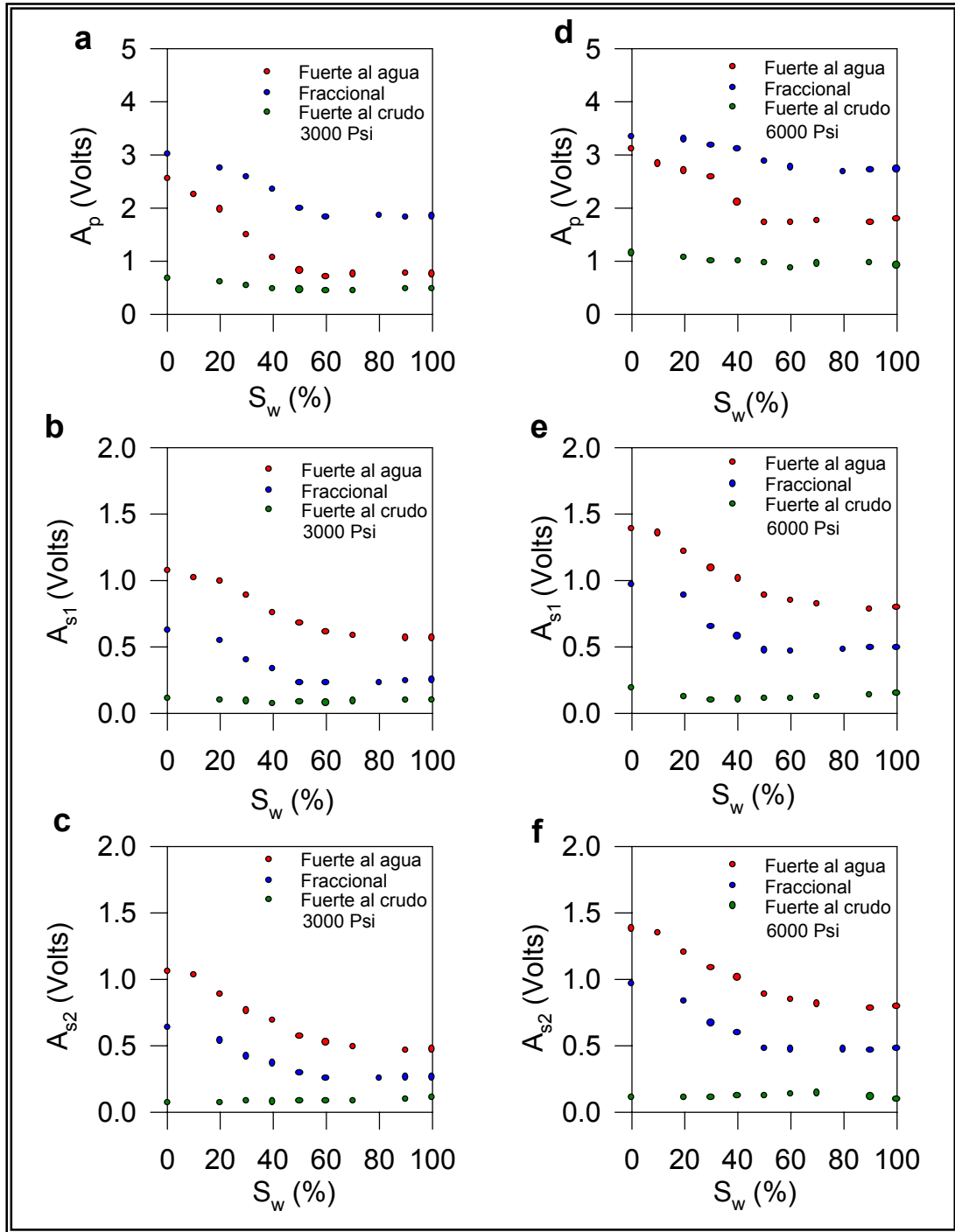


Fig. 4.22 Gráficos de amplitud de la onda en función de la saturación de agua en la muestra. Presión de Confinamiento 3000 psi: a) Amplitud de Onda P, b) Amplitud de Onda S1, c) Amplitud de Onda S2. Presión de Confinamiento 6000 psi: d) Amplitud de Onda P, e) Amplitud de Onda S1, f) Amplitud de Onda S2.

b) Sistema Crudo-Agua

Se estudió el comportamiento de las amplitudes de las ondas P, S1 y S2 en función de la saturación de crudo, para las rocas con distinta condición de mojado. En la figura 4.23 se muestran los gráficos de las amplitudes de cada tipo de onda en función de la saturación de agua con 3000 (a, b y c) y 6000 psi (d, e y f) de presión de confinamiento.

Amplitud de Onda P

Las muestras con mojabilidad fraccional y fuerte al agua presentan amplitud de onda P similar. Se observa además, que la amplitud de la onda no se ve influenciada por la saturación de petróleo.

Para la muestra de mojabilidad fuerte al crudo se observa un incremento a partir de saturaciones intermedias (50%) de crudo, indicando menor atenuación en la amplitud de la onda cuando sus poros están totalmente llenos de crudo.

Amplitud de Onda S

La amplitud de las ondas S no muestra influencia de la saturación para ninguna de las muestras estudiadas.

En general, la amplitud de las ondas presentan un comportamiento similar al observado en el sistema agua-aire cuando aumenta la presión de confinamiento de las muestras.

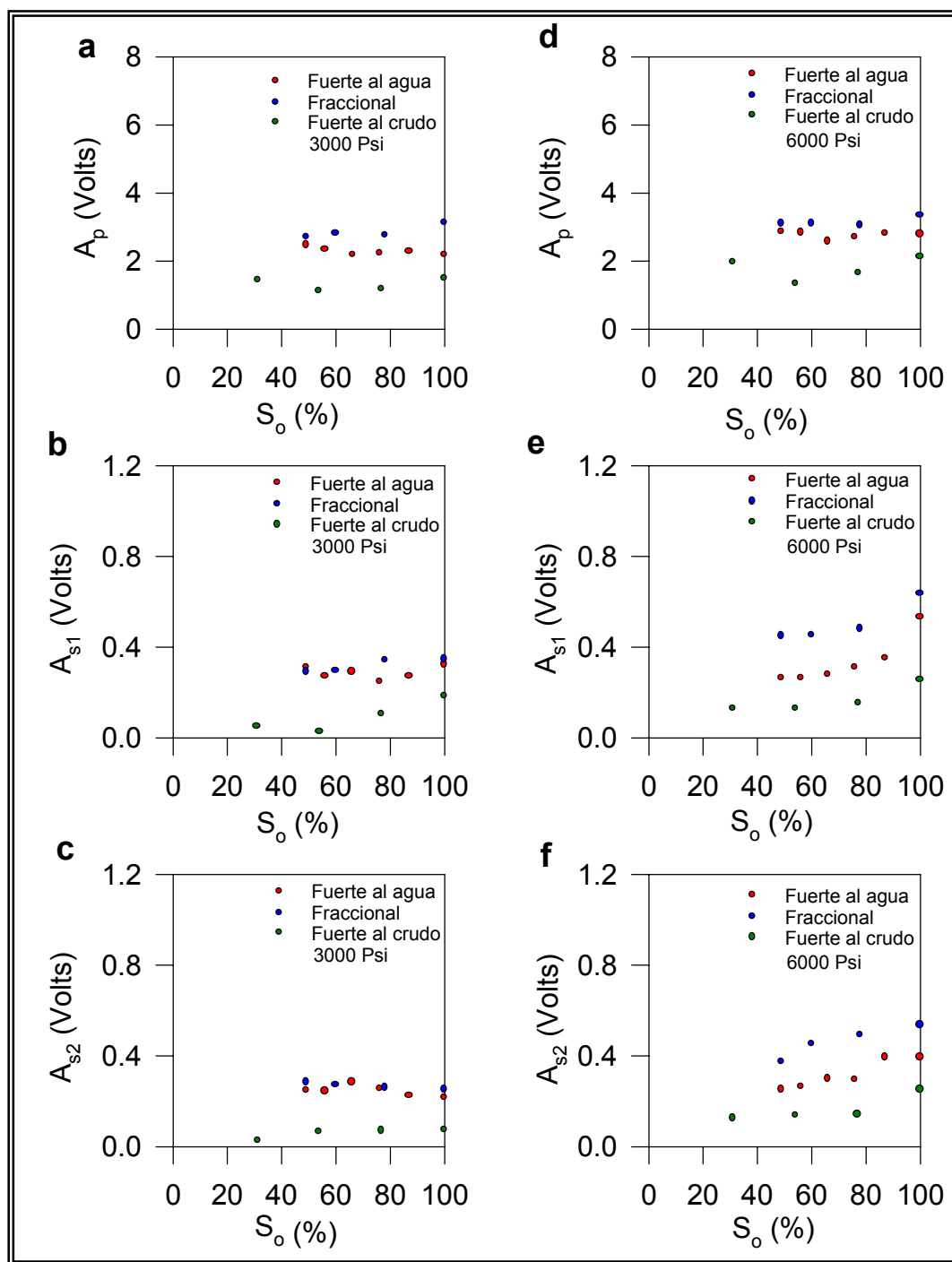


Fig. 4.23 Gráficos de amplitud de la onda en función de la saturación de crudo
 Presión de Confinamiento 3000 psi: a) Amplitud de Onda P, b) Amplitud de Onda S1, c) Amplitud de Onda S2.
 Presión de Confinamiento 6000 psi: d) Amplitud de Onda P, e) Amplitud de Onda S1, f) Amplitud de Onda S2.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el estudio de la respuesta dieléctrica de muestras con diferente mojabilidad para los sistemas agua-aire y agua-crudo, se demostró la existencia de:

- ◆ Dependencia exponencial de la permitividad con la frecuencia.
- ◆ Disminución drástica de la permitividad a bajas frecuencias ($f < 1$ MHz), como consecuencia de la conductividad de los iones presentes en el agua de formación.
- ◆ Diferencias entre los comportamientos de la permitividad, según la mojabilidad de la roca, estos cambios se asocian a la distribución de los fluidos dentro del medio poroso.
- ◆ Disminución del valor de la componente real de la permitividad, con la saturación de agua.
- ◆ Dependencia de la componente imaginaria de la permitividad con la frecuencia, similar al observado en el sistema agua-crudo. En el sistema agua-crudo, la componente real de la permitividad no presentó dependencia con la saturación de crudo.

El estudio de la respuesta acústica de la roca mostró:

- ◆ Sensibilidad ante la distribución de fluidos, observándose que la velocidad de onda P tiende aumentar a altas saturaciones de agua y la velocidad de ondas S disminuye con el aumento en S_w .
- ◆ Aumento de la velocidad de onda con la presión de confinamiento.

- ◆ Poca influencia de la saturación de agua en la velocidad de las ondas S.
- ◆ Diferencias entre las curvas de velocidad de las ondas asociadas a la mojabilidad de las muestras.
- ◆ De las muestras estudiadas, la muestra con mojabilidad fraccional presenta mayor velocidad de ondas P, S1 y S2, para los dos sistemas estudiados.
- ◆ Las ondas P, S1 y S2 presentan menor amplitud de onda en la muestra con mojabilidad fuerte al crudo, para ambos sistemas estudiados.

Se concluye, que la respuesta dieléctrica y la respuesta acústica de las rocas de yacimiento constituyen métodos más sencillos y económicos a los generalmente empleados para inferir la mojabilidad de las rocas.

RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos, se sugiere medir los parámetros dieléctricos en todas las muestras, mediante el sistema de adquisición de datos conectado al analizador de impedancia, con la finalidad de estudiar el comportamiento de la constante dieléctrica a bajas frecuencias ($f < 1 \text{ KHz}$).

Extender el ajuste de las curvas de la componente imaginaria de la permitividad para el sistema agua-aire, según las ecuaciones 2.10a, 2.10b, y 2.10c.

Estudiar la respuesta acústica en rocas de yacimiento, midiendo sobre todo el rango de saturación en el sistema agua-crudo.

Realizar el estudio de la respuesta acústica y dieléctrica de muestras de roca de yacimiento en función de la temperatura.

REFERENCIAS

1. Bona N., Rossi E., Venturini C., Capaccioli S. Lucchesi M. ,Rolla P.A., *Characterization Of Rock Wettability Through Dielectric Measurements*. Revue de L'Institut Français du Pétrole. Vol 53, N° 6, November-December 1998.
2. Taherian M.R., Kenyon W.E., Safinya K.A., *Measurement Of Dielectric Response Of Water Saturated Rocks*. Geophysics, Vol. 55, N° 12 (December 1990).
3. Bona N., Rossi E., *Electrical Measurements In The 100Hz –10ghz For Efficient Rock Wettability Evaluation*. Presentado en el SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, en Houston, Texas 16-19 Febrero (1999).
4. Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., y Gardner, L.W. *Elastic Wave Velocities In Heterogeneous Porous Media*. Geophysics, 21: 47-70 (1956).
5. Domenico, S.N. *Effect Of Water Saturations On Seismic Reflectivity Of Sand Reservoirs Encased In Shale*, Geophysics, 39, 759-769 (1974).
6. Nur, A., *Viscous Phases In Rocks And The Low Velocity Zone*, J. Geophy. Res., 76,1270-1277 (1971).
7. Picket, G.R., *Acoustic Character Of Logs And Their Applications In Formation Evaluations*. Journal of Petroleum Technology 659-670:

- Trans., AIME, 228 (June 1963).
8. Domenico, S.N., *Rock Lithology And Porosity Determination From Shear And Compressional Wave Velocity*. Geophysics 49: 1188-1195 (1984).
 9. Tiexer, M.P., Loveless, G.W. y Anderson, R.W., *Estimation Of Formation Strength From The Mechanical-Properties Log*. Society of Petroleum Engineers. 4532 (1973).
 10. Mammana, G., *Propagación De Ondas Ultrasónicas En Rocas De Yacimiento*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Física, Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (2000).
 11. Bourbie T., Coussy O., Zinszner B. *Acoustics Of Porous Media*. Editions Technip, París 1986.
 12. Araujo, Y. C. y Araujo M., *Taller De Interacción Roca-Fluido*, Básico, PDVSA (Intevep).
 13. Darcy, H. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, París (1856).
 14. Wooddruff D.P. y Delchar T.A. *Modern Techniques Of Surface Science*. Cambridge University Press, Cambridge 1984.
 15. Toledo P., Araujo Y:C y León V. *ISS Assessment Of The Influence Of*

- Nonpore Surface In The XPS Analysis Of Oil-Producing Reservoir Rocks*. Journal of Colloid and Interface Science. 192: 281-285 (1997).
16. Araujo Y., Toledo P., León V. Y Gonzalez H. *Wettability Of Silane-Treated Glass Slides As Determined From X-Ray Photoelectron Spectroscopy*. J. Colloid and Interface Sci., 176: 485 (1995).
17. Toluloukian Y.S., Judd W.R., Roy R.F. *Physical Properties Of Rocks And Minerals*. Volumen II-2. E.U.A. (1989).
18. Orellana Ernesto. *Prospección Geoeléctrica* Editorial Paraninfo. Madrid-España. (1982).
19. Sillars R.W. *J. Inst. Elec.. Eng.*, 80: 378-394 (1937)
20. Knight R. y Nur A. *The Dielectric Constant Of Sandstone, 60 Khz To 4 MHz*. Geophysics, 52, 5: 644-654 (1987).
21. Paillet F. L., Hon Cheng Ch. *Acoustic Waves In Boreholes*. CRC Pres, Inc. (1991).
22. Timoshenko, S., Goodier, J.N. *Theory Of Elasticity*. Editorial New York. Mac Graw Hill Book. Segunda Edición.
23. Love ,A. *A Treatise On The Mathematical Theory Of Elasticity*. Editorial Cambridge – Cambridge University, (1934).
24. Gregory, A.R. *Fluid Saturation Effects On Dynamic Elastic Properties*

- Of Sedimentary Rocks*. Geophysics, 41: 895 – 924. (1976).
25. Pilant W. *Elastic Waves In The Earth*. Elsevier Scientific publishing company. (1979).
26. Timur A., Cheng C.H., Nafi Tosksöz M. *Velocities Of Seismic Waves In Porous Rocks*. Geophysics, 41, 4: 621-645 (1976).
27. CMS-300 Core Measurement System, *Operation and Maintenance manual. Part I*. Core Laboratories Instruments.(1992).
28. Toledo P., Araujo Y:C: y León V. *Wettability Of Oil-Producing Reservoir Rocks As Determined From X-Ray Photoelectron Spectroscopy*. Journal of Colloid and Interface Science. 183, 301-308 (1996).
29. Araujo M. y Araujo Y.C., *Nuevas Técnicas para la Caracterización de Interacciones Roca-Fluido*, Visión Tecnológica. (Noviembre 2000).
30. Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., y Gardner, L.W. *An experimental Investigation of Factors Affecting Elastic Wave Velocities in Porous Media*. Geophysics, 23: 459 - 493 (1958).
31. Biot, M.A. *Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid Saturated Porous Solid*. J. Acoust. Soc. Am., 28:168 - 191 (1956).

NOMENCLATURA

ε' : Parte real de la permitividad dieléctrica generalizada
[adimensional]

ε'' : Parte imaginaria de la permitividad dieléctrica generalizada
[adimensional]

ϕ : Porosidad [adimensional]

V_p : Volumen poroso [cm³]

V : Volumen total [cm³]

V_m : Volumen de matriz [cm³]

k : Permeabilidad [mDarcy]

u : Densidad de flujo volumétrico [gr/cm³]

p : Presión (psi)

η : Viscosidad dinámica del fluido (centipois)

k_∞ : Permeabilidad absoluta de Klinkenberg [mDarcy]

k_g : Permeabilidad al gas [mDarcy]

$\bar{p}$: Presión media [psi]

b : Parámetro de medida de la influencia del tamaño de poro y el
camino libre del gas dentro del espacio poroso [psi]

XPS: Espectroscopia de fotoelectrón de rayos X

ISS: Espectroscopia de ión dispersado

σ : Conductividad [Siemens/m]

ρ : Resistividad [m/Siemens]

ε	:	Constante dieléctrica [faradio/m]
$\varepsilon(\omega)$	:	Permitividad compleja generalizada [adimensional]
ω	:	Frecuencia angular [rad/seg]
ε_0	:	Permitividad al vacío [faradio/m]
$\varepsilon_p(\omega)$	:	Contribución de los efectos de polarización a la constante dieléctrica [adimensional]
σ_{dc}	:	Conductividad d.c. del fluido [Siemens/m]
$\varepsilon'_p(\omega)$	:	Parte real de $\varepsilon_p(\omega)$ [adimensional]
$\varepsilon''_p(\omega)$	:	Parte imaginaria de $\varepsilon_p(\omega)$ [adimensional]
$\Delta\varepsilon$	:	Amplitud de relajación [adimensional]
τ	:	Tiempo de relajación [seg]
ε_m	:	Permitividad de la fase aislante [faradio/m]
ε_w	:	Permitividad del agua [faradio/m]
S_w	:	Saturación de agua [%]
S_o	:	Saturación de petróleo [%]
β	:	Parámetro de forma [adimensional]
g	:	Factor relacionado a la orientación isotrópica de las esferas [adimensional]
A	:	Parámetro de ajuste $\left[\frac{\text{New m}^2}{\text{Coul}^2 \text{ seg}^{N-1}} \right]$ (ec. 2.9)
N	:	Parámetro de ajuste [adimensional] (ec. 2.9)
PL	:	Ley de Potencias

ε_{PL}	:	Contribución tipo Ley de Potencial
ε_{MW}	:	Contribución de la polarización tipo Maxwell-Wagner
α	:	Parámetro de ajuste [adimensional] (ec. 2.10b)
V_P	:	Velocidad de ondas compresionales [m/seg]
V_s	:	Velocidad de ondas de cizalla [m/seg]
μ	:	Constante de Lamé, módulo de compresibilidad [New/m ²]
λ	:	Constante de Lamé, rigidez [New/m ²]
Φ	:	Campo escalar
$\vec{\psi}$	:	Vector potencial de onda
S_{wi}	:	Saturación irreducible de agua [%]
V_{osp}	:	Volumen de petróleo desplazado espontáneamente [cm ³]
S_{or}	:	Saturación residual de petróleo [%]
V_{od}	:	Volumen de petróleo desplazado [cm ³]
V_{wsp}	:	Volumen de agua de formación desplazado espontáneamente [cm ³]
V_{wd}	:	Volumen de agua desplazado [cm ³]
δ_w	:	Indice de mojabilidad al agua [adimensional]
δ_o	:	Indice de mojabilidad al petróleo [adimensional]
δ_n	:	Indice de mojabilidad neutra [adimensional]
Z	:	Impedancia eléctrica [ohm]
θ	:	Angulo de fase [°]

R	:	Resistencia [ohm]
C	:	Capacitancia [faradio]
Y	:	Admitancia [ohm ⁻¹]
V	:	Velocidad [m/seg]
L	:	Longitud [m]
t	:	Tiempo [seg]
k _a	:	Permeabilidad al aire [mDarcy]
P	:	Ondas compresionales
S1, S2	:	Ondas transversales polarizadas
A _P	:	Amplitud de ondas P (Voltios)
A _{S1}	:	Amplitud de ondas S1 (Voltios)
A _{S2}	:	Amplitud de ondas S2 (Voltios)

APENDICE A. CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS

Tabla A.1 Características de las muestras de estudio.

MUESTRA	$D \pm 0,001$ (cm)	$L \pm 0,001$ (cm)	$M \pm 0,01$ (g)	$A \pm 0,004$ (cm) ²	$V \pm 0,008$ (cm) ³
1	2,500	3,296	34,01	4,909	16,179
2	2,500	4,000	48,13	4,909	19,635
3	2,500	3,400	40,33	4,909	16,690
4	2,512	3,514	40,65	4,956	17,415

Las medidas de diámetro y longitud fueron realizadas con un vernier digital de apreciación 0,001 cm.

Las medidas de masa se realizaron en una balanza analítica digital, cuya apreciación es 0,01 gramos.

APENDICE B. CÁLCULO DE ERRORES

B.1 Área de la base de la muestra

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (\text{B.1})$$

$$\Delta A = \frac{\pi}{2} D \Delta D \quad (\text{B.2})$$

donde ΔD corresponde a la apreciación del vernier utilizado.

B.2 Volúmen de la muestra

$$V = A \times L \quad (\text{B.3})$$

$$\Delta V = L \Delta A + A \Delta L \quad (\text{B.4})$$

APENDICE C. TABLAS CON DATOS ADQUIRIDOS

En este apéndice se muestran las tablas con los datos obtenidos en las medidas de los parámetros eléctricos de las muestras, Los parámetros medidos fueron impedancia (Z), su ángulo (θ), resistencia (R) y capacitancia (C),

SISTEMA AGUA-AIRE

Tabla C.1 *Medidas con la celda vacía.*

Frecuencia (Hz)	Zo (Ω)	Angulo ($^\circ$)	Ro (Ω)	Co(F)
50	0	0	0	-9E-10
100	0	0	0	-2,7E-10
500	0	0	0	3,7E-11
1000	0	0	0	1,51E-10
1500	0	0	0	1,27E-11
2000	0	0	0	1,26E-11
3000	0	0	0	1,24E-11
5000	0	0	0	1,03E-11
8000	0	0	0	9,65E-12
15000	1256000	-74,9	328000	8,75E-12
25000	803000	-76,8	183000	8,14E-12
50000	435000	-79,5	80000	7,44E-12
100000	233000	-81,6	34000	6,909E-12
300000	82940	-84,25	8290	6,43E-12
600000	43090	-85,41	3430	6,18E-12
1000000	26520	-86,31	1690	6,014E-12
2000000	13660	-87,82	510	5,832E-12
3000000	9252	-89,27	117	5,751E-12
4000000	6989	-90,25	30	5,69E-12
5000000	5667	-91,41	139	5,62E-12
6000000	4834	-93,53	294	5,5E-12
7000000	4200	-98,06	588	5,468E-12
8000000	3612	-111,54	1326	5,92E-12
10000000	2192	-92,55	96	7,269E-12
12000000	1894	-92,39	78	7,01E-12
13000000	1733	-92,88	86	7,074E-12

Tabla C.2 Medidas para la muestra 1 con $S_w = 100\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	14,9	14,8	14,6	-30	-30,2	-30,3
100	7,85	7,7	7,6	-26,2	-26	-25,8
500	5,407	5,274	5,179	-17,81	-17,6	-17,24
1000	4,372	4,31	4,275	-11,99	-11,9	-12,13
1500	3,967	3,962	3,954	-9,51	-9,45	-9,52
2000	3,81	3,803	3,795	-8,28	-8,28	-8,3
3000	3,681	3,682	3,672	-7,35	-7,37	-7,44
5000	3,561	3,561	3,561	-6,85	-6,89	-6,91
8000	3,459	3,46	3,464	-6,84	-6,87	-6,91
15000	3,33	3,337	3,337	-7,25	-7,29	-7,34
25000	3,238	3,244	3,246	-8,2	-8,28	-8,3
50000	3,059	3,052	3,051	-10,21	-10,2	-10,2
100000	2,83	2,83	2,83	-13,23	-13,29	-13,34
300000	2,367	2,365	2,361	-20,95	-20,97	-21
600000	1,972	1,971	1,969	-27,3	-27,28	-27,26
1000000	1,639	1,638	1,637	-32,01	-31,93	-31,93
2000000	1,192	1,192	1,192	-35,28	-35,27	-35,25
3000000	0,9845	0,9845	0,9845	-34,33	-34,33	-34,33
4000000	0,8721	0,8721	0,8721	-32,79	-32,79	-32,79
5000000	0,8041	0,8041	0,8041	-31,39	-31,39	-31,39
6000000	0,7601	0,7602	0,7602	-30,27	-30,26	-30,26
7000000	0,7351	0,7351	0,7351	-29,77	-29,77	-29,77
8000000	0,743	0,7429	0,7429	-30,58	-30,58	-30,58
10000000	0,6127	0,6127	0,6127	-32,33	-32,33	-32,33
12000000	0,5699	0,5699	0,5699	-31,7	-31,7	-31,7
13000000	0,5484	0,5483	0,5483	-31,87	-31,87	-31,87

Tabla C.3 Medidas para la muestra 1 con $S_w = 90\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	4,040	4,100	4,18	-26,1	-26,5	-26,3
100	3,960	3,980	4,000	-23,5	-23,1	-22,7
500	3,301	3,246	3,218	-14,02	-13,66	-13,31
1000	2,934	2,916	2,902	-8,33	-8,22	-8,17
1500	2,822	2,823	2,825	-6,52	-6,49	-6,44
2000	2,789	2,789	2,789	-5,65	-5,65	-5,65
6000	2,706	2,710	2,713	-4,38	-4,4	-4,38
11000	2,677	2,682	2,685	-4,32	-4,33	-4,34
30000	2,626	2,629	2,633	-5,28	-5,33	-5,29
70000	2,554	2,559	2,565	-7,65	-7,66	-7,66
120000	2,496	2,500	2,501	-10,31	-10,33	-10,33
180000	2,42	2,42	2,423	-13,2	-13,19	-13,2
220000	2,346	2,348	2,351	-15,71	-15,73	-15,74

300000	2,281	2,282	2,284	-17,89	-17,91	-17,93
400000	2,169	2,171	2,173	-21,08	-21,11	-21,12
500000	2,061	2,062	2,064	-23,58	-23,59	-23,62
600000	1,962	1,963	1,964	-25,59	-25,6	-25,61
700000	1,890	1,891	1,892	-27,42	-27,42	-27,46
900000	1,732	1,732	1,733	-29,71	-29,73	-29,74
1100000	1,604	1,604	1,604	-31,2	-31,21	-31,22
1300000	1,498	1,499	1,499	-32,18	-32,21	-32,21
1500000	1,411	1,411	1,411	-32,8	-32,8	-32,8
1700000	1,338	1,338	1,338	-33,16	-33,16	-33,16
2000000	1,247	1,247	1,247	-33,38	-33,38	-33,38
2600000	1,116	1,116	1,116	-33,21	-33,21	-33,21
3000000	1,0531	1,0532	1,0535	-32,86	-32,86	-32,87
4000000	0,9449	0,9451	0,945	-32,07	-32,08	-32,08
5000000	0,8762	0,8763	0,8763	-31,43	-31,43	-31,43
6000000	0,83	0,830	0,83	-30,98	-30,98	-30,98
9000000	0,6992	0,6992	0,6992	-37,00	-37,00	-37
13000000	0,5924	0,5924	0,5924	-35,16	-35,16	-35,16

Tabla C.4 Medidas para la muestra 1 con $S_w = 80\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	24,400	25,100	25,300	-27,80	-28,80	-29,30
100	23,310	23,400	23,500	-29,70	-29,80	-29,90
500	17,130	17,000	16,660	-24,40	-24,35	-24,28
1000	13,790	13,680	13,420	-19,35	-19,35	-19,57
2000	11,240	11,210	11,120	-14,48	-14,40	-14,33
3000	8,983	8,961	8,934	-9,89	-9,81	-9,79
5000	8,578	8,545	8,525	-8,45	-8,45	-8,46
12000	8,115	8,116	8,125	-8,64	-8,66	-8,68
22000	7,849	7,861	7,866	-10,68	-10,70	-10,74
90000	6,650	6,662	6,663	-24,54	-24,60	-24,63
160000	5,594	5,585	5,596	-34,22	-34,28	-34,37
300000	4,120	4,118	4,116	-43,58	-43,57	-43,66
500000	3,016	3,016	3,015	-48,12	-48,13	-48,14
700000	2,421	2,420	2,420	-49,20	-49,21	-49,21
900000	2,051	2,051	2,051	-48,89	-48,87	-48,87
1100000	1,803	1,803	1,803	-48,02	-48,04	-48,03
1300000	1,626	1,626	1,626	-46,93	-46,96	-46,96
1500000	1,494	1,494	1,494	-45,72	-45,72	-45,72
2000000	1,279	1,279	1,279	-42,78	-42,78	-42,78
3000000	1,067	1,067	1,067	-38,15	-38,15	-38,14
4000000	0,963	0,962	0,963	-35,34	-35,34	-35,35
5000000	0,900	0,900	0,900	-33,73	-33,74	-33,74
7000000	0,831	0,831	0,831	-32,68	-32,68	-32,68
9000000	0,728	0,728	0,728	-38,71	-38,71	-38,71
11000000	0,670	0,670	0,670	-36,32	-36,32	-36,32
13000000	0,616	0,616	0,616	-37,02	-37,02	-37,02

Tabla C.5 *Medidas para la muestra 1 con $S_w = 60\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	3,890	3,980	4,020	-24,70	-24,10	-23,70
100	4,010	4,060	4,100	-19,70	-19,80	-19,70
500	3,642	3,608	3,565	-12,46	-12,41	-12,42
1000	3,357	3,341	3,328	-8,47	-8,38	-8,25
1500	3,382	3,385	3,398	-6,72	-6,70	-6,68
2000	3,420	3,432	3,437	-5,96	-5,95	-5,94
6000	3,350	3,377	3,389	-4,59	-4,84	-4,86
11000	3,386	3,393	3,403	-4,95	-4,97	-4,96
30000	3,337	3,355	3,364	-6,27	-6,30	-6,32
70000	3,299	3,310	3,319	-9,57	-9,58	-9,61
120000	3,216	3,220	3,224	-13,17	-13,21	-13,23
180000	3,074	3,077	3,085	-16,87	-16,95	-17,00
220000	3,011	3,016	3,020	-19,27	-19,34	-19,44
300000	2,841	2,844	2,842	-22,99	-23,05	-23,00
400000	2,619	2,620	2,620	-26,05	-26,08	-26,06
500000	2,430	2,430	2,431	-28,11	-28,13	-28,16
600000	2,273	2,274	2,274	-29,54	-29,57	-29,58
700000	2,142	2,142	2,143	-30,50	-30,52	-30,56
900000	1,937	1,937	1,937	-31,50	-31,51	-31,54
1100000	1,786	1,786	1,786	-31,94	-31,95	-31,96
1300000	1,671	1,671	1,671	-32,11	-32,12	-32,12
1500000	1,580	1,580	1,580	-32,10	-32,10	-32,11
1700000	1,505	1,506	1,505	-31,98	-31,97	-31,99
2000000	1,416	1,416	1,416	-31,72	-31,73	-31,72
2600000	1,291	1,291	1,291	-31,10	-31,10	-31,11
3000000	1,232	1,232	1,232	-30,79	-30,80	-30,79
4000000	1,127	1,127	1,127	-30,31	-30,32	-30,32
5000000	1,057	1,057	1,057	-30,10	-30,10	-30,11
6000000	1,013	1,013	1,013	-30,22	-30,22	-30,22
9000000	0,831	0,831	0,831	-37,67	-37,67	-37,19
13000000	0,697	0,697	0,697	-38,44	-38,43	-38,44

Tabla C.6 *Medidas para la muestra 1 con $S_w = 50\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	15,300	15,100	15,100	-24,60	-24,30	-24,20
100	13,700	13,700	13,600	-20,30	-20,50	-20,60
500	11,120	11,030	10,196	-12,24	-12,36	-12,75
1000	8,512	8,494	8,463	-10,56	-10,36	-10,12
1500	8,015	7,953	7,891	-8,02	-7,98	-7,96
2000	7,542	7,498	7,500	-6,76	-6,75	-6,75
6000	7,021	7,007	7,007	-5,80	-5,82	-5,86
11000	6,791	6,792	6,794	-6,37	-6,42	-6,45

30000	6,429	6,429	6,433	-9,00	-9,04	-9,07
70000	6,031	6,041	6,041	-14,63	-14,68	-14,69
120000	5,578	5,586	5,580	-20,28	-20,31	-20,31
180000	5,089	5,082	5,084	-25,58	-25,52	-25,56
220000	4,797	4,801	4,803	-28,41	-28,46	-28,47
300000	4,285	4,286	4,287	-32,62	-32,65	-32,68
400000	3,769	3,771	3,772	-36,01	-36,05	-36,06
500000	3,373	3,373	3,373	-38,05	-38,06	-38,07
600000	3,061	3,061	3,061	-39,19	-39,20	-39,21
700000	2,813	2,812	2,813	-39,80	-39,81	-39,81
900000	2,451	2,451	2,451	-39,84	-39,84	-39,85
1100000	2,204	2,040	2,204	-39,19	-39,20	-39,20
1300000	2,026	2,026	2,026	-38,34	-38,34	-38,35
1500000	1,897	1,897	1,896	-37,36	-37,37	-37,37
1700000	1,798	1,797	1,798	-36,44	-36,44	-36,43
2000000	1,687	1,687	1,687	-35,19	-35,19	-35,20
2600000	1,546	1,546	1,546	-33,42	-33,42	-33,42
3000000	1,483	1,483	1,483	-32,74	-32,74	-32,74
4000000	1,374	1,374	1,374	-32,15	-32,15	-32,15
5000000	1,301	1,300	1,300	-32,47	-32,47	-32,47
6000000	1,254	1,253	1,252	-33,22	-33,22	-33,21
9000000	1,003	1,003	1,003	-42,98	-42,98	-42,98
13000000	0,828	0,828	0,828	-44,98	-44,98	-44,94

Tabla C.7 Medidas para la muestra 1 con $S_w = 40\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	4,310	4,340	4,350	-17,20	-17,10	-17,00
100	4,170	4,170	4,170	-13,90	-13,80	-13,80
500	3,758	3,727	3,709	-7,30	-7,31	-7,33
1000	3,478	3,462	3,458	-5,84	-5,78	-5,76
1500	3,392	3,400	3,397	-5,14	-5,10	-5,11
2000	3,384	3,390	3,393	-4,88	-4,88	-4,89
6000	3,270	3,276	3,279	-4,78	-4,80	-4,81
11000	3,239	3,247	3,257	-5,31	-5,34	-5,37
30000	3,122	3,125	3,130	-6,97	-6,98	-7,00
70000	2,958	2,961	2,963	-9,40	-9,42	-9,42
120000	2,827	2,829	2,831	-11,68	-11,70	-11,71
180000	2,702	2,706	2,708	-13,81	-13,84	-13,87
220000	2,649	2,644	2,647	-15,23	-14,95	-14,98
300000	2,535	2,537	2,538	-17,19	-17,22	-17,23
400000	2,415	2,417	2,418	-19,55	-19,56	-19,59
500000	2,314	2,315	2,316	-21,57	-21,59	-21,60
600000	2,218	2,219	2,220	-23,17	-23,18	-23,20
700000	2,131	2,132	2,133	-24,54	-24,56	-24,57
900000	1,978	1,978	1,979	-26,54	-26,55	-26,56
1100000	1,850	1,851	1,851	-27,95	-27,96	-27,98

1300000	1,749	1,750	1,750	-29,22	-29,22	-29,23
1500000	1,658	1,659	1,659	-29,88	-29,90	-29,91
1700000	1,582	1,582	1,582	-30,30	-30,31	-30,32
2000000	1,486	1,486	1,486	-30,58	-30,59	-30,60
2600000	1,347	1,347	1,347	-30,59	-30,59	-30,60
3000000	1,281	1,281	1,281	-30,46	-30,47	-30,47
4000000	1,165	1,165	1,165	-30,09	-30,10	-30,10
5000000	1,090	1,090	1,090	-29,80	-29,81	-29,81
6000000	1,043	1,043	1,043	-29,82	-29,82	-29,82
9000000	0,861	0,861	0,861	-37,48	-37,48	-37,48
13000000	0,728	0,728	0,728	-37,44	-37,44	-37,44

Tabla C.8 *Medidas para la muestra 1 con $S_w = 30\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	5,450	5,640	5,700	-21,70	-21,20	-21,70
100	5,570	5,670	5,640	-16,60	-16,80	-16,50
500	5,067	5,030	5,006	-10,42	-10,44	-10,46
1000	4,692	4,678	4,668	-7,94	-7,88	-7,83
1500	4,552	4,557	4,557	-6,44	-6,38	-6,36
2000	4,536	4,532	4,550	-5,73	-5,72	-5,71
6000	4,401	4,408	4,420	-4,86	-4,88	-4,90
11000	4,391	4,404	4,410	-5,08	-5,10	-5,12
30000	4,274	4,290	4,295	-6,15	-6,18	-6,19
70000	4,138	4,145	4,151	-8,20	-8,22	-8,23
120000	4,026	4,039	4,045	-10,36	-10,41	-10,43
180000	3,914	3,919	3,926	-12,64	-12,67	-12,69
220000	3,869	3,876	3,879	-14,17	-14,21	-14,23
300000	3,725	3,729	3,731	-16,52	-16,55	-16,57
400000	3,551	3,553	3,555	-18,86	-18,87	-18,90
500000	3,397	3,399	3,401	-20,74	-20,77	-20,79
600000	3,259	3,261	3,263	-22,28	-22,30	-22,35
700000	3,137	3,138	3,139	-23,58	-23,61	-23,62
900000	2,920	2,921	2,922	-25,24	-25,26	-25,28
1100000	2,749	2,750	2,750	-26,33	-26,35	-26,36
1300000	2,614	2,615	2,615	-27,35	-27,36	-27,37
1500000	2,501	2,501	2,501	-27,84	-27,85	-27,85
1700000	2,408	2,408	2,408	-28,22	-28,23	-28,23
2000000	2,295	2,295	2,295	-28,66	-28,66	-28,67
2600000	2,134	2,134	2,134	-29,49	-29,49	-29,49
3000000	2,054	2,054	2,054	-30,19	-30,20	-30,20
4000000	1,903	1,903	1,903	-32,17	-32,17	-32,17
5000000	1,791	1,791	1,791	-34,29	-34,30	-34,29
6000000	1,718	1,718	1,718	-36,40	-36,40	-36,40
9000000	1,269	1,269	1,269	-50,43	-50,43	-50,40
13000000	1,022	1,022	1,022	-52,63	-52,63	-52,59

Tabla C.9 *Medidas para la muestra 1 con $S_w = 20\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	11,4	9,29	9,07	-23,4	-20,9	-20,6
100	8,11	8,14	8,16	-15,6	-15,5	-15,3
500	7,166	7,113	7,076	-8,52	-8,3	-8,22
1000	6,728	6,72	6,722	-5,68	-5,6	-5,55
1500	6,858	6,894	6,918	-4,49	-4,46	-4,45
2000	7,064	6,921	6,936	-4,13	-4,09	-4,07
6000	6,878	6,907	6,918	-3,82	-3,85	-3,86
11000	6,91	6,927	6,964	-4,27	-4,31	-4,33
30000	6,815	6,85	6,864	-6,27	-6,34	-6,35
70000	6,62	6,632	6,643	-10,17	-10,21	-10,23
120000	6,348	6,359	6,368	-14,2	-14,26	-14,3
180000	6,021	6,03	6,035	-18,14	-18,21	-18,25
220000	5,82	5,828	5,831	-20,38	-20,42	-20,4
300000	5,406	5,409	5,413	-23,55	-23,56	-23,63
400000	4,967	4,973	4,974	-26,21	-26,33	-26,34
500000	4,613	4,614	4,615	-28	-28,04	-28,06
600000	4,323	4,323	4,324	-29,05	-29,08	-29,11
700000	4,086	4,086	4,086	-29,72	-29,77	-29,78
900000	3,728	3,728	3,728	-30,33	-30,35	-30,37
1100000	3,476	3,476	3,476	-30,5	-30,52	-30,53
1300000	3,292	3,292	3,292	-30,59	-30,59	-30,6
1500000	3,151	3,151	3,151	-30,68	-30,69	-30,69
1700000	3,04	3,04	3,04	-30,82	-30,82	-30,83
2000000	2,908	2,908	2,908	-31,2	-31,2	-31,21
2600000	2,718	2,718	2,718	-32,41	-32,41	-32,41
3000000	2,62	2,62	2,62	-33,5	-33,51	-33,51
4000000	2,416	2,416	2,416	-36,59	-36,59	-36,59
5000000	2,256	2,256	2,256	-39,67	-39,67	-39,67
6000000	2,148	2,148	2,148	-42,68	-42,68	-42,68
9000000	1,446	1,446	1,446	-58,28	-58,28	-58,28
13000000	1,136	1,136	1,136	-60,27	-60,27	-60,27

Tabla C.10 *Medidas para la muestra 1 con $S_w = 10\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	120,000	87,500	86,700	-11,00	-11,30	-11,30
100	64,900	62,300	61,500	-9,50	-9,40	-9,30
500	48,750	47,600	47,220	-4,32	-4,20	-4,22
1000	43,150	43,050	42,990	-4,12	-4,17	-4,17
1500	41,200	41,490	41,550	-4,61	-4,66	-4,67
2000	41,070	41,210	41,030	-5,26	-5,28	-5,30
6000	39,220	39,330	39,430	-9,37	-9,46	-9,51
11000	37,370	37,350	37,300	-14,09	-14,08	-14,08

30000	31,010	30,990	30,980	-26,84	-26,89	-26,90
70000	21,820	21,810	21,810	-39,23	-39,28	-39,26
120000	15,920	15,910	15,900	-43,54	-43,56	-43,54
180000	12,390	12,380	12,380	-43,47	-43,49	-43,50
220000	11,010	10,998	10,996	-42,48	-42,40	-42,43
300000	9,353	9,344	9,342	-40,04	-40,06	-40,07
400000	8,231	8,227	8,226	-37,50	-37,50	-37,48
500000	7,582	7,577	7,575	-35,68	-35,71	-35,71
600000	7,144	7,142	7,140	-34,60	-34,60	-34,61
700000	6,826	6,824	6,822	-33,99	-34,00	-34,00
900000	6,385	6,384	6,382	-33,75	-33,75	-33,75
1100000	6,061	6,059	6,058	-34,31	-34,31	-34,31
1300000	5,769	5,768	5,768	-35,22	-35,22	-35,21
1500000	5,543	5,543	5,542	-36,38	-36,36	-36,36
1700000	5,340	5,339	5,339	-37,65	-37,65	-37,65
2000000	5,068	5,067	5,067	-39,64	-39,63	-39,63
2600000	4,609	4,608	4,608	-43,57	-43,57	-43,57
3000000	4,342	4,341	4,341	-46,10	-46,10	-46,10
4000000	3,770	3,770	3,770	-51,60	-51,60	-51,60
5000000	3,340	3,340	3,340	-56,02	-56,02	-56,02
6000000	3,058	3,058	3,058	-60,61	-60,61	-60,61
9000000	1,711	1,712	1,712	-73,29	-73,29	-73,29
13000000	1,300	1,300	1,300	-74,01	-74,01	-74,01

Tabla C.11 *Medidas para la muestra 2 con $S_w = 100\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	7,740	7,660	7,610	-23,90	-23,50	-23,30
100	6,790	6,780	6,790	-18,70	-18,70	-18,70
500	5,900	5,887	5,871	-10,34	-10,16	-10,09
3000	5,299	5,298	5,295	-6,08	-6,13	-6,15
10000	4,888	4,881	4,875	-7,04	-7,09	-7,11
50000	4,232	4,226	4,224	-11,28	-11,31	-11,33
100000	3,870	3,868	3,868	-14,34	-14,36	-14,38
500000	2,845	2,844	2,847	-26,17	-26,24	-26,22
1000000	2,234	2,234	2,234	-33,14	-33,13	-33,12
1500000	1,870	1,870	1,870	-36,61	-36,61	-36,61
3000000	1,328	1,328	1,328	-39,11	-39,11	-39,11
4500000	1,092	1,092	1,093	-38,58	-38,59	-38,49
6000000	0,968	0,968	0,968	-37,88	-37,88	-37,89
8000000	0,905	0,903	0,900	-41,90	-41,59	-41,71
10000000	0,719	0,719	0,718	-40,33	-40,33	-40,32
13000000	0,619	0,619	0,619	-39,59	-39,58	-39,58

Tabla C.12 *Medidas para la muestra 2 con $S_w = 80\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	5,050	4,920	4,880	-24,90	-23,90	-23,30
100	4,410	4,440	4,440	-17,40	-17,30	-17,30
500	3,988	3,981	3,983	-8,84	-8,66	-8,58
3000	3,682	3,698	3,709	-6,89	-6,93	-6,95
10000	3,507	3,514	3,520	-7,94	-8,00	-8,02
50000	3,050	3,052	3,056	-10,91	-10,94	-10,97
100000	2,934	2,937	2,939	-13,11	-13,14	-13,16
500000	2,326	2,327	2,329	-18,61	-18,58	-18,57
1000000	2,020	2,021	2,022	-23,14	-23,14	-23,13
1500000	1,817	1,819	1,819	-26,20	-26,21	-26,22
3000000	1,451	1,451	1,452	-30,53	-30,54	-30,55
4500000	1,260	1,260	1,261	-32,51	-32,52	-32,53
6000000	1,153	1,154	1,154	-33,81	-33,81	-33,82
8000000	1,113	1,113	1,113	-41,79	-41,80	-41,86
10000000	0,856	0,857	0,859	-41,65	-41,66	-41,48
13000000	0,735	0,736	0,736	-43,00	-43,01	-43,01

Tabla C.13 *Medidas para la muestra 2 con $S_w = 60\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	3,350	3,390	3,410	-12,60	-12,40	-12,20
100	3,420	3,430	3,460	-8,70	-8,70	-8,60
500	3,321	3,324	3,326	-6,23	-6,18	-6,16
3000	3,066	3,067	3,074	-7,55	-7,52	-7,51
10000	2,834	2,842	2,855	-8,87	-8,94	-9,01
50000	2,477	2,484	2,491	-9,01	-9,05	-9,09
100000	2,383	2,390	2,395	-9,34	-9,35	-9,38
500000	2,100	2,106	2,109	-13,18	-13,23	-13,27
1000000	1,420	1,945	1,948	-18,38	-18,43	-18,48
1500000	1,803	1,804	1,806	-22,54	-22,57	-22,61
3000000	1,478	1,478	1,479	-29,12	-29,14	-29,17
4500000	1,282	1,283	1,283	-32,40	-32,41	-32,42
6000000	1,167	1,167	1,167	-34,38	-34,37	-34,39
8000000	1,116	1,116	1,117	-41,50	-41,52	-41,53
10000000	0,876	0,876	0,876	-42,23	-42,23	-42,24
13000000	0,750	0,750	0,750	-44,21	-44,22	-44,22

Tabla C.14 *Medidas para la muestra 2 con $S_w = 50\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	6,860	6,900	6,960	-13,30	-13,20	-13,00
100	6,900	6,940	6,960	-10,50	-10,50	-10,40
500	6,487	6,477	6,454	-7,76	-7,66	-7,57
3000	5,700	5,688	5,642	-8,98	-8,87	-8,80
10000	4,947	4,923	4,910	-10,00	-9,93	-9,96
50000	4,066	4,055	4,047	-11,17	-11,11	-11,05
100000	3,739	3,734	3,732	-11,90	-11,85	-11,81
500000	3,030	3,031	3,033	-19,00	-18,95	-18,94
1000000	2,598	2,599	2,600	-25,34	-25,36	-25,36
1500000	2,287	2,288	2,289	-29,18	-29,21	-29,22
3000000	1,773	1,773	1,773	-33,68	-33,69	-33,71
4500000	1,532	1,531	1,531	-35,95	-35,95	-35,96
6000000	1,398	1,398	1,398	-38,04	-38,05	-38,04
8000000	1,336	1,336	1,336	-48,01	-48,02	-48,02
10000000	1,016	1,016	1,016	-47,57	-47,57	-47,58
13000000	0,859	0,859	0,859	-50,30	-50,29	-50,31

Tabla C.15 *Medidas para la muestra 2 con $S_w = 30\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	12,700	12,600	12,600	-22,00	-21,70	-21,50
100	11,500	11,500	11,500	-17,40	-17,40	-17,30
500	9,057	9,072	9,031	-9,54	-9,29	-9,23
3000	7,967	7,967	7,951	-8,23	-8,22	-8,21
10000	7,231	7,212	7,209	-9,20	-9,21	-9,21
50000	6,144	6,126	6,121	-11,47	-11,41	-11,39
100000	5,666	5,661	5,656	-13,73	-13,70	-13,64
500000	4,236	4,237	4,239	-26,16	-26,12	-26,09
1000000	3,314	3,315	3,316	-33,14	-33,13	-33,14
1500000	2,783	2,783	2,783	-35,62	-35,63	-35,64
3000000	2,782	2,781	2,781	-35,72	-35,73	-35,74
4500000	1,818	1,818	1,818	-40,08	-40,08	-40,08
6000000	1,659	1,659	1,659	-42,83	-42,83	-42,83
8000000	1,569	1,569	1,569	-56,84	-56,84	-57,94
10000000	1,128	1,128	1,128	-53,92	-53,92	-53,92
13000000	0,942	0,942	0,942	-56,65	-56,65	-56,65

Tabla C.16 *Medidas para la muestra 2 con $S_w = 20\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	18,700	18,600	18,500	-15,90	-16,00	-15,90
100	17,000	17,000	16,900	-12,30	-12,20	-12,10
500	15,050	14,930	14,900	-7,50	-7,41	-7,36
3000	13,060	13,000	12,980	-8,13	-8,13	-8,12
10000	11,550	11,510	11,470	-9,62	-9,61	-9,61
50000	9,528	9,522	9,501	-13,57	-13,56	-13,52
100000	8,549	8,533	8,526	-17,45	-17,38	-17,35
500000	5,520	5,520	5,519	-31,56	-31,52	-31,50
1000000	4,142	4,142	4,141	-35,17	-35,17	-35,17
1500000	3,512	3,511	3,510	-36,21	-36,21	-36,21
3000000	2,753	2,752	2,751	-39,74	-39,74	-39,73
4500000	2,356	2,355	2,354	-44,43	-44,42	-44,42
6000000	2,103	2,102	2,102	-48,85	-48,84	-48,84
8000000	1,901	1,900	1,901	-64,61	-64,59	-64,58
10000000	1,329	1,329	1,329	-60,96	-60,96	-60,95
13000000	1,080	1,080	1,080	-63,80	-63,79	-63,78

Tabla C.17 *Medidas para la muestra 2 con $S_w = 10\%$.*

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	33,900	33,900	33,900	-10,40	-10,30	-10,30
100	32,000	32,000	32,000	-8,20	-8,10	-8,10
500	29,630	29,650	29,650	-4,93	-4,91	-4,89
3000	28,000	28,140	28,260	-4,21	-4,26	-4,30
10000	27,260	27,380	27,400	-5,85	-6,00	-6,03
50000	24,770	24,820	24,860	-13,57	-13,68	-13,75
100000	22,220	22,220	22,210	-19,84	-19,91	-19,93
500000	14,190	14,190	14,190	-35,04	-35,01	-35,00
1000000	10,799	10,799	10,798	-44,86	-44,85	-44,85
1500000	8,770	8,770	8,770	-51,93	-51,93	-51,93
3000000	5,567	5,567	5,567	-64,99	-64,99	-64,99
4500000	4,034	4,034	4,034	-70,97	-70,97	-70,97
6000000	3,221	3,221	3,221	-75,63	-75,63	-75,63
8000000	2,413	2,413	2,413	-91,15	-91,15	-91,15
10000000	1,675	1,675	1,675	-81,25	-81,25	-81,25
13000000	1,284	1,284	1,284	-82,44	-82,44	-82,44

Tabla C.18 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 100\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
100	3,490	3,430	3,370	-19,1	-19	-19
500	2,348	2,282	2,215	-12,85	-12,81	-12,75
1000	1,858	1,844	1,823	-9,07	-9,13	-9,1
1500	1,681	1,667	1,656	-7,71	-7,8	-7,88
2000	1,549	1,543	1,54	-6,96	-6,92	-6,94
2500	1,453	1,451	1,45	-6,38	-6,36	-6,36
3000	1,432	1,431	1,43	-5,76	-5,76	-5,78
3500	1,413	1,413	1,412	-5,35	-5,35	-5,35
4000	1,39	1,39	1,389	-5,06	-5,06	-5,06
4500	1,38	1,379	1,379	-4,77	-4,77	-4,77
5000	1,371	1,371	1,371	-4,52	-4,53	-4,53
5500	1,364	1,363	1,363	-4,35	-4,36	-4,36
6000	1,312	1,312	1,312	-4,31	-4,31	-4,3
7000	1,279	1,278	1,278	-4,34	-4,33	-4,33
8000	1,272	1,271	1,271	-4,07	-4,07	-4,08
9000	1,266	1,266	1,266	-3,91	-3,91	-3,91
10000	1,261	1,26	1,26	-3,77	-3,77	-3,78
11000	1,255	1,255	1,255	-3,65	-3,65	-3,65
12000	1,246	1,246	1,246	-3,62	-3,62	-3,62
13500	1,242	1,242	1,242	-3,47	-3,47	-3,47
15000	1,238	1,239	1,239	-3,35	-3,35	-3,35
17000	1,235	1,235	1,235	-3,22	-3,22	-3,22
19000	1,2314	1,231	1,231	-3,12	-3,13	-3,13
22000	1,227	1,227	1,227	-3,02	-3,02	-3,02
25000	1,222	1,222	1,222	-2,98	-2,98	-2,98
28000	1,218	1,218	1,218	-2,92	-2,91	-2,90
30000	2,95	2,96	2,97	-8,8	-8,68	-8,65
50000	2,877	2,879	2,88	-8,1	-8,12	-8,14
70000	2,808	2,807	2,809	-8,43	-8,45	-8,46
90000	2,762	2,746	2,747	-9,03	-8,99	-9
100000	2,701	2,7	2,701	-9,3	-9,32	-9,34
120000	2,668	2,659	2,661	-10,00	-10,00	-10,00
140000	2,621	2,607	2,615	-10,69	-10,66	-10,67
160000	2,542	2,541	2,542	-11,18	-11,17	-11,18
180000	2,523	2,524	2,526	-11,91	-11,92	-11,94
200000	2,502	2,498	2,499	-12,61	-12,6	-12,62
220000	2,48	2,479	2,479	-13,29	-13,29	-13,3
240000	2,458	2,459	2,459	-13,98	-13,98	-13,98
260000	2,437	2,439	2,439	-14,61	-14,63	-14,62
280000	2,422	2,422	2,422	-15,32	-15,33	-15,34
300000	2,403	2,404	2,405	-15,98	-16	-16,01
400000	2,304	2,305	2,305	-18,91	-18,93	-18,93
500000	2,215	2,214	2,213	-21,57	-21,63	-21,65
600000	2,117	2,116	2,117	-23,91	-23,91	-23,92
700000	2,03	2,03	2,03	-25,94	-25,88	-25,93
800000	1,953	1,953	1,953	-27,72	-27,75	-27,76

900000	1,877	1,877	1,877	-29,29	-29,3	-29,31
1000000	1,807	1,807	1,807	-30,68	-30,68	-30,67
1100000	1,742	1,742	1,742	-31,85	-31,85	-31,85
1200000	1,681	1,681	1,681	-32,87	-32,88	-32,86
1300000	1,625	1,625	1,625	-33,78	-33,78	-33,79
1400000	1,573	1,573	1,572	-34,58	-34,6	-34,6
1500000	1,523	1,524	1,524	-35,38	-35,45	-35,47
1600000	1,477	1,477	1,477	-36,06	-36,06	-36,06
1700000	1,433	1,433	1,433	-36,82	-36,84	-36,84
1800000	1,393	1,394	1,394	-37,34	-37,34	-37,34
1900000	1,356	1,356	1,356	-37,75	-37,75	-37,73
2000000	1,321	1,321	1,321	-38,26	-38,28	-38,3
2200000	1,258	1,258	1,258	-38,85	-38,84	-38,88
2400000	1,202	1,202	1,202	-39,15	-39,1	-39,16
2600000	1,153	1,153	1,154	-39,59	-39,61	-39,6
2800000	1,109	1,109	1,109	-39,82	-39,83	-39,83
3000000	1,0687	1,0689	1,0688	-39,89	-39,91	-39,92
3300000	1,0162	1,0161	1,0161	-39,98	-39,99	-39,99
3900000	0,9309	0,931	0,931	-39,84	-39,84	-39,84
4200000	0,8961	0,8963	0,8963	-39,79	-39,81	-39,81
4500000	0,8653	0,8653	0,8654	-39,58	-39,58	-39,59
5000000	0,8209	0,8209	0,8209	-39,14	-39,14	-39,15
5500000	0,7841	0,7842	0,7842	-38,71	-38,71	-38,71
6000000	0,7535	0,7527	0,7527	-38,35	-38,22	-38,22
6500000	0,7288	0,7288	0,7287	-37,8	-37,82	-37,82
7000000	0,7076	0,7076	0,7076	-37,6	-37,63	-37,63
8000000	0,6828	0,6831	0,6829	-38,48	-38,49	-38,47
9000000	0,6033	0,6034	0,6033	-38,56	-38,55	-38,57
10000000	0,5725	0,5725	0,5725	-37,06	-37,06	-37,06
11000000	0,5498	0,5499	0,5461	-36,24	-36,26	-36,3
12000000	0,521	0,521	0,521	-35,76	-35,76	-35,76
13000000	0,4972	0,4972	0,4972	-35,31	-35,32	-35,32

Tabla C.19 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 90\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	4,190	4,280	4,470	-22,1	-22,2	-22,3
100	4,470	4,590	4,600	-20,4	-20,3	-20,3
500	3,796	3,718	3,650	-13,94	-13,75	-13,45
1000	3,289	3,273	3,268	-8,49	-8,28	-8,11
1500	3,229	3,236	3,244	-6,28	-6,22	-6,16
4000	3,163	3,176	3,185	-4,24	-4,24	-4,26
6000	3,234	3,241	3,245	-3,83	-3,82	-3,82
8000	3,256	3,263	3,271	-3,65	-3,66	-3,66
10000	3,288	3,297	3,300	-3,61	-3,61	-3,61
30000	3,322	3,326	3,331	-4,26	-4,27	-4,28
100000	3,227	3,231	3,235	-7,87	-7,89	-7,89
200000	3,119	3,122	3,123	-12,74	-12,75	-12,75

300000	3,011	3,015	3,017	-17,17	-17,19	-17,2
400000	2,895	2,898	2,899	-21,17	-21,17	-21,17
600000	2,644	2,647	2,648	-27,78	-27,8	-27,81
800000	2,408	2,410	2,411	-32,88	-32,9	-32,92
1000000	2,196	2,197	2,198	-36,76	-36,77	-36,79
1500000	1,779	1,779	1,779	-42,73	-42,74	-42,74
2000000	1,490	1,491	1,491	-45,42	-45,43	-45,44
2500000	1,290	1,290	1,290	-46,44	-46,44	-46,44
3000000	1,145	1,145	1,145	-46,56	-46,57	-46,57
3500000	1,036	1,036	1,036	-46,1	-46,1	-46,1
4000000	0,953	0,953	0,953	-45,43	-45,43	-45,43
5000000	0,835	0,835	0,835	-43,81	-43,83	-43,83
6000000	0,759	0,759	0,759	-42,13	-42,13	-42,13
7000000	0,707	0,707	0,707	-40,86	-40,86	-40,86
9000000	0,595	0,595	0,595	-42,12	-42,19	-42,19
11000000	0,533	0,533	0,533	-38,46	-38,46	-38,44
13000000	0,485	0,485	0,485	-36,84	-36,84	-36,84

Tabla C.20 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 80\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	6,100	6,300	6,500	-19,30	-18,90	-18,60
100	6,660	6,700	6,740	-15,50	-15,00	-14,90
500	5,719	5,622	5,590	-7,78	-7,61	-7,58
1500	5,178	5,188	5,192	-4,78	-4,77	-4,77
2000	5,404	5,408	5,411	-3,63	-3,63	-3,64
4000	5,336	5,342	5,348	-3,24	-3,24	-3,25
6000	5,319	5,322	5,326	-3,21	-3,21	-3,22
12000	5,263	5,267	5,272	-3,53	-3,54	-3,54
25000	5,207	5,211	5,214	-4,69	-4,69	-4,69
50000	5,123	5,125	5,128	-7,12	-7,12	-7,13
100000	4,981	4,984	4,986	-11,81	-11,81	-11,82
200000	4,626	4,628	4,629	-19,96	-19,99	-20,00
300000	4,267	4,269	4,270	-26,76	-26,77	-26,78
400000	3,906	3,908	3,909	-31,97	-31,98	-32,00
500000	3,584	3,585	3,585	-36,01	-36,07	-36,07
700000	3,048	3,049	3,049	-41,70	-41,71	-41,71
900000	2,645	2,645	2,645	-45,25	-45,25	-45,25
1100000	2,341	2,341	2,341	-47,73	-47,75	-47,75
1500000	1,907	1,907	1,907	-50,23	-50,23	-50,23
2000000	1,564	1,564	1,564	-51,23	-51,23	-51,23
3000000	1,183	1,183	1,183	-50,36	-50,36	-50,36
5000000	0,860	0,860	0,860	-45,92	-45,93	-45,92
7000000	0,731	0,731	0,731	-42,43	-42,43	-42,43
9000000	0,612	0,612	0,612	-43,94	-43,94	-43,94
11000000	0,550	0,550	0,550	-39,96	-39,96	-39,96
13000000	0,501	0,501	0,501	-38,40	-38,40	-38,40

Tabla C.21 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 70\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	4,080	4,080	4,190	-20,50	-20,10	-19,80
100	3,960	3,940	3,930	-16,90	-16,50	-16,30
500	3,205	3,147	3,114	-9,00	-8,56	-8,27
1000	2,909	2,905	2,906	-5,54	-5,50	-5,47
3000	2,766	2,765	2,761	-3,76	-3,78	-3,78
5000	2,721	2,720	2,723	-3,36	-3,36	-3,36
9000	2,689	2,689	2,689	-3,10	-3,10	-3,10
50000	2,596	2,599	2,605	-3,97	-3,97	-3,98
200000	2,505	2,508	2,511	-8,74	-8,75	-8,76
400000	2,409	2,413	2,418	-14,54	-14,56	-14,58
600000	2,303	2,307	2,309	-19,60	-19,63	-19,65
800000	2,183	2,184	2,186	-23,89	-23,90	-23,92
1000000	2,059	2,060	2,061	-27,41	-27,43	-27,45
3000000	1,252	1,252	1,252	-39,69	-39,72	-39,73
5000000	0,953	0,953	0,953	-39,65	-39,65	-39,65
7000000	0,826	0,826	0,826	-38,66	-38,67	-38,67
9000000	0,685	0,685	0,685	-43,07	-43,08	-43,09
11000000	0,617	0,617	0,617	-39,57	-39,58	-39,59
13000000	0,561	0,561	0,561	-39,05	-39,13	-39,13

Tabla C.22 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 60\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	8,520	8,540	8,480	-26,60	-26,40	-26,30
100	7,710	7,850	7,810	-23,70	-23,70	-23,60
500	6,425	6,336	6,255	-16,05	-6,04	-15,82
1000	5,521	5,446	5,387	-10,96	-10,96	-10,82
3000	4,789	4,763	4,745	-6,84	-6,82	-6,82
70000	3,967	3,971	3,972	-9,97	-9,98	-9,98
500000	2,838	2,839	2,841	-29,77	-29,79	-29,80
1000000	2,115	2,117	2,119	-37,62	-37,65	-37,66
2000000	1,497	1,498	1,498	-41,11	-41,12	-41,14
5000000	0,953	0,953	0,953	-39,45	-39,47	-39,48
8000000	0,836	0,836	0,836	-39,46	-39,47	-39,51
11000000	0,642	0,642	0,642	-40,38	-40,41	-40,41
13000000	0,585	0,585	0,585	-40,36	-40,36	-40,36

Tabla C.23 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 50\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	7,550	7,520	7,370	-26,60	-26,90	-27,00
100	6,840	6,910	6,970	-23,90	-24,10	-23,90
500	6,015	5,942	5,959	-16,68	-16,63	-16,62
1000	5,459	5,451	5,398	-12,16	-12,21	-11,83
3000	4,952	4,947	4,941	-6,28	-6,28	-6,26
50000	4,279	4,276	4,276	-9,53	-9,53	-9,52
100000	4,062	4,065	4,071	-13,44	-13,44	-13,44
200000	3,731	3,745	3,746	-19,70	-19,76	-19,76
500000	2,933	2,937	2,940	-30,43	-30,48	-30,49
1000000	2,207	2,209	2,211	-37,18	-37,21	-37,25
1500000	1,820	1,822	1,823	-39,38	-39,40	-39,41
3000000	1,296	1,297	1,297	-39,80	-39,83	-39,85
5000000	1,032	1,033	1,033	-38,48	-38,50	-38,51
7000000	0,917	0,917	0,917	-38,12	-38,13	-38,15
11000000	0,704	0,704	0,704	-41,10	-41,12	-41,12
13000000	0,641	0,641	0,641	-41,56	-41,56	-41,56

Tabla C.24 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 40\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	7,190	7,490	7,540	-24,40	-24,10	-23,80
100	7,360	7,640	7,700	-20,10	-20,10	-20,10
500	7,052	7,022	7,002	-13,69	-13,67	-13,61
1000	6,571	6,572	6,547	-10,81	-10,74	-10,71
3000	6,104	6,082	6,092	-6,77	-6,72	-6,67
50000	5,261	5,286	5,284	-9,54	-9,55	-9,57
100000	5,113	5,134	5,149	-13,26	-13,34	-13,36
200000	4,789	4,792	4,787	-19,47	-19,49	-19,55
500000	3,804	3,808	3,813	-30,71	-30,76	-30,81
1000000	2,837	2,840	2,842	-38,27	-38,40	-38,47
1500000	2,314	2,315	2,316	-40,56	-40,60	-40,63
3000000	1,657	1,657	1,657	-40,25	-40,27	-40,30
5000000	1,352	1,352	1,352	-40,07	-40,08	-40,09
7000000	1,215	1,215	1,215	-41,75	-41,75	-41,75
11000000	0,894	0,894	0,894	-48,07	-48,08	-48,08
13000000	0,801	0,801	0,801	-49,52	-49,52	-49,53

Tabla C.25 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 30\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (KΩ)			θ_c (°)		
50	16,300	16,100	16,400	-27,70	-27,90	-28,10
100	14,700	14,700	14,600	-25,30	-25,30	-25,30
500	11,900	11,720	11,670	-16,17	-16,00	-15,73
1000	10,187	10,126	10,129	-11,34	-11,34	-11,02
3000	9,495	9,572	9,566	-6,84	-6,84	-6,79
50000	8,530	8,586	8,631	-11,41	-11,40	-11,44
100000	8,417	8,470	8,499	-17,79	-17,95	-18,05
200000	7,531	7,552	7,571	-27,81	-27,93	-28,05
500000	5,193	5,200	5,203	-40,86	-41,09	-41,15
1000000	3,520	3,521	3,521	-44,80	-44,85	-44,90
1500000	2,822	2,822	2,822	-44,37	-44,40	-44,44
3000000	2,067	2,067	2,067	-42,53	-42,53	-42,53
5000000	1,701	1,701	1,701	-44,09	-44,09	-44,09
7000000	1,514	1,514	1,514	-47,72	-47,72	-47,72
11000000	1,044	1,044	1,044	-55,61	-55,61	-55,61
13000000	0,920	0,920	0,920	-57,35	-57,36	-57,35

Tabla C.26 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 20\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (KΩ)			θ_c (°)		
50	21,900	21,600	21,400	-21,80	-21,70	-21,80
100	19,200	19,200	19,200	-18,70	-18,70	-18,70
500	16,010	15,720	15,650	-10,68	-10,44	-10,26
1000	14,460	14,410	14,390	-8,12	-8,02	-7,93
3000	13,490	13,530	13,570	-6,44	-6,41	6,42
50000	11,470	11,510	11,520	-13,31	-13,38	-13,43
100000	10,557	10,568	10,586	-19,52	-19,57	-19,64
200000	9,119	9,137	9,146	-28,23	-28,34	-28,36
500000	6,280	6,281	6,284	-38,88	-39,00	-39,16
1000000	4,391	4,390	4,388	-41,78	-41,80	-41,81
1500000	3,628	3,626	3,630	-41,66	-41,69	-41,71
3000000	2,771	2,771	2,771	-43,77	-43,77	-43,77
5000000	2,230	2,229	2,230	-49,48	-49,47	-49,47
7000000	1,924	1,924	1,924	-55,87	-55,83	-55,86
11000000	1,199	1,199	1,199	-64,25	-64,25	-64,25
13000000	1,041	1,041	1,041	-65,77	-65,79	-65,81

Tabla C.27 Medidas para la muestra 3 con $S_w = 10\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_e (°)		
50	156,000	150,000	101,000	-1,00	-6,00	-10,50
100	52,300	51,100	50,300	-15,70	-15,60	-15,60
500	40,310	39,520	39,420	-10,06	-9,76	-9,73
1000	36,140	35,800	35,310	-7,36	-7,22	-7,34
3000	33,020	32,920	32,800	-7,04	-7,05	-7,06
50000	23,540	23,530	23,500	-26,22	-26,31	-26,34
100000	18,310	18,220	18,250	-34,88	-35,14	-35,16
200000	12,980	12,960	12,960	-43,05	-43,11	-43,15
500000	7,537	7,532	7,526	-45,60	-45,64	-45,69
1000000	5,346	5,342	5,339	-43,00	-42,98	-42,99
1500000	4,538	4,530	4,526	-42,88	-42,89	-42,89
3000000	3,441	3,440	3,439	-48,36	-48,35	-48,34
5000000	2,640	2,638	2,638	-55,93	-55,92	-55,91
7000000	2,196	2,196	2,195	-63,11	-63,09	-63,08
11000000	1,290	1,290	1,290	-70,06	-70,04	-70,04
13000000	1,103	1,103	1,103	-71,35	-71,35	-71,33

Tabla C.28 Medidas para la muestra 4 con $S_w = 100\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_e (°)		
50	43,500	43,500	43,800	-27,60	-27,50	-27,40
100	42,300	42,800	43,200	-23,60	-23,60	-23,30
500	36,290	36,280	36,200	-18,08	-18,21	-18,19
1000	32,370	32,220	32,060	-15,12	-15,07	-14,94
2000	28,820	28,670	28,570	-12,59	-12,52	-12,48
3000	26,810	26,760	26,700	-11,61	-11,64	-11,76
6000	24,500	24,420	24,410	-10,88	-10,93	-10,94
12000	22,590	22,570	22,570	-10,46	-10,47	-10,48
30000	20,820	20,740	20,740	-11,55	-11,55	-11,56
100000	18,220	18,220	18,210	-19,12	-19,11	-19,10
160000	16,760	16,760	16,760	-25,04	-25,04	-25,03
280000	14,350	14,350	14,350	-34,36	-34,35	-34,35
400000	12,450	12,450	12,450	-41,26	-41,25	-41,24
600000	10,068	10,067	10,066	-49,06	-49,05	-49,05
800000	8,395	8,395	8,394	-54,22	-54,22	-54,22
1100000	6,693	6,693	6,692	-59,09	-59,09	-59,09
2000000	4,190	4,190	4,190	-65,14	-65,14	-65,14
4000000	2,396	2,396	2,396	-67,79	-67,79	-67,79
8000000	1,476	1,470	1,475	-74,91	-74,91	-74,91
13000000	0,838	0,838	0,838	-69,79	-69,79	-69,78

Tabla C.29 Medidas para la muestra 4 con $S_w = 80\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	25,700	58,800	25,900	-26,50	-26,30	-26,30
100	24,300	24,700	25,000	-22,70	-22,80	-22,80
500	21,450	21,460	21,580	-17,03	-17,01	-16,92
1000	20,300	20,350	20,400	-14,86	-14,88	-14,93
2000	18,840	18,880	18,870	-13,94	-13,92	-13,91
3000	18,010	18,010	18,060	-13,53	-13,52	-13,48
6000	16,540	16,390	16,450	-13,39	-13,39	-13,36
12000	15,170	15,210	15,260	-13,82	-13,86	-13,93
30000	13,600	13,620	13,630	-15,98	-16,04	-16,07
100000	11,140	11,140	11,140	-22,70	-22,69	-22,67
160000	9,997	9,995	9,998	-27,00	-27,02	-27,03
280000	8,441	8,443	8,444	-33,61	-33,64	-33,64
400000	7,364	7,364	7,365	-38,48	-38,52	-38,52
600000	6,099	6,099	6,100	-44,03	-44,05	-44,07
800000	5,211	5,211	5,211	-47,84	-47,85	-47,86
1100000	4,287	4,287	4,287	-51,32	-51,32	-51,33
2000000	2,875	2,875	2,875	-55,02	-55,03	-55,04
4000000	1,832	1,832	1,832	-55,77	-55,77	-55,77
8000000	1,278	1,278	1,278	-61,67	-61,66	-61,66
13000000	0,773	0,773	0,773	-60,56	-60,56	-60,57

Tabla C.30 Medidas para la muestra 4 con $S_w = 70\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	16,300	16,300	16,400	-27,70	-27,60	-27,40
100	14,600	14,700	14,800	-22,40	-22,40	-22,30
500	12,650	12,640	12,610	-12,45	-12,64	-12,63
1000	11,850	11,780	11,730	-9,52	-9,61	-9,50
2000	11,130	11,140	11,130	-8,08	-8,07	-8,11
3000	10,146	10,057	10,015	-7,61	-7,38	-7,28
6000	9,802	9,797	9,808	-6,58	-6,58	-6,58
12000	9,554	9,556	9,567	-7,03	-7,04	-7,06
30000	9,125	9,131	9,134	-8,90	-8,93	-8,97
100000	8,160	8,159	8,163	-14,13	-14,14	-14,18
160000	7,664	7,667	7,668	-17,41	-17,45	-17,47
280000	6,942	6,942	6,943	-22,24	-22,26	-22,29
400000	6,412	6,413	6,414	-26,08	-26,08	-26,10
600000	5,737	5,738	5,739	-31,11	-31,12	-31,11
800000	5,209	5,210	5,211	-35,13	-35,14	-35,13
1100000	4,583	4,583	4,584	-39,76	-39,77	-39,77
2000000	3,376	3,377	3,377	-48,25	-48,25	-48,26
4000000	2,186	2,186	2,186	-55,69	-55,69	-55,70
8000000	1,450	1,450	1,450	-66,01	-66,02	-66,02
13000000	0,839	0,839	0,839	-64,59	-64,59	-64,59

Tabla C.31 Medidas para la muestra 4 con $S_w = 60\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	17,500	17,400	17,400	-31,10	-31,10	-31,00
100	15,400	15,600	15,700	-26,80	-27,00	-26,80
500	12,700	12,740	12,860	-15,04	-14,84	-14,61
1000	13,090	13,160	13,230	-9,08	-8,92	-8,97
2000	13,000	13,030	13,050	-7,42	-7,45	-7,52
3000	12,960	13,000	13,070	-7,29	-7,34	-7,40
6000	12,630	12,650	12,720	-7,37	-7,46	-7,49
12000	12,320	12,410	12,430	-7,95	-8,03	-8,12
30000	11,690	11,720	11,750	-9,86	-9,94	-10,02
100000	10,298	10,328	10,347	-14,57	-14,69	-14,71
160000	9,868	9,875	9,883	-18,45	-18,43	-18,48
280000	8,916	8,930	8,934	-24,25	-24,33	-24,35
400000	8,176	8,176	8,176	-28,84	-28,88	-28,86
600000	7,190	7,192	7,194	-34,52	-34,51	-34,52
800000	6,446	6,448	6,449	-38,91	-38,92	-38,94
1100000	5,582	5,583	5,585	-43,69	-43,70	-43,72
2000000	4,008	4,009	4,009	-52,03	-52,04	-52,04
4000000	2,528	2,529	2,529	-59,61	-59,62	-59,62
8000000	1,619	1,620	1,620	-70,47	-70,48	-70,47
13000000	0,921	0,921	0,921	-68,49	-68,50	-68,51

Tabla C.32 Medidas para la muestra 4 con $S_w = 50\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	23,500	22,100	21,500	-29,60	-29,60	-29,40
100	17,000	17,100	17,100	-25,00	-25,30	-25,10
500	13,260	13,260	13,240	-14,21	-14,07	-13,93
1000	11,870	11,920	11,940	-9,27	-9,15	-9,06
2000	11,390	11,350	11,310	-7,02	-7,08	-7,12
3000	10,627	10,567	10,524	-6,34	-6,27	-6,24
6000	10,146	10,125	10,118	-5,47	-5,49	-5,50
12000	9,791	9,784	9,755	-5,20	-5,21	-5,24
30000	9,406	9,401	9,396	-5,79	-5,79	-5,79
100000	8,823	8,817	8,811	-9,23	-9,23	-9,23
160000	8,498	8,492	8,489	-12,00	-11,99	-11,98
280000	7,996	7,994	7,992	-16,95	-16,96	-16,95
400000	7,547	7,544	7,542	-21,24	-21,23	-21,23
600000	6,903	6,902	6,902	-27,27	-27,28	-27,27
800000	6,336	6,336	6,336	-32,17	-32,18	-32,17
1100000	5,618	5,617	5,617	-37,95	-37,94	-37,94
2000000	4,146	4,146	4,146	-48,37	-48,36	-48,36
4000000	2,649	2,650	2,650	-57,80	-57,80	-57,80
8000000	1,719	1,719	1,719	-71,18	-71,14	-71,12
13000000	0,957	0,957	0,957	-69,00	-69,00	-69,02

Tabla C.33 Medidas para la muestra 4 con $S_w = 30\%$.

Frecuencia (Hz)	Z (K Ω)			θ_c (°)		
50	23,500	22,100	21,500	-29,60	-29,60	-29,40
100	17,000	17,100	17,100	-25,00	-25,30	-25,10
500	13,260	13,260	13,240	-14,21	-14,07	-13,93
1000	11,870	11,920	11,940	-9,27	-9,15	-9,06
2000	11,390	11,350	11,310	-7,02	-7,08	-7,12
3000	10,627	10,567	10,524	-6,34	-6,27	-6,24
6000	10,146	10,125	10,118	-5,47	-5,49	-5,50
12000	9,791	9,784	9,755	-5,20	-5,21	-5,24
30000	9,406	9,401	9,396	-5,79	-5,79	-5,79
100000	8,823	8,817	8,811	-9,23	-9,23	-9,23
160000	8,498	8,492	8,489	-12,00	-11,99	-11,98
280000	7,996	7,994	7,992	-16,95	-16,96	-16,95
400000	7,547	7,544	7,542	-21,24	-21,23	-21,23
600000	6,903	6,902	6,902	-27,27	-27,28	-27,27
800000	6,336	6,336	6,336	-32,17	-32,18	-32,17
1100000	5,618	5,617	5,617	-37,95	-37,94	-37,94
2000000	4,146	4,146	4,146	-48,37	-48,36	-48,36
4000000	2,649	2,650	2,650	-57,80	-57,80	-57,80
8000000	1,719	1,719	1,719	-71,18	-71,14	-71,12
13000000	0,957	0,957	0,957	-69,00	-69,00	-69,02

SISTEMA AGUA-CRUDO

Tabla C.34 Medidas para la muestra 1 con $S_0 = 100\%$.

Frecuencia (kHz)	C (F)	R (Ω)
0.005	-4.50E-08	1.59E+05
0.005011	-4.48E-08	1.62E+05
0.005623	-3.61E-08	2.14E+05
0.006309	-2.97E-08	2.72E+05
0.007079	-2.38E-08	3.49E+05
0.007943	-1.95E-08	4.23E+05
0.008912	-1.61E-08	5.22E+05
0.01	-1.33E-08	6.27E+05
0.01122	-1.14E-08	7.15E+05
0.012589	-9.83E-09	8.45E+05
0.014125	-8.21E-09	9.45E+05
0.015848	-7.03E-09	1.07E+06
0.017782	-5.98E-09	1.20E+06
0.019952	-5.14E-09	1.36E+06
0.022387	-4.40E-09	1.48E+06
0.025118	-3.74E-09	1.63E+06
0.028183	-3.18E-09	1.84E+06

0.031622	-2.73E-09	2.00E+06
0.035481	-2.35E-09	2.00E+06
0.03981	-2.04E-09	2.00E+06
0.044668	-1.77E-09	2.00E+06
0.050118	-1.59E-09	2.00E+06
0.056234	-1.48E-09	2.00E+06
0.063095	-1.57E-09	2.00E+06
0.070794	-1.65E-09	2.00E+06
0.079432	-2.14E-09	2.00E+06
0.089125	-4.94E-09	2.00E+06
0.1	5.78E-09	2.00E+06
0.112201	1.59E-09	2.00E+06
0.125892	8.91E-10	2.00E+06
0.141253	6.27E-10	2.00E+06
0.158489	5.00E-10	2.00E+06
0.177827	3.45E-10	2.00E+06
0.199526	3.10E-10	2.00E+06
0.223872	2.85E-10	2.00E+06
0.251188	2.65E-10	2.00E+06
0.281838	2.49E-10	2.00E+06
0.316227	2.35E-10	1.98E+06
0.354813	2.23E-10	1.75E+06
0.398107	2.11E-10	1.56E+06
0.446683	2.00E-10	1.40E+06
0.501187	1.81E-10	1.26E+06
0.562341	1.73E-10	1.13E+06
0.630957	1.65E-10	1.01E+06
0.707945	1.58E-10	9.06E+05
0.794328	1.51E-10	8.09E+05
0.89125	1.44E-10	7.21E+05
1	1.37E-10	6.40E+05
1.122018	1.32E-10	5.66E+05
1.258925	1.26E-10	4.99E+05
1.412537	1.21E-10	4.38E+05
1.584893	1.15E-10	3.79E+05
1.778279	1.11E-10	3.30E+05
1.995262	1.07E-10	2.86E+05
2.238721	1.04E-10	2.46E+05
2.511886	1.01E-10	2.11E+05
2.818382	9.90E-11	1.80E+05
3.162277	9.67E-11	1.53E+05
3.548133	9.47E-11	1.30E+05
3.981071	9.30E-11	1.10E+05
4.466835	9.14E-11	9.29E+04
5.011872	9.00E-11	7.83E+04
5.623413	8.88E-11	6.58E+04
6.309573	8.77E-11	5.52E+04
7.079457	8.67E-11	4.63E+04
7.943282	8.58E-11	3.88E+04
8.912509	8.50E-11	3.25E+04

10	8.43E-11	2.72E+04
11.22018	8.36E-11	2.27E+04
12.58925	8.30E-11	1.90E+04
14.12537	8.25E-11	1.59E+04
15.84893	8.20E-11	1.33E+04
17.78279	8.16E-11	1.12E+04
19.95262	8.11E-11	9.30E+03
22.38721	8.08E-11	7.80E+03
25.11886	8.04E-11	6.60E+03
28.18382	8.01E-11	5.46E+03
31.62277	7.98E-11	4.58E+03
35.48133	7.95E-11	3.84E+03
39.81071	7.92E-11	3.20E+03
44.66835	7.89E-11	2.67E+03
50.11872	7.87E-11	2.24E+03
56.23413	7.85E-11	1.88E+03
63.09573	7.83E-11	1.59E+03
70.79457	7.81E-11	1.33E+03
79.43282	7.79E-11	1.13E+03
89.12509	7.77E-11	9.50E+02
100	7.75E-11	8.00E+02
112.2018	7.73E-11	6.70E+02
125.8925	7.72E-11	5.60E+02
141.2537	7.70E-11	4.70E+02
158.4893	7.69E-11	4.00E+02
177.8279	7.68E-11	3.40E+02
199.5262	7.67E-11	2.90E+02
223.8721	7.66E-11	2.50E+02
251.1886	7.64E-11	2.10E+02
281.8382	7.62E-11	1.81E+02
316.2277	7.62E-11	1.54E+02
354.8133	7.61E-11	1.30E+02
398.1071	7.60E-11	1.13E+02
446.6835	7.59E-11	9.60E+01
501.1872	7.58E-11	8.10E+01
562.3413	7.57E-11	6.90E+01
630.9573	7.57E-11	5.90E+01
707.9457	7.56E-11	5.00E+01
794.3282	7.55E-11	4.30E+01
891.2509	7.55E-11	3.60E+01
1000	7.54E-11	3.10E+01
1122.018	7.54E-11	2.70E+01
1258.925	7.53E-11	2.30E+01
1412.537	7.53E-11	1.90E+01
1584.893	7.52E-11	1.70E+01
1778.279	7.52E-11	1.40E+01
1995.262	7.52E-11	1.20E+01
2238.721	7.52E-11	1.00E+01
2511.886	7.52E-11	9.00E+00
2818.382	7.52E-11	7.30E+00

3162.277	7.53E-11	6.00E+00
3548.133	7.54E-11	5.00E+00
3981.071	7.55E-11	4.10E+00
4466.835	7.58E-11	3.40E+00
5011.872	7.60E-11	2.70E+00
5623.413	7.64E-11	2.10E+00
6309.573	7.68E-11	1.40E+00
7079.457	7.75E-11	1.20E+00
7943.282	7.82E-11	7.00E-01
8912.509	7.92E-11	-1.00E-01
10000	8.11E-11	-2.20E+00
11220.185	8.40E-11	2.00E-01
12589.254	8.61E-11	1.10E+00
13000	8.69E-11	1.10E+00
13000	8.69E-11	1.10E+00

Tabla C.35 Medidas para la muestra 1 con $S_0 = 80\%$.

Frecuencia (kHz)	C (F)	R (Ω)
0.005	-3.16E-07	2.83E+05
0.005011	-3.23E-07	2.84E+05
0.005623	-3.32E-07	2.89E+05
0.006309	-3.47E-07	2.93E+05
0.007079	-3.68E-07	2.96E+05
0.007943	-3.89E-07	2.96E+05
0.008912	-4.13E-07	2.97E+05
0.01	-4.48E-07	2.99E+05
0.01122	-4.98E-07	2.99E+05
0.012589	-5.66E-07	2.98E+05
0.014125	-6.69E-07	2.98E+05
0.015848	-8.13E-07	2.98E+05
0.017782	-1.05E-06	2.97E+05
0.019952	-1.57E-06	2.97E+05
0.022387	-2.00E-06	2.96E+05
0.025118	2.00E-06	2.95E+05
0.028183	1.96E-06	2.95E+05
0.031622	8.80E-07	2.94E+05
0.035481	5.56E-07	2.93E+05
0.03981	4.05E-07	2.92E+05
0.044668	3.04E-07	2.92E+05
0.050118	2.34E-07	2.91E+05
0.056234	1.83E-07	2.90E+05
0.063095	1.44E-07	2.89E+05
0.070794	1.17E-07	2.88E+05
0.079432	9.60E-08	2.87E+05
0.089125	7.93E-08	2.85E+05
0.1	6.64E-08	2.84E+05
0.112201	5.61E-08	2.82E+05

0.125892	4.77E-08	2.80E+05
0.141253	4.05E-08	2.79E+05
0.158489	3.45E-08	2.77E+05
0.177827	3.03E-08	2.78E+05
0.199526	2.60E-08	2.76E+05
0.223872	2.23E-08	2.74E+05
0.251188	1.92E-08	2.71E+05
0.281838	1.65E-08	2.69E+05
0.316227	1.42E-08	2.67E+05
0.354813	1.22E-08	2.65E+05
0.398107	1.04E-08	2.63E+05
0.446683	8.97E-09	2.61E+05
0.501187	7.72E-09	2.60E+05
0.562341	6.61E-09	2.58E+05
0.630957	5.59E-09	2.55E+05
0.707945	4.77E-09	2.53E+05
0.794328	4.06E-09	2.50E+05
0.89125	3.45E-09	2.47E+05
1	2.93E-09	2.44E+05
1.122018	2.48E-09	2.41E+05
1.258925	2.09E-09	2.37E+05
1.412537	1.77E-09	2.34E+05
1.584893	1.49E-09	2.30E+05
1.778279	1.25E-09	2.26E+05
1.995262	1.05E-09	2.21E+05
2.238721	8.89E-10	2.15E+05
2.511886	7.51E-10	2.09E+05
2.818382	6.35E-10	2.03E+05
3.162277	5.39E-10	1.95E+05
3.548133	4.58E-10	1.87E+05
3.981071	3.92E-10	1.78E+05
4.466835	3.37E-10	1.68E+05
5.011872	2.92E-10	1.58E+05
5.623413	2.54E-10	1.46E+05
6.309573	2.24E-10	1.35E+05
7.079457	1.99E-10	1.23E+05
7.943282	1.78E-10	1.11E+05
8.912509	1.61E-10	9.94E+04
10	1.47E-10	8.81E+04
11.22018	1.36E-10	7.73E+04
12.58925	1.27E-10	6.72E+04
14.12537	1.19E-10	5.79E+04
15.84893	1.12E-10	4.96E+04
17.78279	1.07E-10	4.21E+04
19.95262	1.03E-10	3.56E+04
22.38721	9.91E-11	3.00E+04
25.11886	9.61E-11	2.51E+04
28.18382	9.35E-11	2.09E+04
31.62277	9.14E-11	1.74E+04
35.48133	8.95E-11	1.44E+04

39.81071	8.80E-11	1.19E+04
44.66835	8.66E-11	9.86E+03
50.11872	8.55E-11	8.14E+03
56.23413	8.45E-11	6.72E+03
63.09573	8.36E-11	5.55E+03
70.79457	8.28E-11	4.58E+03
79.43282	8.22E-11	3.78E+03
89.12509	8.16E-11	3.12E+03
100	8.10E-11	2.57E+03
112.2018	8.05E-11	2.12E+03
125.8925	8.01E-11	1.75E+03
141.2537	7.97E-11	1.45E+03
158.4893	7.94E-11	1.20E+03
177.8279	7.91E-11	9.90E+02
199.5262	7.88E-11	8.30E+02
223.8721	7.85E-11	6.90E+02
251.1886	7.82E-11	5.70E+02
281.8382	7.79E-11	4.75E+02
316.2277	7.77E-11	3.94E+02
354.8133	7.75E-11	3.27E+02
398.1071	7.73E-11	2.74E+02
446.6835	7.71E-11	2.28E+02
501.1872	7.70E-11	1.89E+02
562.3413	7.68E-11	1.58E+02
630.9573	7.67E-11	1.32E+02
707.9457	7.65E-11	1.09E+02
794.3282	7.64E-11	9.10E+01
891.2509	7.63E-11	7.60E+01
1000	7.62E-11	6.40E+01
1122.018	7.61E-11	5.30E+01
1258.925	7.60E-11	4.50E+01
1412.537	7.59E-11	3.80E+01
1584.893	7.59E-11	3.20E+01
1778.279	7.58E-11	2.70E+01
1995.262	7.58E-11	2.20E+01
2238.721	7.57E-11	1.90E+01
2511.886	7.57E-11	1.60E+01
2818.382	7.57E-11	1.32E+01
3162.277	7.58E-11	1.10E+01
3548.133	7.59E-11	9.20E+00
3981.071	7.60E-11	7.60E+00
4466.835	7.62E-11	6.40E+00
5011.872	7.65E-11	5.30E+00
5623.413	7.68E-11	4.30E+00
6309.573	7.72E-11	3.40E+00
7079.457	7.79E-11	2.80E+00
7943.282	7.86E-11	2.10E+00
8912.509	7.96E-11	1.40E+00
10000	8.12E-11	-7.00E-01
11220.185	8.42E-11	8.00E-01

12589.254	8.64E-11	1.70E+00
13000	8.72E-11	1.90E+00
13000	8.72E-11	1.80E+00

Tabla C.36 Medidas para la muestra 1 con $S_0 = 60\%$.

Frecuencia (kHz)	C (F)	R (Ω)
0.005	-5.33E-06	1.15E+05
0.005011	-5.41E-06	1.15E+05
0.005623	-8.03E-06	1.14E+05
0.006309	-1.98E-05	1.13E+05
0.007079	2.00E-05	1.12E+05
0.007943	1.10E-05	1.11E+05
0.008912	5.72E-06	1.10E+05
0.01	3.85E-06	1.09E+05
0.01122	2.00E-06	1.08E+05
0.012589	2.00E-06	1.08E+05
0.014125	1.76E-06	1.07E+05
0.015848	1.48E-06	1.06E+05
0.017782	1.25E-06	1.05E+05
0.019952	1.07E-06	1.05E+05
0.022387	9.23E-07	1.04E+05
0.025118	7.96E-07	1.03E+05
0.028183	6.99E-07	1.03E+05
0.031622	6.16E-07	1.02E+05
0.035481	5.47E-07	1.02E+05
0.03981	4.85E-07	1.01E+05
0.044668	4.29E-07	1.01E+05
0.050118	3.83E-07	1.00E+05
0.056234	3.39E-07	1.00E+05
0.063095	3.04E-07	9.90E+04
0.070794	2.72E-07	9.90E+04
0.079432	2.44E-07	9.80E+04
0.089125	2.19E-07	9.80E+04
0.1	1.97E-07	9.70E+04
0.112201	1.77E-07	9.70E+04
0.125892	1.59E-07	9.60E+04
0.141253	1.43E-07	9.60E+04
0.158489	1.29E-07	9.60E+04
0.177827	1.18E-07	9.50E+04
0.199526	1.05E-07	9.50E+04
0.223872	9.52E-08	9.50E+04
0.251188	8.50E-08	9.40E+04
0.281838	7.61E-08	9.40E+04
0.316227	6.77E-08	9.30E+04
0.354813	6.01E-08	9.30E+04
0.398107	5.32E-08	9.30E+04
0.446683	4.70E-08	9.21E+04

0.501187	4.16E-08	9.19E+04
0.562341	3.64E-08	9.15E+04
0.630957	3.17E-08	9.12E+04
0.707945	2.75E-08	9.08E+04
0.794328	2.38E-08	9.05E+04
0.89125	2.05E-08	9.01E+04
1	1.75E-08	8.98E+04
1.122018	1.49E-08	8.94E+04
1.258925	1.26E-08	8.90E+04
1.412537	1.06E-08	8.86E+04
1.584893	8.96E-09	8.83E+04
1.778279	7.50E-09	8.78E+04
1.995262	6.25E-09	8.73E+04
2.238721	5.19E-09	8.67E+04
2.511886	4.30E-09	8.61E+04
2.818382	3.56E-09	8.54E+04
3.162277	2.94E-09	8.46E+04
3.548133	2.43E-09	8.37E+04
3.981071	2.00E-09	8.27E+04
4.466835	1.65E-09	8.15E+04
5.011872	1.36E-09	8.01E+04
5.623413	1.13E-09	7.85E+04
6.309573	9.35E-10	7.67E+04
7.079457	7.77E-10	7.46E+04
7.943282	6.48E-10	7.22E+04
8.912509	5.43E-10	6.95E+04
10	4.58E-10	6.65E+04
11.22018	3.89E-10	6.32E+04
12.58925	3.33E-10	5.95E+04
14.12537	2.87E-10	5.56E+04
15.84893	2.50E-10	5.14E+04
17.78279	2.21E-10	4.71E+04
19.95262	1.96E-10	4.27E+04
22.38721	1.76E-10	3.84E+04
25.11886	1.60E-10	3.41E+04
28.18382	1.47E-10	3.00E+04
31.62277	1.36E-10	2.62E+04
35.48133	1.27E-10	2.26E+04
39.81071	1.20E-10	1.94E+04
44.66835	1.14E-10	1.66E+04
50.11872	1.09E-10	1.41E+04
56.23413	1.05E-10	1.19E+04
63.09573	1.02E-10	9.99E+03
70.79457	9.87E-11	8.39E+03
79.43282	9.63E-11	7.02E+03
89.12509	9.41E-11	5.86E+03
100	9.23E-11	4.89E+03
112.2018	9.07E-11	4.08E+03
125.8925	8.93E-11	3.39E+03
141.2537	8.81E-11	2.83E+03

158.4893	8.71E-11	2.35E+03
177.8279	8.61E-11	1.96E+03
199.5262	8.53E-11	1.63E+03
223.8721	8.45E-11	1.36E+03
251.1886	8.37E-11	1.14E+03
281.8382	8.31E-11	9.49E+02
316.2277	8.25E-11	7.91E+02
354.8133	8.20E-11	6.60E+02
398.1071	8.15E-11	5.52E+02
446.6835	8.11E-11	4.61E+02
501.1872	8.07E-11	3.85E+02
562.3413	8.02E-11	3.22E+02
630.9573	7.99E-11	2.69E+02
707.9457	7.96E-11	2.25E+02
794.3282	7.93E-11	1.88E+02
891.2509	7.90E-11	1.58E+02
1000	7.87E-11	1.32E+02
1122.018	7.85E-11	1.11E+02
1258.925	7.82E-11	9.30E+01
1412.537	7.80E-11	7.80E+01
1584.893	7.78E-11	6.60E+01
1778.279	7.77E-11	5.60E+01
1995.262	7.75E-11	4.70E+01
2238.721	7.74E-11	4.00E+01
2511.886	7.73E-11	3.30E+01
2818.382	7.71E-11	2.80E+01
3162.277	7.71E-11	2.34E+01
3548.133	7.72E-11	1.97E+01
3981.071	7.72E-11	1.65E+01
4466.835	7.74E-11	1.39E+01
5011.872	7.76E-11	1.16E+01
5623.413	7.79E-11	9.70E+00
6309.573	7.83E-11	7.90E+00
7079.457	7.89E-11	6.60E+00
7943.282	7.97E-11	5.40E+00
8912.509	8.06E-11	4.10E+00
10000	8.23E-11	1.90E+00
11220.185	8.52E-11	2.60E+00
12589.254	8.76E-11	3.20E+00
13000	8.85E-11	3.30E+00
13000	8.85E-11	3.30E+00

APENDICE D. CÁLCULO DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA

Para el cálculo de la parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica se empleó la siguiente expresión:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{Y_c(\omega) - Y_0(\omega)}{i\omega C_0} \quad (D.1)$$

donde Y_c es la admitancia de la celda con la muestra, Y_0 es la admitancia de la celda vacía ω es la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$, f la frecuencia del campo) y C_0 es la capacitancia de la celda vacía. La admitancia corresponde al recíproco de la impedancia. Los valores de la impedancia medidos se reportan en el apéndice C.

La parte real viene dada por :

$$\varepsilon' = 1 + \frac{Y_c \text{sen}(\theta_c) - Y_0 \text{sen}(\theta_0)}{\omega C_0} \quad (D.2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{Y_c \cos(\theta_c) - Y_0 \cos(\theta_0)}{\omega C_0} \quad (D.3)$$

donde θ_c es el negativo del ángulo medido, por el analizador de impedancias, en la celda con muestra y θ_0 es el negativo del ángulo medido con la celda vacía (véase apéndice C).

APENDICE E. GRÁFICOS

A continuación se muestran las gráficas de las componentes de la permitividad en función de la frecuencia en el sistema agua-aire. En las gráficas de la componente real de la permitividad se realizó el ajuste de los datos según las ecuaciones 2.10a, 2.10b y 2.10c.

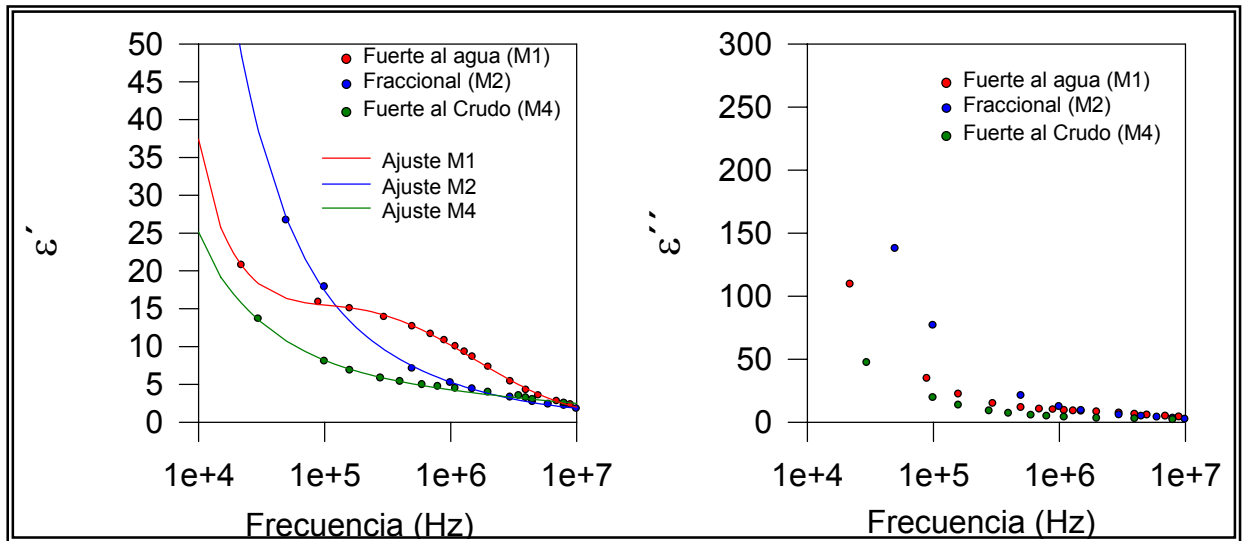


Fig. E.1 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_W = 80\%$.

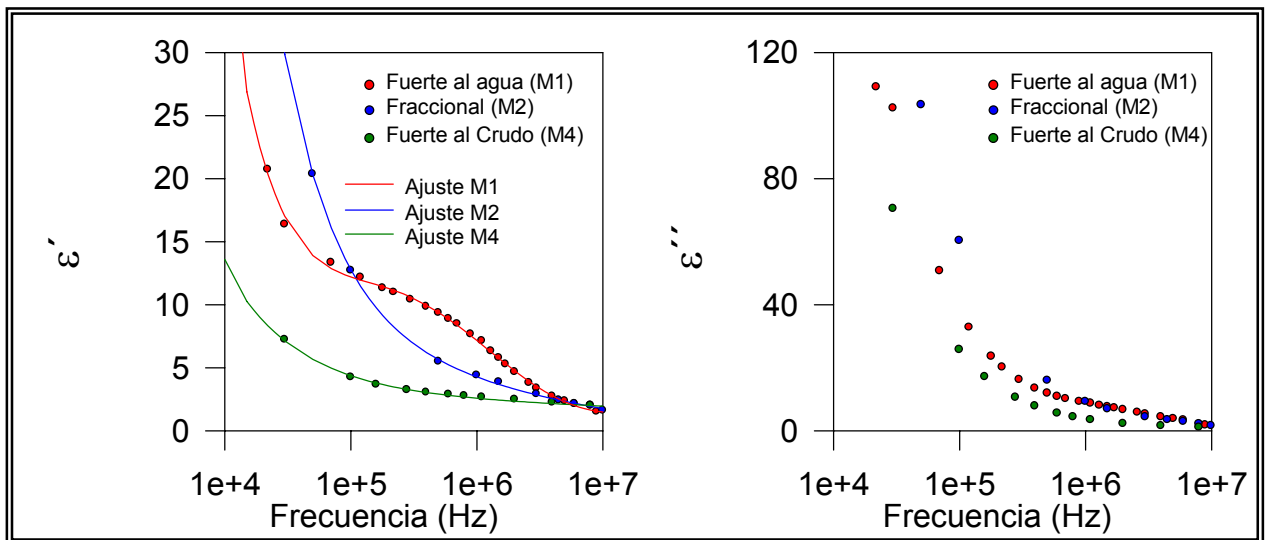


Fig. E.2 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_W = 50\%$.

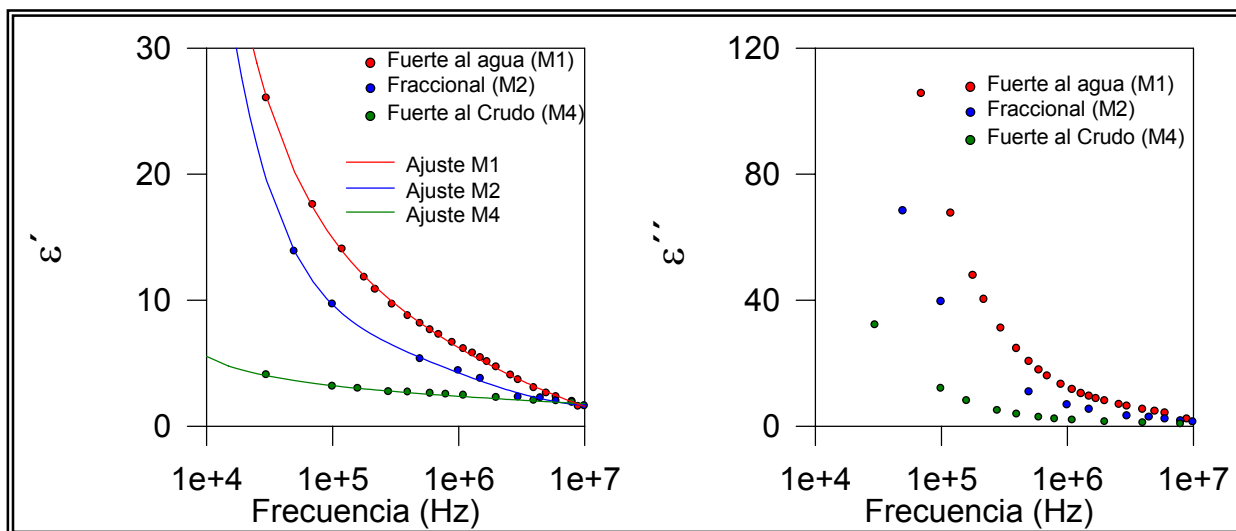


Fig. E.3 Componentes de la permitividad dieléctrica para $S_w = 40\%$.

APENDICE F. ECUACIONES DE AJUSTE

En el presente apéndice se obtienen la parte real y la parte imaginaria de la permitividad eléctrica propuesta en la ecuación 2.4, empleando las ecuaciones 2.10a, 2.10b y 2.10c. Dado que la permitividad dieléctrica generalizada tiene una parte real y una parte imaginaria.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + \varepsilon''(\omega) \quad (\text{F.1})$$

Según 2.10b:

$$\varepsilon_{MW}(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon}{\left[1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right]^\beta} = \frac{\Delta\varepsilon}{\left[1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}(1-\alpha)\right) + i \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}(1-\alpha)\right) \right]\right]^\beta} \quad (\text{F.2})$$

tomando $Z = 1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \cos\frac{\pi}{2}(1-\alpha) + i (\omega\tau)^{1-\alpha} \operatorname{sen}\frac{\pi}{2}(1-\alpha)$ y sustituyendo en la ecuación (F.2)

$$\varepsilon_{MW}(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon}{\left[|Z| e^{i\phi}\right]^\beta} = \frac{\Delta\varepsilon}{|Z|^\beta e^{i\phi\beta}} = \frac{\Delta\varepsilon e^{-i\phi\beta}}{|Z|^\beta} = \varepsilon'_{MW} + \varepsilon''_{MW} \quad (\text{F.3})$$

$$\text{con } \phi = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{(\omega\tau)^{1-\alpha} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi(1-\alpha)}{2}\right)}{\left(1 - (\omega\tau)^{1-\alpha} \cos\left(\frac{\pi(1-\alpha)}{2}\right)\right)} \right]$$

Tomando 2.10c:

$$\varepsilon_{PL}(\omega) = A \frac{(i\omega)^{N-1}}{\varepsilon_0} = \frac{A}{\varepsilon_0} \omega^{N-1} e^{i\frac{\pi}{2}(N-1)} = \frac{A}{\varepsilon_0} \omega^{N-1} \left[\cos\frac{\pi}{2}(N-1) + i \operatorname{sen}\frac{\pi}{2}(N-1) \right] \quad (\text{F.4})$$

$$\varepsilon_{PL}(\omega) = \varepsilon'_{PL} + \varepsilon''_{PL} \quad (F.5)$$

Luego, la parte real de la permitividad compleja generalizada viene dada por:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon'_{MW}(\omega) + \varepsilon'_{PL}(\omega) + \varepsilon_{\infty}(\omega) \quad (F.6)$$

esto es :

$$\varepsilon' = \frac{\Delta\varepsilon}{|Z|^{\beta}} \cos \phi\beta + \frac{A}{\varepsilon_0} \omega^{N-1} \cos \frac{\pi}{2}(N-1) + \varepsilon_{\infty} \quad (F.7)$$

La parte imaginaria de la permitividad se expresa como:

$$\varepsilon''(\omega) = -\varepsilon''_{MW}(\omega) + \varepsilon''_{PL}(\omega) - i \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} \quad (F.8)$$

$$\varepsilon'' = -\frac{\Delta\varepsilon}{|Z|^{\beta}} \sen \phi\beta + \frac{A}{\varepsilon_0} \omega^{N-1} \sen \frac{\pi}{2}(N-1) - \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega} \quad (F.9)$$

APENDICE G. PARÁMETROS DE AJUSTE

En este apéndice se muestran los parámetros obtenidos en el ajuste de las curvas de la parte real de la permitividad en el sistema agua-aire, según las ecuaciones 2.10a , 2.10b y 2.10c.

Tabla G.1 Valores de los parámetros de la ecuación 2.10a, obtenidos ajustando los datos experimentales.

Muestra	S_w	$\Delta\epsilon$	τ	α	β	A	N	ϵ_∞
1	100	45,6	1,59E-09	0,90	0,51	1,04E-03	0,011	15,07
2	100	66,7	1,99E-06	0,93	0,40	9,30E-04	0,013	3,07
3	100	18,0	2,02E-09	0,91	0,51	1,45E-03	0,014	7,33
4	100	3,9	2,84E-09	0,90	0,44	1,07E-06	0,212	2,79
1	80	22,0	6,89E-08	0,83	0,97	2,78E-04	0,032	4,81
2	80	29,1	3,34E-09	0,88	0,53	1,29E-03	0,017	14,83
4	80	6,7	1,01E-10	0,88	0,44	1,80E-06	0,244	2,82
1	60	68,3	4,77E-08	0,91	0,45	2,93E-03	0,001	10,36
2	60	15,8	7,04E-09	0,92	0,50	1,82E-03	0,017	4,01
4	60	5,1	1,93E-09	0,90	0,45	1,65E-06	0,234	2,56
1	50	12,5	4,25E-08	0,81	0,95	3,16E-04	0,031	4,02
2	50	19,4	5,71E-09	0,91	0,51	1,47E-03	0,014	5,74
4	50	3,1	2,14E-09	0,90	0,45	1,56E-06	0,214	2,34
1	40	19,9	7,09E-10	0,86	0,46	1,56E-04	0,048	9,05
2	40	22,5	5,38E-09	0,90	0,52	9,49E-04	0,010	8,16
4	40	4,2	1,73E-09	0,90	0,45	8,04E-07	0,151	2,34
1	30	13,1	6,64E-11	0,84	0,69	1,12E-08	3,11E-06	9,09
2	30	22,7	3,49E-09	0,89	0,54	5,06E-04	0,007	11,31
4	30	4,9	9,87E-12	0,87	0,44	8,21E-07	0,154	1,09

S_w refiere la saturación de agua en la muestra

APENDICE H. RESULTADOS XPS

En la tabla H.1, se muestran los resultados obtenidos para el análisis de XPS realizado a la muestra 4.

El ánodo utilizado en el ensayo es de Al, y la potencia de trabajo fué de 350 W.

Tabla H.1 *Medidas con la celda vacía.*

ELEMENTO	ENERGIA DE ENLACE (Ev)	ENERGÍA CINÉTICA (Ev)	AREA	S	%At	%At corr.	% peso
O 1s	531,8	949,95	5634	3,326	29,95	31,59	29,64
Ca 2p	347,4	1134,36	3144	5,256	10,58	10,48	26,22
CO ₃ ⁻²	289,9	1191,84	656	1,000	11,60	11,31	8,61
CH _x	284,6	1197,12	2708	1,000	47,88	46,62	35,54
				TOTAL	100,00	100,00	100,00

$$\text{Ca/CO}_3^{-2} = 0,93$$

APENDICE I. MEDIDAS ACÚSTICAS

En la tabla I.1, se muestran los valores de los tiempos de viaje de las ondas P, S1 y S2, respectivamente, en las tres muestras de rocas de yacimiento sometidas a análisis de su respuesta acústica en función de la saturación de agua, para el sistema agua-aire.

Tabla I.1 Tiempo de viaje de las ondas P, S1 y S2. Sistema Agua-Aire.

Presión (psi)	Tiempo de Viaje de la Onda P (μs)						Tiempo de Viaje de la Onda S1 (μs)						Tiempo de Viaje de la Onda S2 (μs)					
	3000			6000			3000			6000			3000			6000		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2	4
Muestra Sw (%)																		
100,0	22,1	22,4	21,6	21,8	22,2	21,4	38,1	38,3	39,7	37,6	37,9	39,3	38,4	37,8	39,7	37,9	37,4	39,2
90,0	22,1	22,5	21,7	21,8	22,3	21,5	38,2	38,3	39,8	37,6	37,9	39,5	38,4	37,8	39,8	37,8	37,4	39,4
70,0	22,1	22,5	21,9	21,8	22,3	21,7	38,2	38,2	39,7	37,6	37,8	39,3	38,3	37,8	40,0	37,7	37,3	39,4
60,0	22,2	22,5	21,9	21,9	22,3	21,7	38,2	38,2	39,7	37,8	37,8	39,3	38,2	37,5	39,7	37,6	37,2	39,2
50,0	22,2	22,6	22,0	22,0	22,3	21,7	38,2	38,3	39,8	37,6	37,9	39,4	38,2	37,7	39,8	37,6	37,2	39,3
40,0	22,3	22,6	22,0	22,1	22,3	21,8	37,9	38,3	39,7	37,4	37,8	39,2	38,0	37,6	40,0	37,4	37,1	39,5
30,0	22,4	22,6	22,0	22,1	22,3	21,8	37,7	38,2	39,7	37,2	37,7	39,2	38,0	37,7	39,7	37,4	37,2	39,2
20,0	22,4	22,5	22,1	22,0	22,3	21,8	37,6	38,2	39,6	37,1	37,8	39,1	38,0	37,6	39,9	37,4	37,2	39,4
10,0	22,2			21,9			37,4			36,9			37,7			37,2		
0,0	22,1	22,4	22,1	21,8	22,2	21,9	37,2	37,9	39,6	36,8	37,5	39,1	37,4	37,4	40,0	37,0	37,0	39,4

En la tabla I.2 se muestran los tiempos de viaje de las ondas, medidos para el sistema agua-crudo. En las tablas I.3 y I.4 se presenta la amplitud de las ondas, medidas para el sistema agua-aire y agua-crudo, respectivamente.

Tabla I.2 Tiempo de viaje de las ondas P, S1 y S2. Sistema Agua-Crudo.

Presión (psi)	Tiempo de Viaje de la Onda P (μs)						Tiempo de Viaje de la Onda S1 (μs)						Tiempo de Viaje de la Onda S2 (μs)					
	3000			6000			3000			6000			3000			6000		
	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2
Muestra Sw (%)																		
100	24,0	21,7	22,4	23,7	21,6	22,2	40,6	38,8	37,2	41,0	38,6	37,6	41,0	38,7	38,2	40,6	38,0	37,9
87	24,0			23,8			40,8			41,3			41,0			40,5		
78			22,4			22,2			37,3			37,7			38,3			37,9
77		21,8			21,6			39,3			39,0			39,2			38,5	
76	24,1			23,8			41,0			41,3			41,0			40,6		
66	24,1			23,9			41,3			41,7			41,0			40,5		
60			22,4			22,2			36,9			37,2			38,2			37,9
56	24,1			23,8			41,1			41,4			41,3			40,8		
54		21,8			21,7			39,7			39,4			40,0			39,1	
49	24,0		22,5	23,7		22,3	41,0		36,9	41,3		37,2	41,4		38,2	40,8		37,8

Tabla I.3 Amplitud de las ondas P, S1 y S2. Sistema Agua-Aire.

Presión (psi)	Amplitud de la Onda P (mV)						Amplitud de la Onda S1 (mV)						Amplitud de la Onda S2 (mV)					
	3000			6000			3000			6000			3000			6000		
	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2
Muestra Sw (%)																		
100	0,750	0,475	1,840	1,784	0,921	2,730	0,563	0,094	0,246	0,793	0,144	0,491	0,470	0,103	0,261	0,792	0,094	0,477
90	0,761	0,461	1,826	1,719	0,965	2,710	0,563	0,093	0,244	0,784	0,137	0,489	0,461	0,096	0,260	0,783	0,115	0,468
80			1,849			2,670			0,231			0,476			0,257			0,470
70	0,752	0,454		1,757	0,949		0,586	0,088		0,816	0,127		0,493	0,086		0,815	0,140	
60	0,710	0,451	1,810	1,728	0,857	2,760	0,616	0,075	0,225	0,849	0,110	0,470	0,526	0,083	0,251	0,848	0,136	0,473
50	0,818	0,456	1,974	1,729	0,970	2,872	0,677	0,081	0,228	0,891	0,107	0,473	0,568	0,082	0,294	0,890	0,124	0,475
40	1,070	0,468	2,350	2,104	0,986	3,104	0,761	0,069	0,333	1,012	0,102	0,578	0,689	0,077	0,364	1,011	0,119	0,596
30	1,497	0,546	2,575	2,582	1,010	3,178	0,886	0,090	0,401	1,091	0,094	0,646	0,763	0,079	0,420	1,085	0,109	0,670
20	1,972	0,605	2,751	2,698	1,057	3,287	0,990	0,096	0,544	1,212	0,125	0,889	0,885	0,072	0,537	1,207	0,105	0,834
10	2,250			2,825			1,024			1,354			1,027			1,349		
0	2,552	0,667	2,998	3,100	1,147	3,333	1,070	0,112	0,622	1,382	0,187	0,967	1,056	0,071	0,639	1,378	0,109	0,963

Tabla I.4 Amplitud de las ondas P, S1 y S2. Sistema Agua-Crudo.

Presión (psi)	Amplitud de la Onda P (mV)						Amplitud de la Onda S1 (mV)						Amplitud de la Onda S2 (mV)					
	3000			6000			3000			6000			3000			6000		
Muestra Sw (%)	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2	1	4	2
100	2,190	1,516	3,148	2,784	2,142	3,332	0,323	0,183	0,347	0,532	0,258	0,635	0,214	0,076	0,253	0,393	0,251	0,536
87	2,305			2,824			0,270			0,349			0,226			0,395		
78			2,767			3,046			0,344			0,480			0,260			0,491
77		1,178			1,668			0,107			0,154			0,070			0,142	
76	2,230			2,702			0,250			0,314			0,257			0,297		
66	2,173			2,580			0,290			0,279			0,284			0,300		
60			2,828			3,097			0,297			0,455			0,273			0,455
56	2,321			2,839			0,270			0,264			0,243			0,266		
54		1,107			1,320			0,025			0,131			0,063			0,138	