



**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Departamento de Geología y Petróleo

**“Aplicación de trazador salino de amplio rango de salinidad para la medición del volumen poral en muestras de sandpack”**

**AGOSTO 2023**

De Napoli, Pamela Alejandra

Legajo: ING-3188

Huinca, Evelín Aymara

Legajo: ING-973

Director de tesis: Mg. Ing. Sergio A. Abrigo

Co-Director de tesis: Ing. Esteban L. González

## ÍNDICE

RESUMEN.....pág. 4

ABSTRACT.....pág. 5

AGRADECIMIENTOS.....pág. 6

### CAPÍTULO 1: DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS.

1.1 Porosidad..... pág. 8

1.2 Permeabilidad..... pág. 13

1.3 Heterogeneidad del yacimiento..... pág. 16

1.4 Comprensibilidad de las rocas..... pág. 17

1.5 Migración/taponamiento por partículas finas..... pág. 17

1.6 Densidad.....pág. 17

1.7 Conductividad eléctrica..... pág. 18

1.8 Espectrometría..... pág. 18

1.8.1 Aspectos cuantitativos de las medidas espectroquímicas..... pág. 19

1.8.2 Métodos basados en la absorción..... pág. 20

1.8.3 Transmitancia..... pág. 20

1.8.4 Absorbancia..... pág. 21

1.8.5 Ley de Lambert-Beer..... pág. 21

### CAPÍTULO 2: TRAZADORES.

2.1 Trazadores..... pág. 23

2.2 Tipos de trazadores..... pág. 23

2.3 Tipos de inyección del trazador..... pág. 24

2.4 Transporte del trazador..... pág. 25

2.5 Desplazamiento de fluidos miscibles..... pág. 27

2.6 Trazador químico: Cloruro de sodio..... pág. 29

2.7 Trazador químico: Alcohol bencílico..... pág. 30

2.8 Cálculo del volumen poral a partir de las concentraciones del trazador..... pág. 32

### CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y MUESTRAS.

3.1 Muestras..... pág. 36

3.2 Cuttings..... pág. 36

3.3 Testigos coronas..... pág. 36

3.4 Plugs..... pág. 37

3.5 Sandpacks..... pág. 37

3.6 Berea..... pág. 38

3.7 Etapas de ejecución de los ensayos..... pág. 38

3.8 Material utilizado para la preparación de salmuera..... pág. 39

<b>3.9 Procedimiento de la preparación de la salmuera.....</b>	<b>pág. 44</b>
<b>3.10 Procedimiento de montaje del equipo.....</b>	<b>pág. 44</b>
<b>3.11 Descripción de equipos.....</b>	<b>pág. 46</b>
<b>3.11.1 Conductímetro LAB 960.....</b>	<b>pág. 46</b>
<b>3.11.2 Densímetro DMA 4500.....</b>	<b>pág. 48</b>
<b>3.11.3 Equipo UV-VIS.....</b>	<b>pág. 52</b>
<b>3.12 Curvas de calibración.....</b>	<b>pág. 55</b>
<b>3.13 Principio de funcionamiento y rango de operación.....</b>	<b>pág. 56</b>

#### **CAPÍTULO 4: RESULTADOS.**

<b>4.1 Ensayo en rango de baja salinidad.....</b>	<b>pág. 61</b>
<b>4.2 Ensayo en rango de media salinidad.....</b>	<b>pág. 63</b>
<b>4.3 Ensayo en rango de alta salinidad.....</b>	<b>pág. 65</b>

<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>pág. 68</b>
------------------------	----------------

#### **ANEXOS**

<b>ANEXO A: Procedimiento de armado de sandpack.....</b>	<b>pág. 69</b>
<b>ANEXO B: Determinación de permeabilidad absoluta.....</b>	<b>pág. 72</b>
<b>ANEXO B.1: Introducción.....</b>	<b>pág. 72</b>
<b>ANEXO B.2: Descripción del equipo utilizado.....</b>	<b>pág. 73</b>
<b>ANEXO B.3: Conexión.....</b>	<b>pág. 74</b>
<b>ANEXO C: Determinación de porosidad.....</b>	<b>pág. 74</b>
<b>ANEXO C.1: Esquema y descripción del equipo.....</b>	<b>pág. 74</b>
<b>ANEXO C.2: Fundamento.....</b>	<b>pág. 75</b>
<b>ANEXO C.3: Determinación del volumen poral.....</b>	<b>pág. 76</b>
<b>ANEXO C.4: Cálculo del volumen real, porosidad y densidades.....</b>	<b>pág. 76</b>
<b>ANEXO D: Curvas de calibración.....</b>	<b>pág. 77</b>
<b>ANEXO D.1: Conductividad eléctrica-salinidad.....</b>	<b>pág. 77</b>
<b>ANEXO D.2: Densidad-salinidad.....</b>	<b>pág. 82</b>
<b>ANEXO D.3: Absorbancia-Concentración de ácido bencílico.....</b>	<b>pág. 85</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>pág. 88</b>
--------------------------	----------------

## RESUMEN

Este trabajo se llevó a cabo para determinar, si es posible, la concentración de un trazador salino (NaCl), de modo que, aplicando una variación en la concentración del trazador entre un 5 a 10 % se obtenga la menor alteración posible con los fluidos dentro del espacio poral.

Al elegir el trazador para los ensayos, debe considerarse que pueda detectarse en bajas concentraciones, debe tener disponibilidad de las cantidades necesarias, alta solubilidad en la fase desplazante. No debe interferir de manera significativa con el medio poroso y fluidos que lo saturan (por ejemplo, adsorción, exclusión de iones, cambios de pH) [\[1\]](#).

El trazador de cloruro de sodio elegido para el ensayo, es de fácil disponibilidad, costo accesible, alta solubilidad en agua (358 g/l a 20°C) y conservativo por lo que no reacciona químicamente de manera significativa con el sandpack y la salmuera que lo satura. La salmuera utilizada, fue preparada en el laboratorio, para distintas concentraciones.

La propiedad de estudio que empleamos para caracterizar el sandpack es el volumen poral.

Determinando el volumen poral por medio de la detección de dos propiedades, densidad y conductividad eléctrica del fluido trazado, en las mismas condiciones de ensayo (presión, temperatura), se comparan los resultados obtenidos a fin de optimizar futuros ensayos de laboratorio.

Se utilizó alcohol bencílico como trazador patrón para determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de petrofísica, CEPCom, del Departamento de Geología y Petróleo de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

Palabras claves: trazador, salmuera, alcohol bencílico, sandpack, volumen poral.

## ABSTRACT

This work was carried out to determine, if possible, the concentration of a saline tracer (NaCl), so that, applying a variation in the concentration of the saline tracer between 5 to 10%, the perturbation of the porous medium due to the injection of the tracer is minimum. When choosing the tracer for the tests, you must require that it can be detected in low concentrations, it must be available in the necessary amounts, with high solubility in the displacing phase. It must not significantly interfere with the porous medium and the fluids that saturate it (eg, adsorption, ion exclusion, pH changes) [1].

The sodium chloride tracer chosen for the test is readily available, affordable, with high solubility in water (358 g/l at 20°C) and conservative, so it does not chemically react significantly with the sandpack and brine that it contains. The brine used was prepared in the laboratory, for different concentrations.

The petrophysic property that we considered, to characterize the sandpack, is the pore volume.

Determining the pore volume through the detection of two properties, density and electrical conductivity of the traced fluid, under the same test conditions (pressure, temperature), the results obtained are compared to optimize future laboratory tests.

Benzyl alcohol is injected as a standard tracer to determine the reliability of the results obtained.

The tests were carried out in the petrophysics laboratory, CEPCom, of the Department of Geology and Petroleum of the Faculty of Engineering, National University of Comahue.

Keywords: tracer, brine, benzyl alcohol, sandpack, pore volume.

## **Agradecimientos de Pamela De Napoli**

Quiero agradecer a mi familia por estar siempre presente y a mi lado, a mi madre Graciela Andrea De Napoli por el apoyo incondicional en todas mis decisiones siempre sentí tu mano protectora cuidándome, siendo siempre un pilar en mi vida. Gracias a mi padre Gregorio Francisco Colicheo Bravo por estar ahí cuando te necesite y ayudarme en los momentos difíciles. A mis hermanas Antonella Yanina De Napoli y Valentina Ornella De Napoli que a pesar de la distancia siempre sentí su presencia y su voz de aliento y respaldo.

A mi abuela Adela Moncheboeuf no hay palabras que puedan expresar todo mi agradecimiento porque parte de la persona que soy es gracias a usted, su amor, cariño y consejos siempre me acompañan.

A nuestro tutor de tesis Mg. Sergio Abrigo sin su predisposición y visión esta tesis no podría haber sido posible, muchas gracias por todo el apoyo y tiempo que nos brindó, por escuchar y ayudarnos a despejar todas las dudas.

A nuestro co-tutor de tesis Ing. Esteban González muchas gracias por brindarnos sus conocimientos, tiempo y dedicación en este proyecto.

A la Dra. Paola Esteves cuya asistencia fue crucial para el desarrollo de la tesis muchas gracias por brindarnos su tiempo, conocimiento y disposición en tantas ocasiones para resolver nuestras dudas y llevar a cabo los ensayos.

A mis profesores gracias por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable los mismos me acompañarán en toda mi vida profesional.

A mis compañeros y amigos, Fernanda Zapata, Roger Paucar, Melani Navarrete, Mayra Izquierdo gracias por todo chicos, por los consejos por escucharme, acompañarme y confiar en mí.

## **Agradecimientos de Evelín Huinca**

Primeramente, agradecerle a Dios, mi fiel compañero, que siempre me dio las fuerzas para continuar y no bajar los brazos en los momentos más difíciles. A mis pilares, mi amada familia, que me acompañaron siempre en todo y me apoyaron para que pudiera cumplir con esta meta para mi vida.

A mi amado papá que siempre luchó para que nunca me falte nada y enseñarme a luchar siempre día a día a pesar de las dificultades.

A mi amada mamá, mi guerrera que nunca bajo los brazos y siguió por sus hijas, que me brinda su fortaleza todos los días.

A mi preciosa hermana Diane, que siempre fui su prioridad, siempre me alentó a no bajar los brazos y me ayudó a poder terminar con mis objetivos.

A mis familiares y amigos, que siempre estuvieron en las buenas y en las malas apoyándome.

A mi director, Sergio, por ayudarme y guiarme durante todo este trabajo. Gracias por tu apoyo, por todo tu tiempo dedicado, por toda tu predisposición para que pueda lograrlo, no habría llegado sin tu ayuda.

A mi co-director, Esteban, por estar presente y dispuesto.

A los jurados, gracias infinitas por ayudarme con su tiempo.

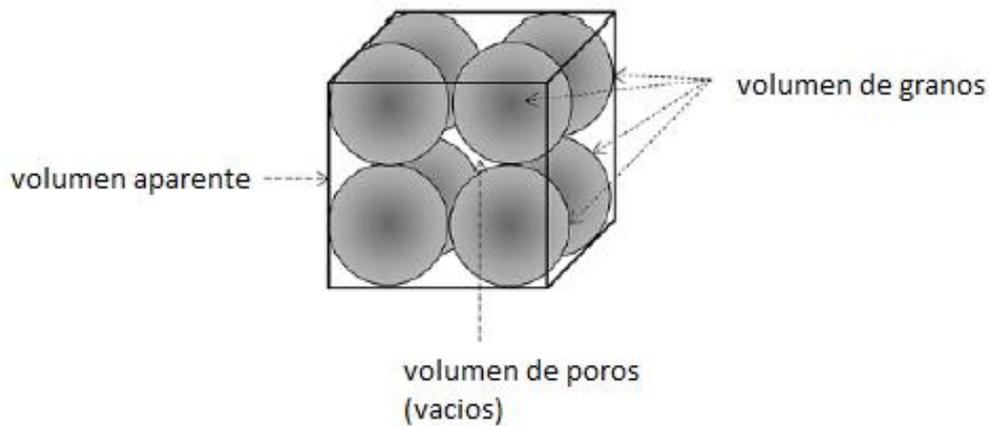
## CAPÍTULO 1: DEFINICIONES Y CONCEPTOS BÁSICOS.

### 1.1 POROSIDAD:

La porosidad representa la capacidad de un reservorio de almacenar fluidos debido a la presencia de vacíos y puede ser definida como la proporción de volumen de poros con respecto a él volumen total de una muestra. [2]

**Fig. 1**

*Volumen aparente, de poros y de granos.*



*Nota.* Tomado de *Petroleum engineering: principles, calculations and workflows* (p.18), por Moshood Sanni, 2019, American Geophysical Union and John Wiley and Sons, Inc.

[2].

$$\text{Porosidad} = \phi = \frac{V_p}{V_b} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\text{Porosidad} = \phi = \frac{V_b - V_{gr}}{V_b} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\text{Porosidad} = \phi = \frac{V_p}{V_{gr} + V_p} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$V_p$ = volumen de poros.

$V_b$ = volumen aparente.

$V_{gr}$ = volumen de granos.

La porosidad inicial o primaria creada durante la depositación de los sedimentos, puede modificarse durante la diagénesis, por ejemplo, una proporción de los espacios vacíos que se

desarrollaron entre los granos puede aislarse de los otros debido al efecto de una cementación química. [2]

Esto conduce a dos tipos de porosidades:

- Porosidad Absoluta.

Se define como la relación del volumen del espacio poroso total (vacíos interconectados y aislados) y volumen total de la roca. [2]

$$\phi_a = \frac{\text{Volumen total de poros}}{\text{Volumen aparente}} = \frac{V_b - V_{gr}}{V_b} \quad \text{Ec. (4)}$$

$V_b$ = volumen aparente.

$V_{gr}$ = volumen de granos.

- Porosidad Efectiva.

Se define como la relación del volumen de poros interconectados y el volumen total de la roca. [2]

$$\text{Porosidad efectiva} = \frac{\text{Volumen de poros interconectados}}{\text{Volumen aparente}} \quad \text{Ec. (5)}$$

La porosidad se puede clasificar también de acuerdo a su origen:

- Porosidad primaria o intergranular: Es la desarrollada durante el proceso de depositación del material.
- Porosidad secundaria: Es la desarrollada por algún proceso geológico posterior a la depositación de la roca. Generalmente a través de procesos tales como la dolomitización, disolución y fracturamiento. [2]

### **Factores que afectan la porosidad:**

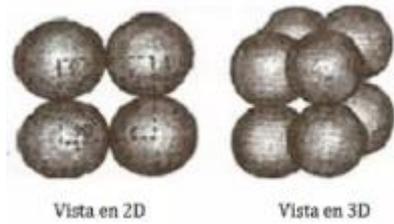
- Tipos de Empaque

El empaque geométrico es la forma en la que se disponen o agrupan los granos en la roca. Suponiendo un sistema ideal, los granos serán uniformes del mismo tamaño y forma esférica. La porosidad va a reducirse cuando el tamaño de los empaques geométricos no es uniforme. [3] Según como las esferas se disponen en el espacio, se pueden distinguir distintos tipos de empaquetamiento:

Empaquetamiento cúbico: Es el arreglo de mínima compactación, cada esfera está conectada a otras 4 esferas, y representa el límite máximo de porosidad y es independiente del tamaño de los granos [3].

### **Fig. 2**

*Tipo de empaque cúbico.*



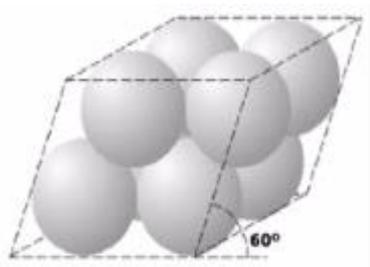
*Nota.* Tomado de *Caracterización petrofísica de un yacimiento*, (p.6), por E. Haro, J. Arcos, A. Torres, C. Sanchez, J. Torres, 2010, Slideshare.

$$\phi = \frac{V_{poroso}}{V_{total}} = \frac{V_{total} - V_{esferas}}{V_{total}} = 1 - \frac{8 \left( \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\pi}{2} \right)^3 \right)}{4^3 \left( \frac{\pi}{2} \right)^3} = 0,4764 \quad \text{Ec. (6)}$$

Empaquetamiento Ortorrómico: Se caracteriza por una porosidad del 39,54%. El número de puntos de contacto entre una esfera dada y las esferas adyacentes es 8. [\[3\]](#) [\[51\]](#)

**Fig. 3**

*Tipo de empaque ortorrómico.*



*Nota.* Tomado de *Caracterización petrofísica de un yacimiento*, (p.6), por E. Haro, J. Arcos, A. Torres, C. Sanchez, J. Torres, 2010, Slideshare.

Empaquetamiento tetragonal esferoidal: La porosidad de este empaquetamiento es 30,19%, los ejes de las esferas forman ángulos de 60° entre sí [\[3\]](#).

**Fig. 4**

*Tipo de empaque tetragonal esferoidal.*

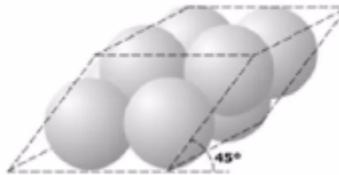


*Nota.* Tomado de *Caracterización petrofísica de un yacimiento*, (p.7), por E. Haro, J. Arcos, A. Torres, C. Sanchez, J. Torres, 2010, Slideshare.

Empaquetamiento Romboédrico: Es el arreglo con máxima compactación, donde cada esfera está conectada por otras 12 esferas y la porosidad del empaquetamiento es 25,94% [3].

**Fig. 5**

*Tipo de empaque romboédrico.*



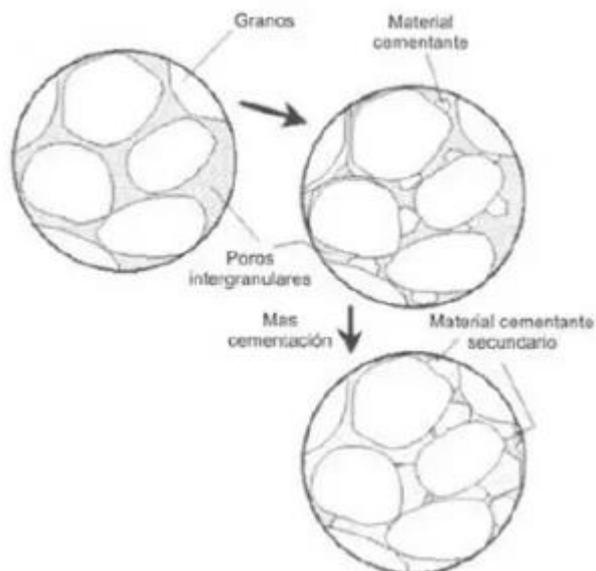
Nota. Tomado de *Caracterización petrofísica de un yacimiento*, (p.7), por E. Haro, J. Arcos, A. Torres, C. Sanchez, J. Torres, 2010, Slideshare.

- Material Cementante

El agente cementante es el que tiene mayor efecto sobre la porosidad original y afecta la forma, tamaño y continuidad de los canales porales. El material cementante une los granos y está compuesto principalmente por sílice, carbonato de calcio y arcilla, puede haber sido transportado después de la depositación de los sedimentos o crearse por disolución de los mismos sedimentos. A medida que aumenta el material cementante la porosidad disminuye debido a la disminución del espacio poral [4].

**Fig. 6**

*Efecto del material cementante en la porosidad de una roca.*



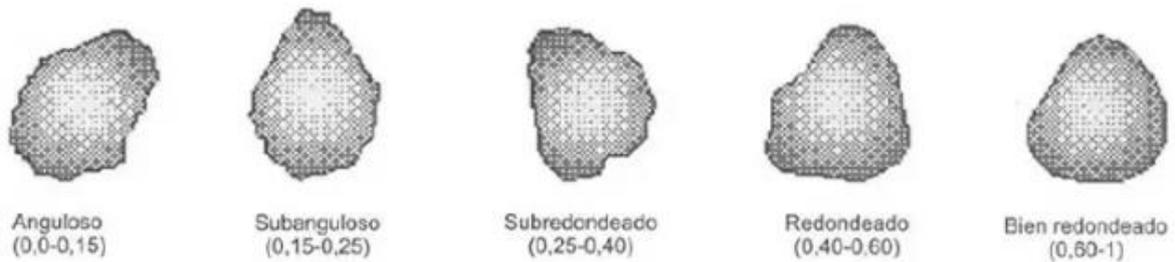
Nota. Tomado de *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos* (p.227), por Paris de Ferrer, Magdalena, 2009, Ediciones Astro Data S.A.

- Geometría y Distribución de los granos

Los granos que forman la roca tienen diferentes tamaños y formas, esto se debe al proceso de sedimentación y transporte, el grado de erosión y compactación. Para examinar la geometría y distribución de los granos se analiza la redondez de los clastos, que hace referencia al grado de angularidad que presentan las aristas y los vértices de un grano, y la esfericidad definida como el grado en que un grano se aproxima a una esfera [4].

**Fig. 7**

*Configuración de los granos según su índice de redondez y esfericidad.*

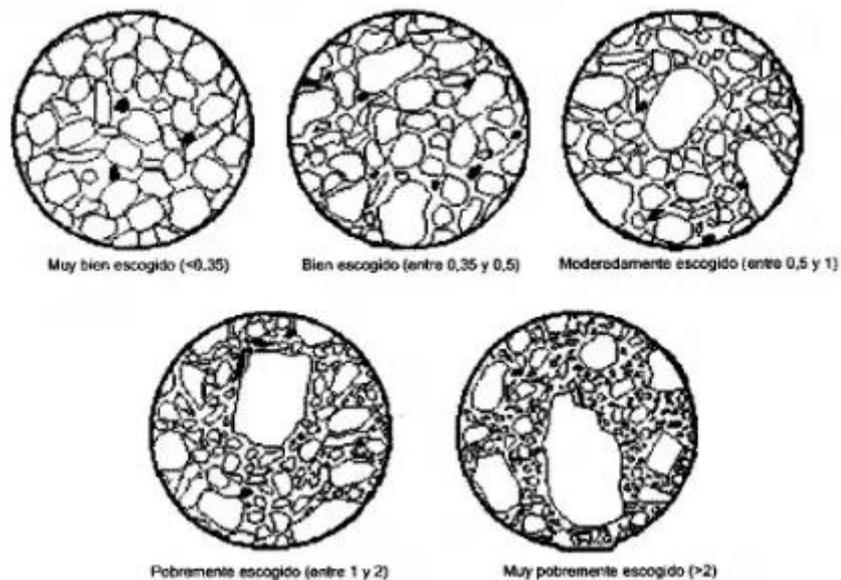


*Nota.* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos* (p.227), por Paris de Ferrer, Magdalena, 2009, Ediciones Astro Data S.A.

La distribución del tamaño de los granos depende de la heterogeneidad que presentan entre ellos propiedad llamada “grado de selección”, Fig. 8. En general se puede concluir que granos pequeños de grandes angularidades tienden a aumentar la porosidad mientras que un incremento en el tamaño de las partículas tiende a disminuir la porosidad. [4].

**Fig. 8**

*Patrones visuales para determinar el grado de selección del tamaño de los granos.*



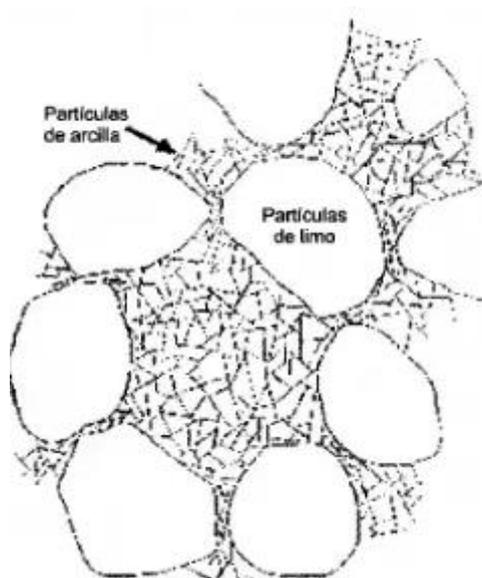
*Nota.* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos* (p.228), por Paris de Ferrer, Magdalena, 2009, Ediciones Astro Data S.A.

- Presencia de partículas finas de arcilla

A medida que aumenta el material intersticial se reduce el espacio poroso. El material arcilloso puede presentarse formando granos, matriz o cemento. Cuando se deposita al mismo tiempo que los granos de arena las arcillas forman parte de la matriz detrítica de la roca, cuando resultan de un proceso de alteración diagenética de la matriz o los granos constituye una forma de cemento, Fig. 9. En cualquiera de los casos la presencia de material arcilloso entre los granos disminuye la porosidad.

**Fig. 9**

*Presencia de arcilla en el espacio poroso.*



*Nota.* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos* (p.229), por Paris de Ferrer, Magdalena, 2009, Ediciones Astro Data S.A.

- Presión de las capas suprayacentes

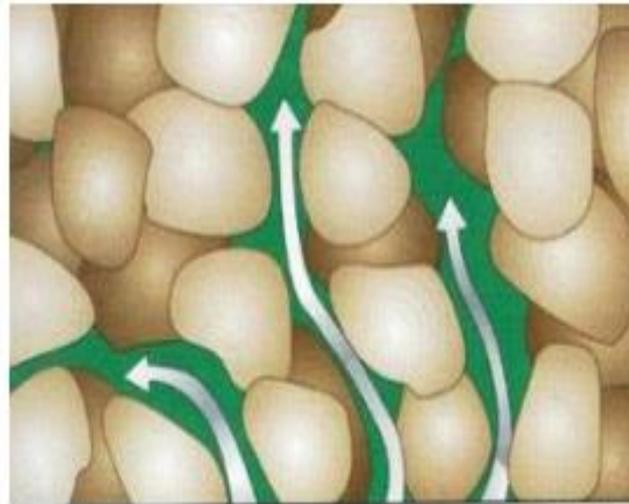
La compactación mecánica es originada por la presión de sobrecarga que generan las capas suprayacentes a la roca. Al aumentar la profundidad la presión ejercida por la columna de sedimentos aumenta deformando los granos y reduciendo el espacio poral y por lo tanto la porosidad [3].

## 1.2 PERMEABILIDAD:

Es la capacidad que posee una roca para permitir el paso de fluidos a través de ella (Fig. 10) cuando se le aplica un gradiente de presión sin afectar la estructura interna (ej. creación de fracturas) o desplazar las partículas. Los factores que afectan la permeabilidad son: la presión externa, el tamaño, selección y distribución de las partículas, y la porosidad efectiva de las rocas. Se expresa en Darcys o miliDarcys y se simboliza con  $k$  [5].

**Fig. 10**

### *Descripción de la permeabilidad en la roca.*



*Nota.* Tomado de *Variación del volumen poroso de arenas y calizas con doble porosidad* (p.14), por Flores Gutiérrez, Osiris, 2013, Repositorio.

La permeabilidad de la roca es una propiedad muy importante del medio poroso, ya que controla la dirección preferencial y la facilidad con la que fluye el fluido a través del mismo. La medición de la permeabilidad de la roca se hace en muestras de testigos con equipos llamados permeabilímetros; en el momento de hacer estas mediciones se debe tener cuidado con la orientación de los testigos, ya que cada dirección de flujo arrojará un valor diferente de permeabilidad. La gran mayoría de los yacimientos son heterogéneos, es decir, hay variaciones macroscópicas en las propiedades de la formación [2], lo que se traduce en variaciones de permeabilidad (ej. diferencias entre la permeabilidad vertical y horizontal, variaciones de permeabilidad según las litofacies, etc).

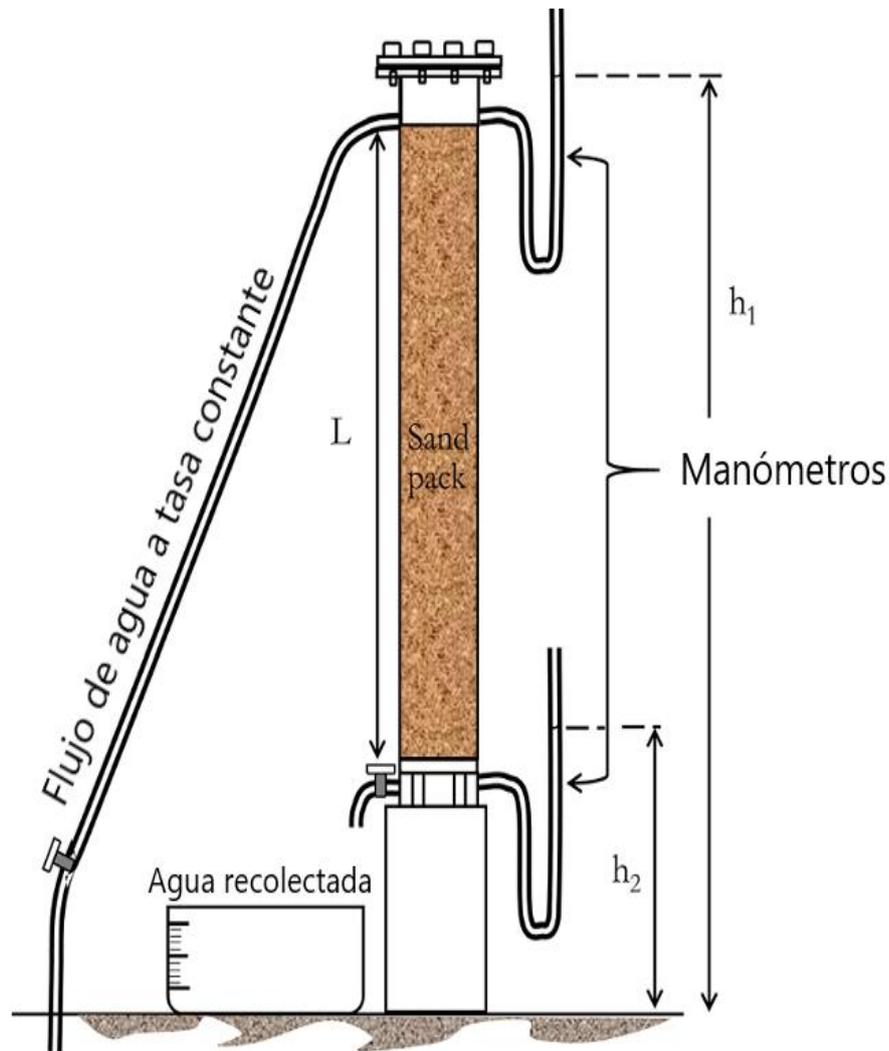
Ley de Darcy: Se puede derivar de Navier Stokes para un fluido newtoniano incompresible que fluye lentamente a través de un medio rígido permeable bajo condiciones isotérmicas y condiciones de estado estacionario. El experimento de Henry Darcy realizado, al investigar la filtración de agua para un suministro municipal (Fig. 11), mostró que, para un paquete poroso, la velocidad de flujo del agua se puede expresar como:

$$v = \frac{Q}{A} = K \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} \quad \text{Ec. (7)}$$

donde Q es el caudal volumétrico constante de agua, A es el área de la sección transversal del paquete de arena, L es la altura del paquete de arena, h1 es la altura del manómetro 1, h2 es la altura del manómetro 2, K es una constante de proporcionalidad que caracteriza el paquete de arena (conductividad hidráulica), y v es la velocidad de flujo del agua. [2]

### **Fig. 11**

*Equipo utilizado para el experimento de Darcy para flujo vertical.*



*Nota.* Tomado de *Petroleum engineering: principles, calculations and workflows* (p.21), por Moshood Sanni, 2019, American Geophysical Union and John Wiley and Sons, Inc.

Aunque el experimento original de Darcy fue realizado para un paquete de arena, la ley se ha extendido a la roca del yacimiento tipo que a menudo es compacto. [2] La ley fue modificada para tener en cuenta el efecto de la viscosidad del fluido; dicha ley de Darcy se expresa como:

$$\frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{d\phi}{dx} \quad \text{Ec. (8)}$$

para flujo lineal, donde la diferencia en la altura del manómetro (que es una medición de la presión) se sustituye explícitamente por presión y el efecto de la viscosidad incluido en la ecuación. La Ley de Darcy muestra la relación entre la tasa de la transferencia de fluidos en función del gradiente de presión, cuando Q es el caudal, k es la permeabilidad (Darcy), A es el área de la sección transversal al flujo del fluido,  $\mu$  es la viscosidad,  $\phi$  es el potencial de flujo del fluido y puede expresarse de la siguiente manera:

$$\phi = P + \rho \cdot g \cdot h \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

P= presión ejercida sobre la superficie libre del líquido.

$\rho$ = densidad del fluido.

h= altura medida sobre un nivel constante de referencia.

$g$  = aceleración de gravedad.

Diferenciando la ecuación con respecto a  $x$ :

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{dP}{dx} + \rho \cdot g \cdot \frac{dh}{dx} \quad \text{Ec. (10)}$$

Además:  $\frac{dh}{dx} = \text{sen } \alpha$ .

Sustituyendo en la ecuación, resulta la ley de Darcy generalizada para flujo lineal [4]:

$$q = \frac{k \cdot A}{\mu} \left[ \frac{dP}{dx} + \rho \cdot g \cdot \text{sen } \alpha \right] \quad \text{Ec. (11)}$$

Por lo tanto, la permeabilidad de un medio de 1 Darcy, permite una velocidad de flujo de 1 cm/s para un fluido de 1cP sometido a un gradiente de 1 atm/cm. Al medir la permeabilidad con un líquido o gas, a menudo se agrega un subíndice a la permeabilidad ( $k$ ), que representa la fase como  $k_{liq}$  representa permeabilidad al líquido y  $k_{gas}$  representa la permeabilidad al gas. Esto es importante, porque cuando se usa gas para medición de la permeabilidad, existe la necesidad de convertir la permeabilidad al gas a la permeabilidad equivalente al líquido. También cuando se usa gas para medir la permeabilidad, es necesario modificar la ecuación de Darcy para tener en cuenta compresibilidad de gases. [2]

Existen tres tipos de permeabilidad:

- Absoluta o específica: es la conductividad de una roca o material poroso cuando está saturado completamente por un sólo fluido.
- Efectiva: es la conductividad de un material poroso a una fase cuando dos o más fases están presentes y también se mide en Darcy.
- Relativa: es la razón entre la permeabilidad efectiva y una permeabilidad base. Es adimensional

### 1.3 HETEROGENEIDAD DEL YACIMIENTO:

Todos los yacimientos varían areal y verticalmente en sus propiedades. En los cálculos de desplazamiento se debe tomar en cuenta la variación vertical de la permeabilidad. Law mostró que la permeabilidad tiene una distribución logarítmica que representó en la siguiente relación:

$$\phi = \log \sqrt{2} \frac{k}{10} \quad \text{Ec. (12)}$$

Dykstra y Parsons definen un coeficiente de variación de permeabilidad,  $V$ , que mide la heterogeneidad del yacimiento. Para determinar  $V$ , las permeabilidades se arreglan en orden decreciente. El porcentaje del número de valores de permeabilidad que exceden cada valor tabulado se calcula dividiendo por  $n+1$ , donde  $n$  es el número de muestras. Los porcentajes se representan en un papel log-probabilístico y la mejor línea recta que se traza a través de los puntos se pesa de tal forma, que los puntos entre 20 y 80 por ciento se toman más en cuenta que los puntos más distantes.

La variación de permeabilidad se calcula mediante:

$$V = \frac{k_{50\%} - k_{84,1\%}}{k_{50\%}} \quad \text{Ec. (13)}$$

Un yacimiento uniforme (teórico) tendrá un valor de  $V = 0$ . Un yacimiento heterogéneo altamente estratificado tendrá un  $V$  cercano a 1. La  $k_{84,1\%}$  es la permeabilidad del 84,1% de la

muestra acumulada [4]. El 84,1% se escogió debido a que en una distribución normal la desviación estándar  $\sigma$  es tal que el 84.1 % de las muestras tienen valores mayores que el valor medio más  $\sigma$ . La relación entre V y la desviación estándar  $\sigma_{\log k}$  está dada por:

$$V = 1 - 10^{-\sigma_{\log k}} \quad \text{Ec. (14)}$$

#### 1.4 COMPRESIBILIDAD DE LAS ROCAS:

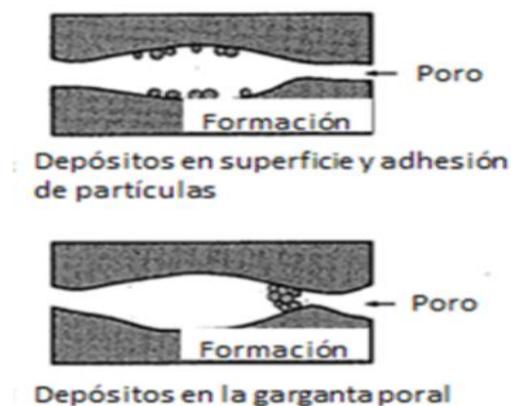
Un depósito a miles de pies bajo tierra está sujeto a una sobrecarga de presión causada por el peso de las formaciones suprayacentes. Las presiones varían de un área a otra dependiendo de factores como la profundidad, naturaleza de la estructura, grado de compactación, y litología. La profundidad de la formación es la consideración más importante, y un valor típico del gradiente de presión de sobrecarga es aproximadamente 1 psi por pie de profundidad. El peso de la sobrecarga produce una fuerza de compresión a la formación [6].

#### 1.5 MIGRACIÓN/TAPONAMIENTO POR PARTÍCULAS FINAS:

Los finos se definen como pequeñas partículas que están adheridas a las paredes de los poros de la roca, las cuales son producidas in situ o por operaciones de campo. Para que ocurra su migración, las partículas deben desprenderse de la superficie del grano, dispersarse y fluir a través del medio poroso hasta llegar a las gargantas porales, Fig. 12, lo que puede causar un taponamiento severo y una disminución en la permeabilidad del medio poroso, generalmente, en la región cercana al pozo donde la velocidad del fluido es máxima [7].

**Fig. 12**

*Medio poroso (arenisca).*



*Nota.* Tomado de *Interacción roca-fluido*, (p.11), por E. López, L. Gonzáles, E. Hernández, D. Mendoza, M. Vargas, 2017, Prezi.

#### 1.6 DENSIDAD:

Es una magnitud escalar que permite medir la cantidad de masa que hay en determinado volumen de una sustancia. La densidad  $\rho$  de una muestra se define como la masa dividida por el volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. (15)}$$

Podemos deducir que la densidad es inversamente proporcional al volumen: mientras menor sea el volumen ocupado por determinada masa, mayor será la densidad. Es una de las propiedades físicas de la materia, y puede observarse en sustancias en sus distintos estados: sólido, líquido y gaseoso. Una unidad empleada para expresarla es el  $g/cm^3$  [9].

## 1.7 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA:

La conductividad eléctrica es la capacidad de la materia para permitir el flujo de la corriente eléctrica a través de sus partículas. Dicha capacidad depende directamente de la estructura atómica y molecular del material, así como de otros factores físicos como la temperatura a la que se encuentre o el estado en el que esté (líquido, sólido, gaseoso) [10].

Para las disoluciones electrolíticas, la corriente es transportada por los iones de la disolución, los cuales se mueven en distintos sentidos (de acuerdo con el signo de su carga), bajo la acción del campo eléctrico producido por la diferencia de potencial aplicada. En este caso, el conductor iónico también puede considerarse como homogéneo (cuando no existan fuerzas mecánicas o viscosas aplicadas), y al igual que un conductor electrónico, seguirá la Ley de Ohm:

$$V = I \cdot R \quad \text{Ec. (16)}$$

La variación de las temperaturas en las disoluciones eléctricas afecta la conductividad, donde al aumentar la temperatura la excitación térmica es decir el aumento de la movilidad de los iones en disolución aumenta la conductividad eléctrica.

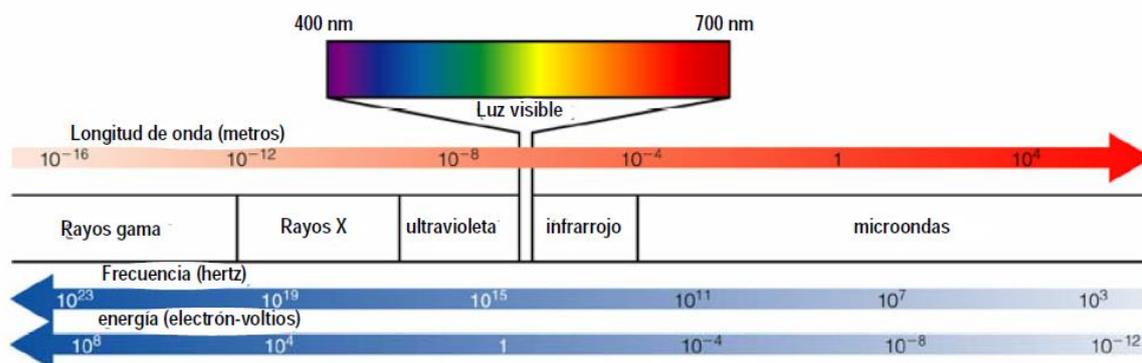
## 1.8 ESPECTROMETRÍA:

El fundamento de la espectroscopía se debe a la capacidad de las moléculas para absorber radiaciones, entre ellas las radiaciones dentro del espectro UV-visible. Las longitudes de onda de las radiaciones que una molécula puede absorber y la eficiencia con la que se absorben dependen de la estructura atómica y de las condiciones del medio (pH, temperatura, fuerza iónica, constante dieléctrica). [11]

Las moléculas pueden absorber energía luminosa y almacenarla en forma de energía interna. Cuando la luz (considerada como energía) es absorbida por una molécula se origina un salto desde un estado energético basal o fundamental a un estado de mayor energía (estado excitado). Y sólo se absorberá la energía que permita el salto al estado excitado. Cada molécula tiene una serie de estados excitados (o bandas) que la distingue del resto de moléculas. Como consecuencia, la absorción que a distintas longitudes de onda presenta una molécula constituye una señal de identidad de la misma. Por último, la molécula en forma excitada libera la energía absorbida hasta el estado energético fundamental. [11]

En espectrofotometría de absorbancia se utilizan las regiones del ultravioleta (UV cercano, de 195-400 nm) y el visible (400-780 nm).

**Fig. 13**  
Espectro electromagnético.



*Nota.* Tomado de *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*, (p.2), por Díaz A., Ruiz A., Reyes E., Galván A., Novo J., Peinado J., Meléndez T., Fiñana I, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular.

La región UV se define como el rango de longitudes de onda de 195 a 400 nm. Es una región de energía muy alta. Provoca daño al ojo humano, así como quemaduras comunes. Los compuestos con dobles enlaces aislados, triples enlaces, enlaces peptídicos, sistemas aromáticos, grupos carbonilos y otros heteroátomos tienen su máxima absorbancia en la región UV, por lo que ésta es muy importante para la determinación cualitativa y cuantitativa de compuestos orgánicos. Diversos factores -como pH, concentración de sal y el disolvente- que alteran la carga de las moléculas, provocan desplazamientos de los espectros UV.

En la región visible apreciamos el color visible de una solución y que corresponde a las longitudes de onda de luz que transmite, no que absorbe. El color que absorbe es el complementario del color que transmite [11].

### 1.8.1 ASPECTOS CUANTITATIVOS DE LAS MEDIDAS ESPECTROQUÍMICAS:

En la tabla 1 se muestran los métodos espectroquímicos que se clasifican en cuatro categorías:

**Tabla 1**  
*Principales clases de métodos espectroquímicos.*

Clase	Medida de la potencia radiante	Relación con la concentración	Tipo de métodos
Emisión	Emitida, $P_e$	$P_e = k \cdot c$	Emisión atómica.
Luminiscencia	Luminiscente, $P_l$	$P_l = k \cdot c$	Fluorescencia, fosforescencia y quimioluminiscencia atómica y molecular.
Dispersión	Dispersada, $P_d$	$P_d = k \cdot c$	Dispersión Raman, turbidimetría y nefelometría.
Absorción	Incidente, $P_o$ , y transmitida, $P$	$-\log(P/P_o) = k \cdot c$	Absorción atómica y molecular.

*Nota.* Tomado de *Principios de análisis instrumental*, (p.147), por Skoog, Holler, Nieman, 2001, Editorial McGraw-Hill.

Los cuatro requieren la medida de la *potencia* radiante  $P$ , que es la energía de un haz de radiación que alcanza un área dada por segundo. Esta potencia se determina con un detector de radiación que convierte la energía radiante en una señal eléctrica  $S$ , que es un potencial o una corriente donde idealmente es directamente proporcional a la potencia radiante:

$$S = k \cdot P \quad \text{Ec. (17)}$$

donde  $k$  es una constante.

Muchos detectores muestran una pequeña respuesta constante, denominada *corriente oscura*, por ausencia de radiación. La respuesta se establece mediante la relación:

$$S = k \cdot P + k_d \quad \text{Ec. (18)}$$

donde  $k_d$ , es la corriente oscura, que generalmente es pequeña y constante, al menos durante cortos períodos de tiempo. Los instrumentos espectroquímicos están normalmente equipados con un circuito compensador que reduce  $k_d$  a cero cuando se realizan las medidas. En dichos instrumentos se aplica la ecuación (17). [\[12\]](#)

### 1.8.2 MÉTODOS BASADOS EN LA ABSORCIÓN:

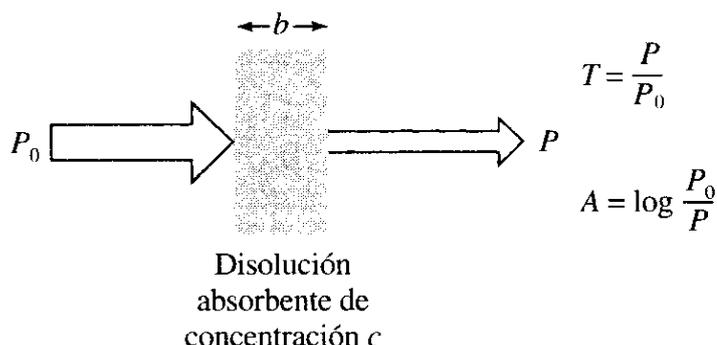
En la tabla 1 se mostraron los métodos cuantitativos basados en la absorción que requieren dos medidas de potencia: una, antes de que el haz haya pasado a través del medio que contiene al analito ( $P_o$ ), y la otra, después ( $P$ ). La transmitancia y la absorbancia son los dos términos que se utilizan ampliamente en la espectrometría de absorción y se relacionan por la razón de  $P_o$  y  $P$  [\[12\]](#).

### 1.8.3 TRANSMITANCIA:

La figura 14 muestra un haz de radiación paralelo antes y después de atravesar un medio que tiene un espesor de  $b$  (cm) y una concentración  $c$  de una especie absorbente. Como consecuencia de las interacciones entre los fotones y los átomos o moléculas absorbentes, la potencia del haz disminuye de  $P_o$  a  $P$  [\[12\]](#).

**Fig. 14**

*Atenuación de un haz de radiación por una disolución absorbente.*



*Nota.* Tomado de *Principios de análisis instrumental*, (p.147), por Skoog, Holler, Nieman, 2001, Editorial McGraw-Hill.

La transmitancia  $T$  del medio es la fracción de radiación incidente transmitida por el medio:

$$T = \frac{P}{P_0} \quad \text{Ec. (19)}$$

La transmitancia se expresa con frecuencia, como porcentaje.

#### 1.8.4 ABSORBANCIA:

La absorbancia indica la cantidad de luz que una muestra absorbe cuando un rayo de luz de una determinada longitud de onda de potencia  $P_0$  incide perpendicularmente sobre una disolución de un compuesto químico.

La absorbancia  $A$  de un medio se define por la ecuación:

$$A = -\log_{10} T = \log \frac{P_0}{P} \quad \text{Ec. (20)}$$

Al contrario de la transmitancia, la absorbancia de un medio aumenta cuando la atenuación del haz se hace mayor. La absorbancia es adimensional y las unidades de absorbancia se denominan UA (unidades de absorbancia).

Cuando la intensidad incidente y transmitida son iguales ( $I_0 = I_t$ ), la transmitancia es del 100% e indica que la muestra no absorbe a una determinada longitud de onda, y entonces  $A$  vale  $\log 1 = 0$  [11].

#### 1.8.5 LEY DE LAMBERT-BEER

Para una radiación monocromática, la absorbancia es directamente proporcional al camino óptico  $b$ , a través del medio y la concentración  $c$  de la especie absorbente. Estas relaciones vienen dadas por:

$$A = a \cdot b \cdot c \quad \text{Ec. (21)}$$

donde  $a$  es una constante de proporcionalidad denominada *absortividad*. La magnitud  $a$  dependerá de las unidades utilizadas para  $b$  y  $c$ . Con frecuencia para disoluciones de una especie absorbente,  $b$  se da en centímetros y  $c$  en gramos por litro. Las unidades de la absortividad en ese caso son  $\frac{l}{g \cdot cm}$ .

Cuando la concentración en la ec. (21) se expresa en moles por litro y la longitud de la cubeta en centímetros, la absorptividad se denomina absorptividad molar y se representa por el símbolo  $\epsilon$ . Cuando  $b$  está en centímetros y  $c$  en moles por litro:

$$A = \epsilon \cdot b \cdot c \quad \text{Ec. (22)}$$

Las ec. (21) y (22) son expresiones de la *ley de Lambert-Beer*, que sirven como base para el análisis cuantitativo mediante medidas de absorción atómica y molecular. Esta ley se cumple para soluciones diluidas; para valores de  $c$  altos,  $\epsilon$  varía con la concentración, debido a fenómenos de dispersión de la luz, agregación de moléculas, cambios del medio, etc [\[11\]](#).

## CAPÍTULO 2: TRAZADORES.

### 2.1 TRAZADOR:

Es un compuesto químico o radioquímico que se incorpora a un proceso por medio de un fluido de inyección para estudiar las propiedades del flujo promedio del yacimiento bajo estudio [13].

Los trazadores deben cumplir con las siguientes propiedades:

1. No tóxico.
2. Fácil acceso
3. Buena solubilidad para la inyección, límites de detección bajos y manipulación segura.
4. Preferentemente no debe estar presente naturalmente en el medio de estudio y en caso de estarlo la concentración debe ser mínima.
5. Efecto despreciable sobre las propiedades de transporte (densidad, viscosidad, pH, etc.), no debe reaccionar con la roca, fluidos de inyección o fluidos presentes en la formación. La velocidad del trazador y del fluido en el que se disuelve debe ser la misma.
6. Degradación estable o caracterizada en las condiciones de prueba (decaimiento radioactivo, biodegradación aceptable).
7. Partición sobre las concentraciones:
  - Trazadores conservativos: Sin partición.
  - Trazadores particionables: Partición constante y reversible.
8. Sin exclusión de iones o adsorción. [13]

### 2.2 TIPOS DE TRAZADORES:

Pasivos: Fluye a través del medio de estudio sin experimentar procesos químicos o físicos diferentes de los que experimenta la fracción en la que fue inyectado, moviéndose a la misma velocidad del fluido en el que se inyectó [13].

Activos: A medida que fluye a través del medio de estudio experimenta un proceso químico, biológico, físico de manera predecible permitiendo evaluar propiedades del sistema en el que se inyecta. Siendo el grado de actividad una medida cuantitativa de la propiedad de estudio [13].

Los trazadores en la industria petrolera se pueden clasificar en *trazadores radioactivos* y *trazadores químicos*.

Trazadores radioactivos: se aplican para estudiar el mecanismo de reacciones complejas que se desarrollan a partir de una serie de etapas donde intervienen una o más partículas. Los trazadores radiactivos son compuestos que tienen en su estructura radioisótopos que son isótopos radioactivos que tienen un núcleo atómico inestable y emiten energía característica al transformarse en un isótopo estable lo cual permite identificarlo. Su radiactividad decrece de forma exponencial [13].

Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico se clasifican en:

- Partículas alfa: Son partículas relativamente lentas, pesadas y altamente ionizantes. [13]
- Partículas beta: Producto del decaimiento radiactivo de algunos isótopos, son partículas (un electrón o un positrón) de alta velocidad, cercanas a la de la luz. [13]

- Partículas gamma: Son radiaciones electromagnéticas de gran energía, en ocasiones se presentan cuando ocurre una desintegración de partículas beta o una emisión de positrones. [13]
- Neutrones: Son partículas sin carga y con una masa aproximadamente de 1 UMA. Estos pueden penetrar fácilmente y también pueden ser absorbidos eficientemente por algunos de elementos más livianos como el átomo de Hidrógeno. [13]

Trazadores químicos: Son sustancias químicas que se agregan al fluido inyectado en el sistema permitiendo a través de su medición estudiar la evolución y comportamiento de un proceso químico, físico o biológico. Estos trazadores pueden estar en estado sólido, gaseoso o líquido. La cantidad de trazador químico que se debe utilizar depende de la distribución de las permeabilidades en el yacimiento, porosidad, espesor de la formación, caudal de inyección y producido, distancia del punto de inyección y recolección, dispersión del medio, saturación del agua, método de análisis de muestreo [13].

Clasificación de trazadores químicos:

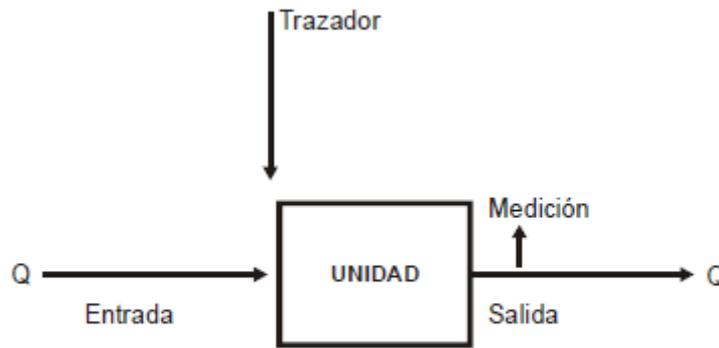
- a) *Trazadores químicos* en fases líquidas se clasifican en tres tipos: tintas, iónicos y orgánicos.
  - Las tintas: se detectan en el rango de parte por billón, y son susceptibles a la adsorción de las rocas del yacimiento. [13]
  - Trazadores iónicos son los aniones de sales de sodio y amonio solubles en agua, se detectan en el rango de partes por millón dependiendo de la salinidad del agua y composición de la salmuera. [13]
  - Trazadores orgánicos son alcoholes tales como metanol (MeOH), etanol (EtOH), isopropanol (IPA) o solventes como metilacetona (MEK). [13]
- b) *Trazadores químicos* en fase gas los más utilizados son:
  - Perfluorometilciclopentano (PMCP): Bajo límite de detección, no tóxico ni reactivo y de bajo costo. [13]
  - Perflurodimetilciclobutano (PDMCB): Estable en las condiciones de ensayo de trazadores en el yacimiento. Bajo límite de detección, no tóxico ni reactivo y de bajo costo. [13]
  - Tipo freon: Trazadores químicos en fase gaseosa como el hexafluoruro de azufre, halohidracarburos, perfluorocarburos. [13]

### 2.3 TIPOS DE INYECCIÓN DEL TRAZADOR:

Las formas de aplicar un trazador en un medio poroso pueden ser: continua o en bache/pico.

#### Fig. 15

*Esquema que representa la inyección de un trazador.*



*Nota.* Tomado de *Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención*, (p. 44), por Ing. Víctor Maldonado Yactayo, 1992, CEPIS/OPS.

Continúa: el trazador es inyectado de manera permanente manteniendo la concentración ( $C_0$ : concentración inicial del trazador) durante todo el tiempo de estudio [13].

Pico: La inyección del trazador es concentrada y en un tiempo breve de inyección el cual es pequeño en comparación con los tiempos característicos de los fenómenos de transporte (dispersión-convección) [13].

Bache: Se inyecta la concentración de trazador  $C_0$  constante durante un tiempo finito durante el estudio, este es más prolongado en comparación con la inyección pico [13].

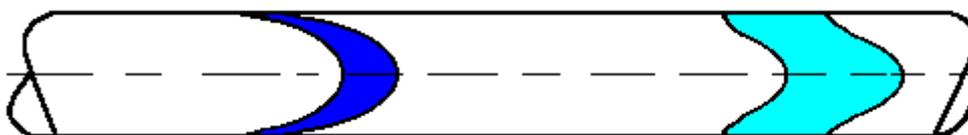
## 2.4 TRANSPORTE DEL TRAZADOR:

Convección: Un trazador pasivo al inyectarse en el medio de estudio se mueve a la misma velocidad que el fluido que lo transporta este proceso de transporte se llama convección [14].

Difusión Molecular: Es un fenómeno que ocurre en el transporte de trazadores, el material que difunde lo hace desde los lugares con elevadas concentraciones a las zonas de bajas concentraciones, es un proceso instantáneo [14].

**Fig. 16**

*Transporte del trazador.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Trazadores: Clase 8a*, (p.3), por Somaruga, Carlos, 2020, Universidad Nacional del Comahue.

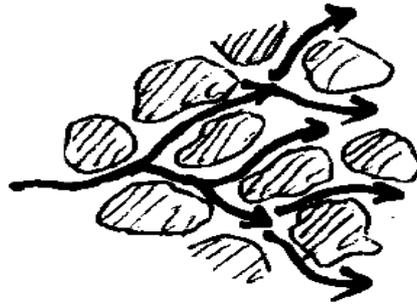
El fenómeno de difusión molecular se va a superponer con la convección y las partículas del trazador van a viajar en todas las direcciones donde no haya trazador. Entonces el trazador se va a dispersar.

Dispersión Mecánica: Se debe al movimiento de fluidos a través del medio poroso. Esta dispersión se produce en el sentido de flujo y lateralmente [15].

La dispersión transversal, Fig. 17, es debida a la bifurcación de los caminos que encuentra el fluido. [15]

**Fig. 17**

*Dispersión transversal.*

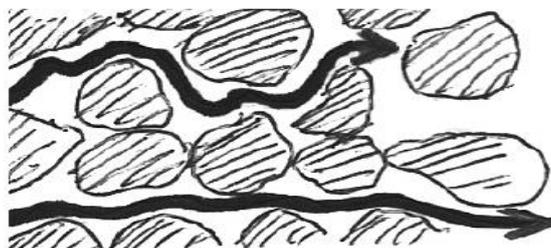


*Nota.* Tomado de *Transporte de los contaminantes*, (p.4), por Sánchez San Román, Javier, 2012, Universidad de Salamanca (España), Hidrología.

La dispersión longitudinal, Figs. 18 y 19, es debida a caminos tortuosos donde las moléculas se atrasan, las moléculas que circulan por canales porales mayores o por el centro de los canales intergranulares avanzan más rápido que las moléculas que circulan cerca de los granos [15].

**Fig. 18**

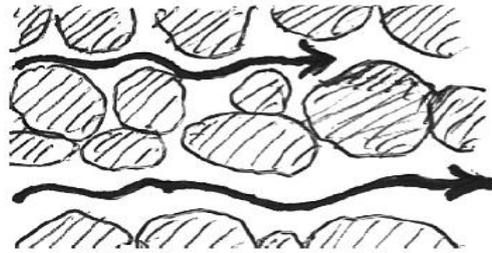
*Dispersión longitudinal por la tortuosidad.*



*Nota.* Tomado de *Transporte de los contaminantes*, (p.4), por Sánchez San Román, Javier, 2012, Universidad de Salamanca (España), Hidrología.

**Fig. 19**

*Dispersión longitudinal por amplitud de canales.*

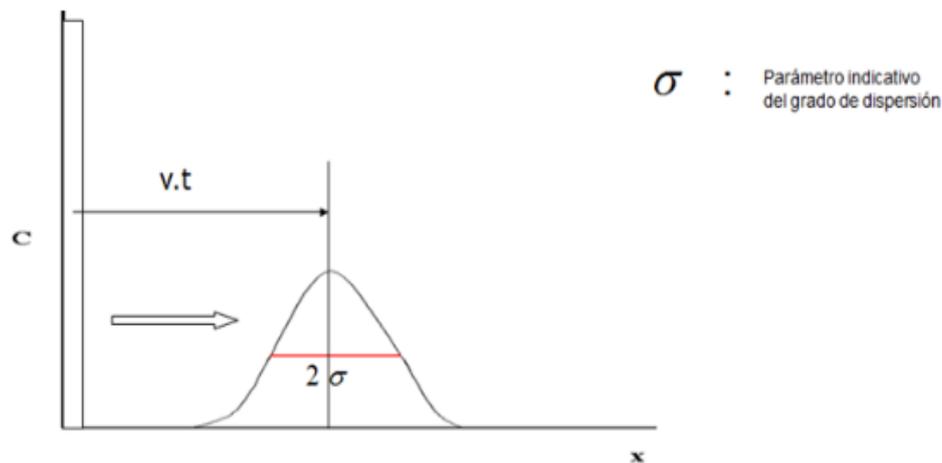


*Nota.* Tomado de *Transporte de los contaminantes*, (p.4), por Sánchez San Román, Javier, 2012, Universidad de Salamanca (España), Hidrología.

**Dispersión Hidrodinámica:** El avance del trazador por convección no es uniforme, sino que hay moléculas adelantadas y atrasadas con respecto al promedio, este fenómeno se conoce como dispersión hidrodinámica y su intensidad depende del grado de heterogeneidad de la roca. Es la acción conjunta de la difusión y dispersión mecánica. Usualmente los parámetros asociados al “ancho” de la distribución de concentración del trazador se utilizan como medida de la intensidad del fenómeno de dispersión hidrodinámica [14], Fig. 20, donde  $C$  es la concentración del trazador,  $v$  es velocidad que posee y  $t$  es el tiempo que tarda en dispersarse.

**Fig. 20**

*Gráfico de concentración vs. dispersión.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Trazadores: Clase 8a*, (p.5), por Somaruga, Carlos, 2020, Universidad Nacional del Comahue.

## 2.5 DESPLAZAMIENTO DE FLUIDOS MISCIBLES:

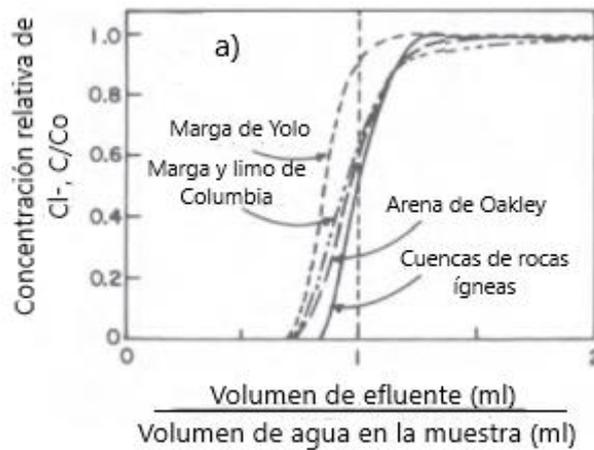
Cuando un fluido que contiene un trazador disuelto se desplaza de un medio poroso por una cantidad del mismo fluido libre de trazador, este desplazamiento miscible da como resultado una distribución de la concentración del trazador que depende de las velocidades de flujo microscópicas, velocidades de difusión del trazador y otros procesos químicos y físicos. La distancia que recorre un soluto a través del volumen aparente (bulk solid) está determinada por

la tortuosidad de la longitud total del camino que sigue. Debido a las diferentes magnitudes de los procesos de convección, difusión y químicos que ocurren en diferentes secuencias de poros, las trayectorias de todos los iones no serán las mismas [16].

El desplazamiento miscible fue estudiado por Nielsen y Biggar (1962) en varios materiales porosos en condiciones saturadas y no saturadas y en varias velocidades de flujo promedio diferentes. Las diferencias físicas entre los materiales porosos se manifestaron por cambios en la forma y posición de las curvas de ruptura causadas por la difusión iónica.

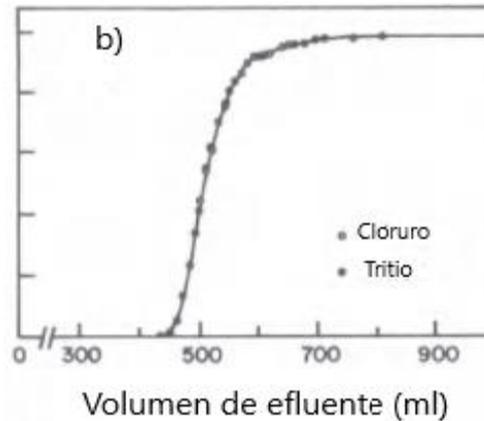
**Fig. 21**

a) Curvas de distribución de trazador, donde  $C_0$  es la concentración inicial y  $C$  es la concentración, para cuatro materiales porosos saturados - Marga Yolo, Franco limoso de Columbia, arena de Oakley y perlas de vidrio. Las velocidades de flujo promedio fueron 1.89, 2.49, 0.30 y 1.77 cm/h, respectivamente.



Nota. Tomado de *Miscible Displacement in Soils: I. Experimental Information*, (p.3), Nielsen y Biggar, 1962.

b) Curva de distribución para tritio y cloruro de perlas de vidrio saturadas de 200  $\mu\text{m}$ . La velocidad de flujo promedio y la capacidad volumétrica de la muestra fueron 2.11 cm/h y 512 ml, respectivamente.



*Nota.* Tomado de *Miscible Displacement in Soils: II. Behavior of tracers*, (p.126), Nielsen y Biggar, 1962.

Por lo tanto, si un volumen poral de agua marcada con trazador desplaza completamente el agua libre del trazador sin mezclarse en el límite entre los dos fluidos, la curva de avance para todos los materiales sería la de la línea vertical discontinua. En un artículo posterior, Biggar y Nielsen, comprobaron la contribución de la difusión a la dispersión de solutos utilizando como trazadores cloruro y tritio, que se caracterizan por coeficientes de difusión desiguales.

Dado que el coeficiente de difusión del tritio es mayor que el del Cl<sup>-</sup> en solución pura, el hecho de que no se pudiera medir la separación de los trazadores en el caso de la columna de perlas de vidrio indica que la dispersión que se produjo resultó principalmente de la distribución microscópica de la velocidad del flujo (Fig. 21 b). En base en estos resultados, los autores concluyeron que la distribución de un trazador a cierta distancia de su fuente depende de la geometría del material poroso y de las interacciones físicas y químicas entre la solución del trazador y el medio durante el flujo.

Los gráficos de C/C<sub>0</sub> vs volumen de poro, son descriptivos de los tiempos relativos que toma el fluido desplazante para fluir a través del medio o para que los solutos en el fluido desplazante entren en equilibrio químico con el medio poroso [16].

## 2.6 TRAZADOR QUÍMICO: CLORURO DE SODIO.

El trazador químico NaCl es el trazador elegido para nuestros ensayos es de fácil acceso y bajo costo, permite determinar la concentración a la salida del sandpack de manera rápida a través de la medición de conductividad eléctrica o densidad de la muestra. Cabe destacar que es un trazador conservativo es decir permanece enteramente en la fase que se inyecta, dado que los aniones cloruro son conservativos en la fase acuosa [13].

Siendo inyectado en el sandpack a temperatura ambiente a las siguientes concentraciones:

- 19,9 g NaCl/l saturado con 18,9 g NaCl/l.
- 53,7 g NaCl/l saturado con 48,8 g NaCl/l.
- 104 g NaCl/l saturado con 98,4 g NaCl/l.

Entonces el trazador disuelto se desplaza de un medio poroso produciéndose un desplazamiento miscible del trazador y en el fluido.

**Tabla 2**

*Propiedades físicas y químicas del NaCl.*

<b>Nombre</b>	Sodio Cloruro
<b>Fórmula química</b>	NaCl
<b>Aspecto/Forma</b>	Sólido
<b>Color</b>	Incoloro
<b>pH</b>	7
<b>Punto de fusión/ punto de congelación Punto/intervalo de fusión</b>	801°C
<b>Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición</b>	1413°C
<b>Presión de vapor</b>	1,33 hPa a 865°C
<b>Densidad relativa</b>	2,1650 g/cm <sup>3</sup>
<b>Solubilidad en agua</b>	358 g/l a 20°C - soluble

*Nota.* Tomado de *Hoja de seguridad: Cloruro de sodio*, (p.1), por Research AG S.A, 2021, Research-ag.

## 2.7 TRAZADOR QUÍMICO: ALCOHOL BENCÍLICO.

El trazador patrón del ensayo que permite verificar los resultados obtenidos es el alcohol bencílico que actúa como un trazador no particionable para cualquier temperatura. La familia del alcohol bencílico que tienen sustituido el anillo aromático con halógenos si actúan como trazadores particionables.

Siendo inyectado en el sandpack a las siguientes concentraciones:

- 52,5 ppm C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>O en 19,9 g NaCl/l.
- 25 ppm C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>O en 53,7 g NaCl/l.
- 410,8 ppm C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>O en 104 g NaCl/l.

A dichas concentraciones el trazador es soluble en la salmuera que satura el sandpack produciéndose un desplazamiento miscible del trazador y el fluido.

A partir de la absorbancia medida con el espectrofotómetro UV-VIS se determina la concentración del trazador por medio de la ley de Lambert-Beer.

**Tabla 3**

*Propiedades físicas y químicas del alcohol bencílico.*

<b>Nombre</b>	Alcohol Bencílico
<b>Fórmula química</b>	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O
<b>Apariencia/Estado Físico</b>	Líquido
<b>Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición</b>	205°C a 1.013 hPa.
<b>Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos:</b>	Límite superior de explosividad: 13 % (v). Límite inferior de explosividad: 1,3 % (v).
<b>Punto de inflamación</b>	101°C - DIN 51758.
<b>Coefficiente de reparto n-octanol/agua</b>	log Pow: 1,05 a 20°C - No es de esperar una bioacumulación.
<b>Densidad</b>	1,05 g/cm <sup>3</sup> a 20 °C

*Nota.* Tomado de *Ficha de datos de seguridad: alcohol bencílico*, (p.1), por Sigma-Aldrich, 2021, Sigmaaldrich.

Reactividad: En caso de fuerte calentamiento pueden producirse mezclas explosivas con el aire. Debe considerarse crítico un intervalo a partir de aproximadamente 15 Kelvin por debajo del punto de inflamación. [18]

Estabilidad química: Sensibilidad a la luz, Sensible al aire. [18]

Posibilidad de reacciones peligrosas:

Riesgo de explosión con:

- Halogenuros de no metales.

Reacción exotérmica con:

- Oxidantes.
- Iniciadores de polimerización.
- Bromuro de hidrógeno.
- Hierro.
- Ácido sulfúrico.
- Ácidos.
- Isocianatos. [18]

Condiciones que deben evitarse: Calentamiento fuerte. [18]

Materiales incompatibles: Plásticos diversos. [18]

## 2.8 CÁLCULO DEL VOLUMEN PORAL A PARTIR DE LAS CONCENTRACIONES DEL TRAZADOR:

Volumen poral es el volumen total del sandpack que puede ser ocupado por fluidos. El mismo podría ser medido directamente en una muestra secada y posteriormente saturada donde el volumen líquido inyectado será igual al volumen poral de la muestra y puede ser determinado conociendo la densidad del líquido y el peso de la muestra saturada.

$$VP = \rho_{\text{líquido}} \cdot (W_{\text{sat}} - W) \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde:

$\rho_{\text{líquido}}$  = Densidad del líquido.

$W_{\text{sat}}$  = Peso de la muestra saturada.

$W$  = Peso de la muestra sin saturar.

La aplicación del trazador salino para determinar el volumen poral sigue un lineamiento similar, el sandpack se encuentra saturado con una salmuera de concentración (C) y se inyecta el trazador NaCl cuya concentración difiere en un porcentaje que varía entre el 5 a 10%. La concentración relativa del trazador que se mide a la salida del sandpack graficada contra el volumen de fluido inyectado permite obtener la curva de distribución del trazador.

Si se analiza el sandpack como una suma de canales que permiten el transporte del fluido, el caudal de cada canal puede determinarse si se conoce la masa del trazador recuperado a través del mismo.

$$q_{\text{canal}} = \left( \frac{m_{\text{rec}}}{m_{\text{iny}}} \right) \cdot q_{\text{iny}} \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde:

$q_{\text{canal}}$  = Caudal del canal.

$m_{\text{rec}}$  = Masa recuperada.

$m_{\text{iny}}$  = Masa inyectada.

$q_{\text{iny}}$  = Caudal inyectada.

La relación de la ecuación (24) permite determinar el volumen de cada canal a partir de la siguiente ecuación:

$$v_{\text{canal}} = \left( \frac{m_{\text{rec}}}{m_{\text{iny}}} \right) \cdot v_{\text{iny}} \quad \text{Ec. (25)}$$

$$v_{\text{canal}} = \left( \frac{C_{\text{rec}}}{C_{\text{iny}}} \right) \cdot v_{\text{iny}} \quad \text{Ec. (26)}$$

Como el volumen poral será la suma de todos los canales entonces:

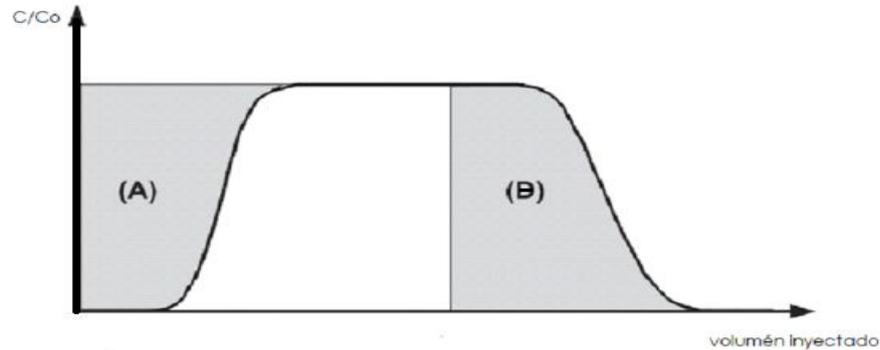
$$VP = \sum \left( \frac{C_{\text{rec}}}{C_{\text{iny}}} \right) \cdot v_{\text{iny}} \quad \text{Ec. (27)}$$

En la recuperación del trazador (bajada de la curva de distribución):

$$VP = \int_0^{\infty} \left( \frac{C_{rec}}{C_{iny}} \right) dV \quad \text{Ec. (28)}$$

**Fig. 22**

*Curva de distribución del trazador.*



Nota. Tomado de *Preparative Chromatography of Fine Chemicals and Pharmaceutical Agents* (p. 279), por Henner Schmidt, 2006.

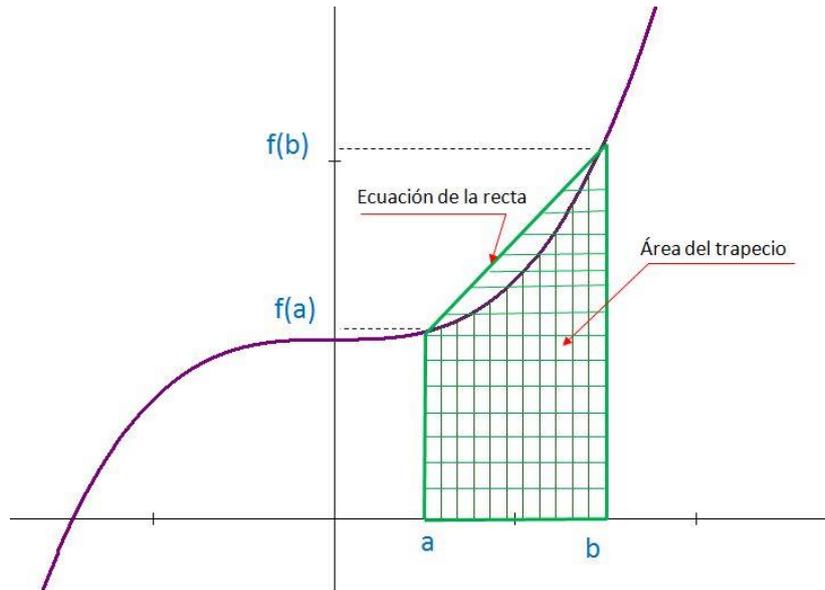
El área A (Fig. 22) entre la curva de distribución del trazador y la abscisa  $C/Co=1$  representa la capacidad de saturación de NaCl en la columna del sandpack en  $cm^3$ , es decir, el VP; mientras que el área B (Fig. 22) corresponde al volumen desplazado de NaCl en la columna del sandpack lo cual también indica el VP de la muestra. Cuando estas áreas son iguales el proceso es reversible; es decir los pasos del desplazamiento de la solución que se obtienen después de que se ha alcanzado la meseta  $C/Co=1$  se reducen inversamente a los pasos de saturación. La comparación de dichas áreas se puede utilizar para analizar la coherencia del ensayo. [47][48] Para realizar el cálculo de las áreas, es importante considerar que el tubo de salida del sandpack representa un volumen saturado/desplazado que de no ser deducido llevaría a la sobreestimación del VP. Debido a que el equipo fue depurado el volumen de la manguera que conecta el tanque con la solución y el sandpack no es necesario considerarlo. [47] [48].

Estas áreas pueden obtenerse por diferentes métodos:

1. Métodos numéricos para determinar integrales como podrían ser Simpson, trapecio, trapecio compuesto, entre otros. Para nuestro análisis utilizamos el método de trapecio compuesto que consiste en dividir en sub-intervalos el intervalo de interés y aplicando el método de trapecio a cada uno de los sub-intervalos, esta es una de las fórmulas cerradas de Newton-Cotes.

**Fig. 23**

*Representación gráfica del método de trapecio.*

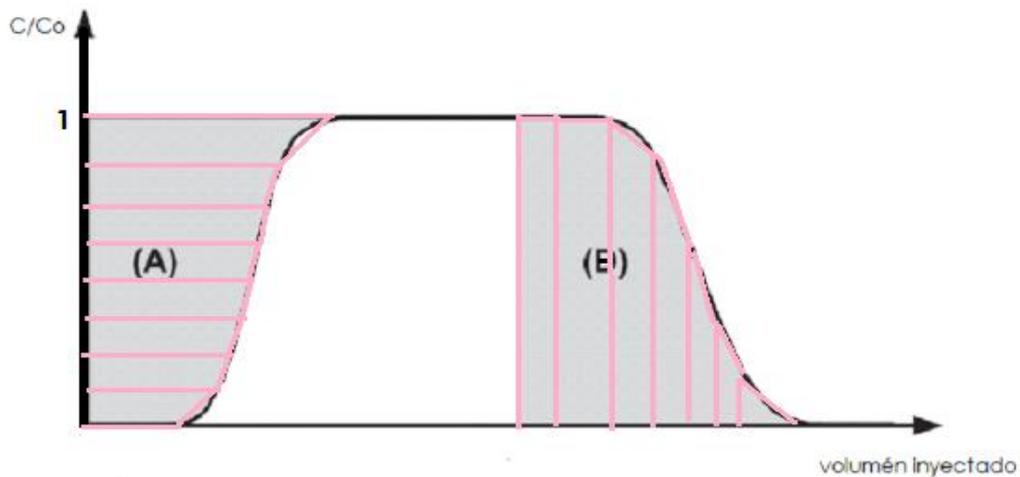


Nota. Tomado de *Métodos Numéricos Modulo 4: Aproximación de integrales*, por Multimedia.

$$I = \int_a^b f(x) dx = (b - a) \cdot \left( \frac{f(a)+f(b)}{2} \right) \quad \text{Ec. (29)}$$

Entonces el método de trapecio compuesto aplicado a la curva de distribución será:

**Fig. 24**  
*Curva de distribución.*



Nota. Tomado de *Preparative Chromatography of Fine Chemicals and Pharmaceutical Agents* (p. 279), por Henner Schmidt, 2006.

$$\text{Área A} = \int_0^{V_1} V(C) dC = \int_0^{C_1} V(C) dC + \int_{C_1}^{C_2} V(C) dC + \dots + \int_{C_{(n-1)}}^1 V(C) dC \quad \text{Ec. (30)}$$

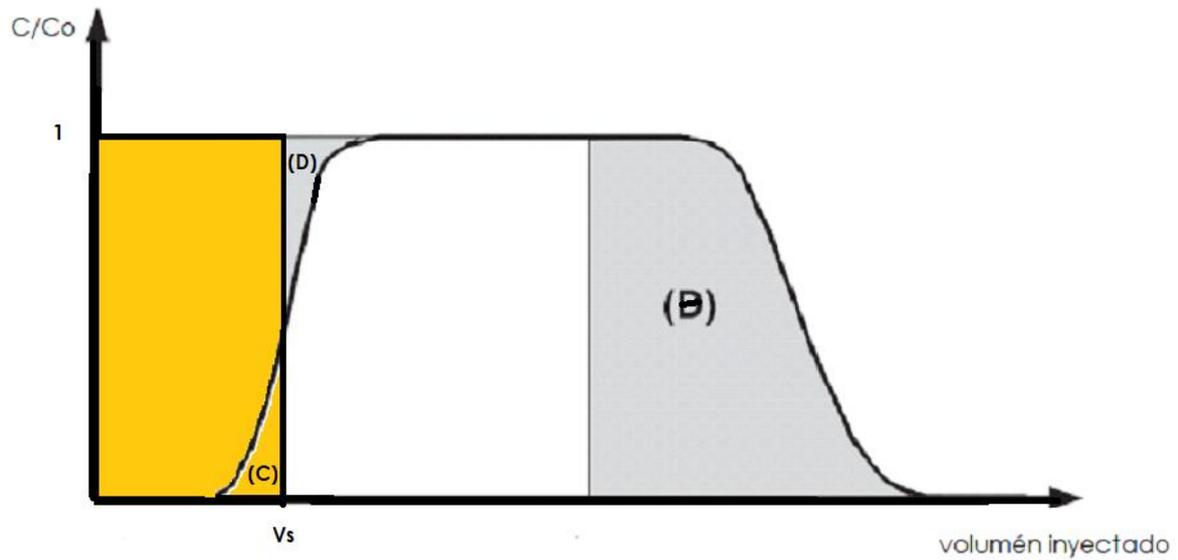
$$\text{Área B} = \int_{V_2}^{\infty} \frac{C(V)}{C_0} dV = \int_{V_2}^{V_3} \frac{C(V)}{C_0} dV + \int_{V_3}^{V_4} \frac{C(V)}{C_0} dV + \dots + \int_{V_{n-1}}^{V_n} \frac{C(V)}{C_0} dV \quad \text{Ec. (31)}$$

siendo  $n$  el número de sub-intervalos.

2. Por medio de una aproximación que se obtiene al dividir el área con un rectángulo de modo que las áreas C y D sean iguales, dando por resultado que el área del rectángulo sea del mismo orden al área de interés que se desea calcular.

**Fig. 25**

*Curva de distribución del trazador.*



Nota. Tomado de *Preparative Chromatography of Fine Chemicals and Pharmaceutical Agents* (p. 279), por Henner Schmidt, 2006.

## CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y MUESTRAS.

### 3.1 MUESTRAS:

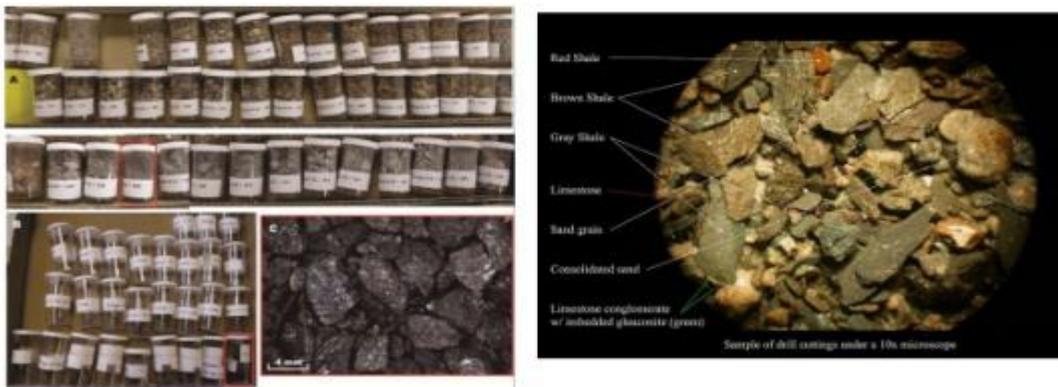
Dependiendo de la disponibilidad y de la finalidad del estudio para obtener propiedades representativas del reservorio (como por ejemplo  $k$ , porosidad,  $S_o$ , presiones capilares, contenido mineral, contenido paleontológico) o realizar un ensayo petrofísico donde se analizan variables de interés como por ejemplo la selectividad o tamaño de granos, se procederá a la utilización de alguna de las siguientes muestras [19].

### 3.2 CUTTINGS:

Son los recortes de perforación que se recuperan a medida que el trépano atraviesa las formaciones y son removidas por medio del lodo de perforación fuera del pozo. Los mismos pueden utilizarse para determinar el contenido mineral, paleontológico [19].

**Fig. 26**

*Cutting.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, (p.22), Frigerio Malvina, 2021, Universidad Nacional del Comahue.

### 3.3 TESTIGOS CORONAS:

Es una porción de roca que se extrae del subsuelo en la etapa de perforación dentro de las zonas que son de interés desde el punto de vista de la roca reservorio, con la finalidad de evaluar y determinar las propiedades petrofísicas de la roca. Hay que tener en cuenta que los datos obtenidos de testigos no consolidados o cuando son extraídos de las paredes de los pozos (testigos laterales), pueden dar como resultado mediciones de poca precisión porque la forma, tamaño y empaquetamiento de los granos puede estar alterado [19].

**Fig. 27**

*Testigos coronas.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, (p.15), Frigerio Malvina, 2021, Universidad Nacional del Comahue.

### **3.4 PLUGS:**

Es una muestra extraída de un testigo corona, que permiten medir directamente propiedades de la roca y la interacción con los fluidos. Tiene forma de cilindro regular, el diámetro varía entre 25 o 38 mm y la longitud es de aproximadamente 64 mm [\[19\]](#).

### **Fig. 28**

*Plugs.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, (p.17), Frigerio Malvina, 2021, Universidad Nacional del Comahue.

### **3.5 SANDPACK:**

Es una muestra compuesta por material compactado, con un tamaño de arena que varía de 0,0525 mm a 2 mm combinado con material fino de 0,0075 mm a 0,0525 mm, armada a partir de un material “natural” o “artificial” consolidado o friable proveniente del mismo yacimiento que se desea analizar o similar [\[19\]](#).

### **Fig. 29**

*Sandpack.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, (p.26), Frigerio Malvina, 2021, Universidad Nacional del Comahue.

### 3.6 BEREIA:

Son muestras de roca naturales de textura y composición homogénea. Algunas están formadas por clastos generalmente de cuarzo cementados con sílice, los granos predominantes son de tamaño arena y tienen bajo contenido de arcillas. También existen bereas de tipo shale. Al ser homogéneas la porosidad y permeabilidad es constante, por lo que se seleccionan para ser ensayadas de acuerdo a la porosidad y permeabilidad del reservorio a estudiar [\[19\]](#).

**Fig. 30**

*Berea.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, (p.13), Frigerio Malvina, 2021, Universidad Nacional del Comahue.

### 3.7 ETAPAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS:

1. Realizamos las soluciones de 120 g NaCl/l y 60 g NaCl/l para posteriormente por un proceso de dilución con agua destilada obtener las soluciones de 18,9 g NaCl/l; 48,8 g NaCl/l; 98,4 g NaCl/l que se inyectarán en el sandpack. Además, se obtuvieron del laboratorio de operaciones las soluciones de 52,5 ppm de  $C_7H_8O$  en 19,9 g NaCl/l; 25 ppm de  $C_7H_8O$  en 53,7 g NaCl/l; 410,8 ppm de  $C_7H_8O$  en 104 g NaCl/l.

2. El tipo de muestra seleccionada para la realización de los ensayos fue un sandpack disponible en el laboratorio de petrofísica de arena  $30 (800 \mu\text{m}) - 70 (212\mu\text{m})$ . A partir del mismo realizamos el montaje del equipo y registramos el peso de los tubos vacíos donde irán posteriormente las muestras.
3. Se procede a la saturación del sandpack, aplicando un diferencial de presión pequeño utilizando la salmuera correspondiente al rango de salinidad que se está ensayando.
4. Se inyecta la solución trazadora con un volumen 3 veces mayor al VP del sandpack, cuya concentración difiere del 5 al 10% en la concentración que satura el medio poroso.
5. Se obtiene la solución desplazada del medio poroso en tubos con tapa que permiten aislar la muestra del ambiente lo que permite evitar el cambio de concentración de NaCl debido a la evaporación del agua.
6. Se pesan los tubos para luego realizar la medición de conductividad eléctrica, densidad y absorbancia de muestras seleccionadas y consecutivas dejando una muestra sin medir cada 4 tubos en caso de tener que realizar nuevamente la medición de alguna de las propiedades.
7. Se relacionan los datos obtenidos de las 3 propiedades con las curvas de calibración correspondientes obteniendo la concentración de NaCl con respecto al volumen inyectado para posteriormente calcular el volumen poral de la muestra por medio de la curva de avance del trazador.
8. Se desalojan los trazadores (NaCl y alcohol bencílico) a través del desplazamiento de una solución con la misma concentración que originalmente saturaba el medio por medio de un diferencial de presión pequeño.
9. Se repiten los pasos 5,6 y 7.

### 3.8 MATERIAL UTILIZADO PARA LA PREPARACIÓN DE SALMUERA:

- Cloruro de sodio (NaCl)
- Agua destilada.
- Balanza analítica: Las balanzas se caracterizan por su exactitud por su precisión y por su sensibilidad. Es un instrumento que mide masa con una exactitud de 0,1 mg. [\[20\]](#)

#### **Fig. 31**

*Balanza analítica.*

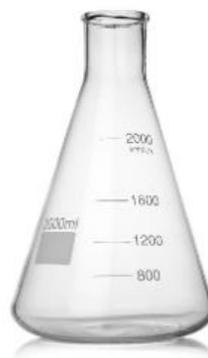


*Nota. Tomado de Pesada: Balanza analítica, por Ub.*

- Matraz de Erlenmeyer: Recipiente graduado de vidrio transparente de cuello ancho. Se utiliza para medir cantidades de líquidos, para hacer titulaciones o para hacer reaccionar sustancias que necesitan un largo calentamiento. [\[21\]](#)

**Fig. 32**

*Matraz Erlenmeyer.*



*Nota. Tomado de Laboratorio de ciencias: Erlenmeyer, por Kitlab.*

- Agitador magnético: Consiste en una placa que tiene por debajo un imán rotatorio o una serie de electroimanes dispuestos en forma circular a fin de crear un campo magnético rotatorio. Es muy frecuente que tal placa tenga un montaje de resistencias eléctricas con la finalidad de dotarle del calor necesario para elevar la temperatura de algunas soluciones químicas. [\[22\]](#)

**Fig. 33**

*Agitador magnético.*



*Nota.* Tomado de *Agitador magnético analógico*, 2018, por Ictsl.

- Barra agitadora magnética: Es una barra magnética cubierta por una capa de plástico (usualmente teflón). [\[23\]](#)

**Fig. 34**

*Barra agitadora magnética.*



*Nota.* Tomado de *Barra agitadora magnética*, por Aliexpress.

- Kitasato: Es un matraz de vidrio que en su cuello contiene un tubo lateral de vidrio (vástago lateral), que permite su conexión a diferentes dispositivos a través de mangueras o tubos flexibles [\[24\]](#).

**Fig. 35**

*Kitasato.*



*Nota.* Tomado de *Kitasato boro*, por Norces.

- Embudo Buchner: Es un embudo con un cilindro separado por una placa de porcelana perforada, con pequeños orificios. El material filtrante (usualmente papel de filtro) se recorta con forma circular y se coloca sobre la placa [\[26\]](#).

**Fig. 36**

*Embudo Buchner.*



*Nota.* Tomado de *Filtración a vacío: cómo asegurar la bomba*, por Cromtek.

- Tapón de goma: ideales para procesos de aspiración o filtración al vacío. Para un óptimo sellado de recipientes de laboratorio y mantenerlos libres de posibles contaminantes en el ambiente o bien para preservar sustancias volátiles contenidas [\[28\]](#).

**Fig. 37**

*Tapón de goma.*



*Nota.* Tomado de *Tapón de goma 2 orificios, diam. (inf.-sup.)*, por Auxilab.

- Bomba de vacío: La estructura interna del rotor, la camisa y las paletas móviles producen unas cámaras que van variando su tamaño dependiendo de la posición. La presión en el interior de la cámara aumenta cuando disminuye el volumen de ésta, puesto que el gas en el interior se mantiene en igual cantidad. Del mismo modo, la presión disminuye cuando la cámara se expande, generando de ese modo vacío [\[29\]](#).

**Fig. 38**

*Bomba de vacío.*



*Nota.* Tomado de *Cómo funciona una bomba de vacío*, por Como-funciona.

- Papel de filtro de 100 y 2 micrones:

**Fig. 39**

*Papel de filtro.*



*Nota.* Tomado de *El papel de filtro: lo que debes saber*, por Materialesdelaboratoriohoy.

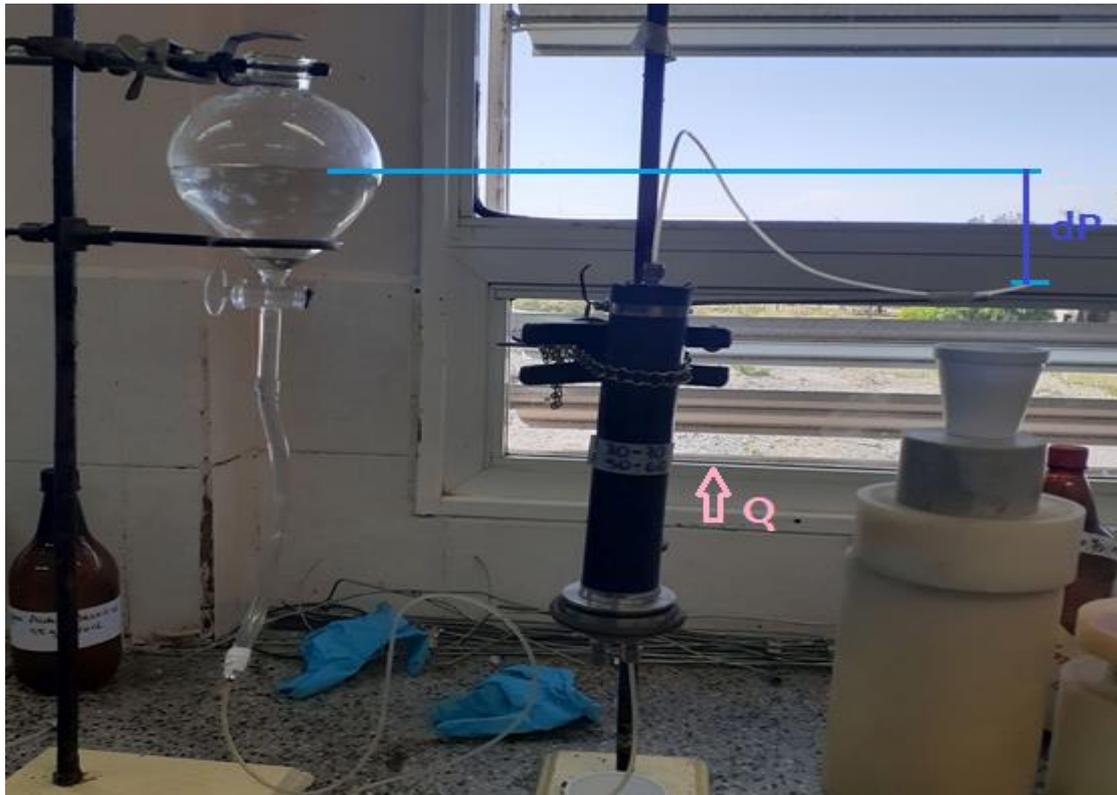
### **3.9 PROCEDIMIENTO DE LA PREPARACIÓN DE SALMUERA:**

1. Primero, pesamos la cantidad requerida de cloruro de sodio (NaCl) en la balanza analítica con una resolución de 0,0001 gramos.
2. Luego colocamos en un matraz de 1 L de capacidad, la masa de NaCl pesado en balanza. Luego le agregamos 400 mL de agua destilada.
3. Al matraz se le adiciona una barra magnética en su interior para posteriormente ser depositado sobre la base del agitador magnético, el cual por medio de un imán rotatorio induce la rotación mecánica de la barra agitadora permitiendo la mezcla entre el soluto (NaCl) y solvente (agua destilada), dicha rotación se mantiene durante 15 minutos.
4. Se enrasa el matraz hasta el volumen final. Se realiza la mezcla de la solución por medio del agitador magnético durante 45 minutos.
5. Retiramos el matraz del agitador.
6. Se vincula la salida lateral del kitasato a una bomba de vacío por medio de una conexión, en la boca del mismo se aloja por medio de un tapón un embudo Buchner con un papel de filtro de 100 micrones.
7. Al encender la bomba se produce el filtrado por succión de la solución a través del prefiltro de 100 micrones.
8. Se cambia en el embudo Buchner el papel de filtro de 100 micrones que retuvo las impurezas de diámetro superior a ese diámetro por un filtro de 2 micrones esto permite separar y recolectar la mayor cantidad de sólidos disueltos en la solución.
9. Por último, colocamos nuestra salmuera en un recipiente que se encuentra rotulado con el nombre correspondiente de la solución.

### **3.10 PROCEDIMIENTO Y MONTAJE DEL EQUIPO:**

#### **Fig. 40**

*Montaje completo del equipo, donde se llevaron a cabo los ensayos.*



*Nota.* Tomado de *Laboratorio de petrofísica*, Universidad Nacional del Comahue.

Aplicando la ley de Darcy:

$$q = \frac{K \cdot A}{\mu} \left[ \frac{dP}{dx} + \rho \cdot g \cdot \text{sen} \alpha \right] \quad \text{Ec. (11)}$$

El trazador atraviesa la muestra desplazando la solución en la que se encuentra saturada. El montaje del equipo se realiza por medio de los siguientes pasos:

1. Se coloca una ampolla de decantación de vidrio la cual tiene forma de una ampolla invertida y un vástago con llave esmerilada en un soporte universal.
2. Se llena la ampolla de decantación con la solución del trazador a pasar por la muestra.
3. Se ajusta la altura de la ampolla con el soporte universal para que el nivel de la solución esté por encima de la válvula de salida, de modo tal que se genere un diferencial positivo que permite el pasaje de fluidos (dP en Fig. 40).
4. La salida de la ampolla se conecta a una manguera de entrada del sandpack por medio de una cinta de teflón para lograr el sellado.
5. El sandpack tiene dos entradas una de las cuales se abre con una llave para permitir el depurado de la muestra. La otra entrada se vincula a la manguera, tiene una tuerca en su extremo que se acciona por medio de una pinza.
6. Se coloca en un soporte universal en posición vertical que permite que el flujo de la solución atraviese la muestra con un gradiente hidráulico ( $\Delta h / \Delta L$ ). El flujo de la solución debe ser lo suficientemente lento para que los granos de arena no consolidados no migren y evitar así el movimiento de finos.

7. Se recoge el volumen desplazado en tubos de plástico transparente (que previamente fueron pesados y enumerados), hasta lograr desplazar por la muestra 3 veces el volumen poral del sandpack, lo que permite obtener resultados fiables. El volumen de solución tomado en cada tubo es aproximadamente  $7,5 \text{ cm}^3$ , que permite realizar las medidas de las propiedades para el ensayo y esto se obtiene por comparación de una muestra patrón con este volumen, donde se recolecta 38 tubos de muestra. El volumen poral de la muestra es  $92,8 \text{ cm}^3$  en la etapa de saturación de la solución de concentración  $C_{n+1}$ .
8. Al terminar la etapa de saturación se cierra el pasaje de fluidos de la ampolla de decantación de vidrio con la llave esmerilada del vástago y se llena la ampolla con la solución  $C_n$ .
9. Se repite el paso 7 al desalojar la solución  $C_{n+1}$  y saturar el sandpack con la solución  $C_n$ .

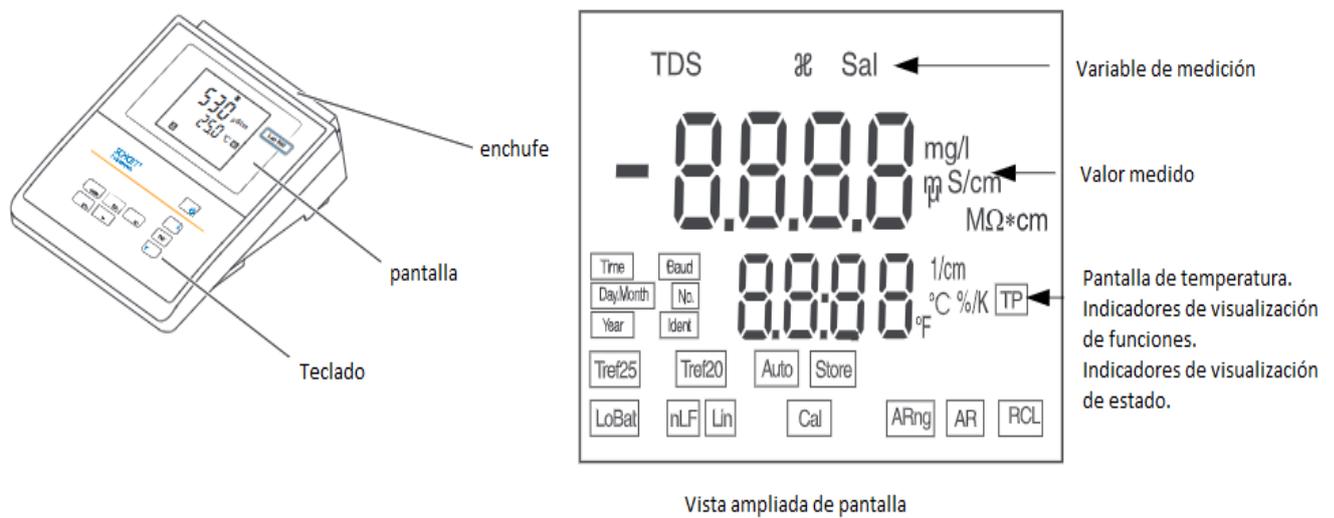
### 3.11 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTOS

#### 3.11.1 CONDUCTÍMETRO LAB 960

El conductímetro Lab 960 fue utilizado para medir la conductividad eléctrica, temperatura y salinidad de manera confiable y rápida en el laboratorio.

**Fig. 41**

*Esquema del conductímetro.*



*Nota.* Tomado de *Lab 960: conductímetro de laboratorio con reconocimiento automático del sensor* (p.7), por SI Analytics GmbH, 2013, Manualslib.

**Tabla 4**

*Rango de medición, resolución y exactitud del conductímetro lab 960.*

<b>RANGO DE MEDICIÓN, RESOLUCIÓN Y EXACTITUD</b>
--

Variable	Rango de medición	Resolución
CE( $\mu$ S/cm)	0.000-1.999*	0.001
	0.00-19.99**	0.01
	0.0-199.9	0.1
	0-1999	1
CE(mS/cm)	0.00-19.99	0.01
	0.0-199.9	0.1
	0-500	1
Resistividad (Mohm*cm)	0.00-19.99	0.01
	0.0-199.9	0.1
	0-1999	1
SAL	0.0-70.0 De acuerdo con la tabla IOT	0.1
TDS(mg/l)	0-1999 El factor se puede establecer entre 0.40 y 1.00	1
T( $^{\circ}$ C)	-5.0 - +120.0	0.1
T( $^{\circ}$ F)	+23.0 - +248.0	0.1

\*Sólo es posible con celdas de la constante de celda  $0.010\text{cm}^{-1}$

\*\*Sólo es posible con celdas de la constante de celda  $0.010\text{cm}^{-1}$  o  $0.090\text{-}0.110\text{cm}^{-1}$

*Nota.* Tomado de *Lab 960: conductímetro de laboratorio con reconocimiento automático del sensor* (p.59), por SI Analytics GmbH, 2013, Manualslib.

### PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

1. Se enciende el conductímetro y se verifica si el equipo está calibrado al medir la conductividad eléctrica de una solución de agua destilada de conductividad eléctrica conocida ( $4 \mu\text{S/cm}$ ). En caso de que el valor medido sea de un orden aproximado al teórico entonces se prosigue al paso 2, se debe tener en cuenta que el valor de la CE depende de la cantidad de iones en solución y el valor no es exacto. Si el conductímetro no está calibrado se debe proceder a calibrar el equipo con una solución patrón de CE conocida.
2. Se selecciona para la medición de la CE los tubos pares a partir del tubo número 2 y alternados cada 4 mediciones debido a que al realizar diferentes mediciones como densidad y absorbancia podrían contaminarse las muestras, además se deja un tubo extra en caso de que una muestra se necesite medir nuevamente ya sea porque se requiere confirmar la veracidad de un resultado o pérdida del tubo al que se desea realizar la medición.
3. En los ensayos de baja concentración ( $18,9 \text{ g NaCl/l}$  a  $19,9 \text{ g NaCl/l}$ ) y media ( $48,8 \text{ g NaCl/l}$  a  $53,7 \text{ g NaCl/l}$ ) se mide la conductividad eléctrica desde los tubos de ensayo sumergiendo la celda de medición del conductímetro en las muestras de estudio, se selecciona el parámetro de medición con tecla <MODE> y se espera un tiempo a que el valor de medida sea estable.

4. Se registró la conductividad eléctrica de cada muestra y la temperatura a la que se realiza dicha medición. Esto se debe a que la temperatura es un parámetro que afecta la medición de la conductividad eléctrica, un aumento en esta produce un aumento en la lectura de CE.
5. La celda de medición del conductímetro se lava con agua destilada interna y externamente y se seca dejando la misma preparada para la próxima medición debido a la sensibilidad del equipo, para no afectar la medición de las subsecuentes muestras.
6. A causa de que el rango máximo de salinidad que mide el aparato es de 70 g NaCl/l, para medir la salinidad de las muestras que superan este valor se procede a diluirlas con agua destilada hasta la mitad de su concentración.
7. La muestra diluida es sumergida en la celda de medición del conductímetro y luego, el valor de conductividad obtenido se multiplica por un factor de dilución igual a 2 obteniendo de esta forma el valor de la conductividad de la muestra que originalmente tenía el tubo.
8. Los valores obtenidos se registran en la Tabla 5 para obtener la concentración del trazador NaCl a partir de las curvas de calibración presentadas en el anexo D.1, se considera para el cálculo del volumen inyectado la densidad medida en el tubo más cercano dado que la variación de densidad va a ser despreciable.

**Tabla 5**

*Procedimiento de medición de Conductividad Eléctrica.*

Nº TUBO	Peso de tubo vacío (gr)	Peso de tubo lleno (gr)	Conductividad Eléctrica (mS/cm)	Concentración (grNaCl/l)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Volumen inyectado (cm <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )
1							
2							
3							
4							
5							
6							
...							

*Nota.* Datos tomados de los ensayos realizados.

### 3.11.2 DENSÍMETRO DMA 4500

Es un instrumento que permite medir la densidad basado en el conocimiento integral de las características de oscilación de la muestra, detectando errores de llenado y burbujas de gas permitiendo eliminar las desviaciones de medición causadas por tensiones debidas a cambios de temperatura. La muestra se introduce en un tubo de vidrio de borosilicato en forma de U que está excitado a vibrar a una frecuencia característica. La frecuencia característica cambia dependiendo de la densidad de la muestra. A través de una precisa determinación de la frecuencia característica y una conversión matemática, se puede medir la densidad de la muestra [33].

La densidad se calcula a partir del cociente del período de oscilaciones del tubo en U y el oscilador de referencia:

$$\text{Densidad} = KA \cdot Q^2 \cdot f_1 - KB \cdot f_2 \quad \text{Ec. (32)}$$

KA, KB: constantes del aparato.

Q: Cociente del período de oscilación del tubo en U dividido por el período de oscilación del oscilador de referencia.

$f_1, f_2$ : son términos de corrección para temperatura, viscosidad y no linealidad.

**Fig. 41**

*Densímetro DMA 4500.*



*Nota.* Tomado de *Manual DMA 4100 M* (p.19), por Anton Paar, 2012, Anton Paar GmbH.

**Fig. 42**

*Pantalla del densímetro.*



Nota. Tomado de *Manual DMA 4100 M* (p.21), por Anton Paar, 2012, Anton Paar GmbH.

### Especificaciones técnicas:

**Tabla 6**

*Especificaciones técnicas de densímetro DMA 4500 M.*

	DMA 4500 M
Rango de medición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad: <math>0 \frac{g}{cm^3}</math> a <math>3 \frac{g}{cm^3}</math></li> <li>• Temperatura: <math>0 \text{ } ^\circ\text{C}</math> a <math>100 \text{ } ^\circ\text{C}</math></li> <li>• Presión: hasta 10 bar (145 psi)</li> </ul>
Precisión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad: <math>0,00005 \frac{g}{cm^3}</math></li> <li>• Temperatura: <math>0,02 \text{ } ^\circ\text{C}/0,04 \text{ } ^\circ\text{F}</math></li> </ul>
Resolución Digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>0,00001 \frac{g}{cm^3}</math></li> </ul>
Tablas y funciones integradas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tablas de Alcohol</li> <li>• Funciones API</li> <li>• Tablas ácido/base</li> <li>• 150 tablas/funciones de usuario libremente programables (tablas, polinomios, fórmulas, funciones lineales y constantes).</li> </ul>
Cantidad mínima de muestra	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aproximadamente 1 ml.</li> </ul>
Tiempo de medición por muestra.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 segundos.</li> </ul>
Dimensiones (LxWxH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 495 mm x 330 mm x 230 mm</li> </ul>

	(19.5 in x 13 in x 9.1 in)
Peso	● 22,5 kg
Industrias	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Bebidas.</li> <li>● Industria Química.</li> <li>● Cosméticos, cuidado personal.</li> <li>● Educación.</li> <li>● Investigación.</li> <li>● Medio Ambiente.</li> <li>● Industria Alimenticia.</li> <li>● Industria Petrolera.</li> <li>● Medicina.</li> <li>● Biotecnología.</li> </ul>

*Nota.* Tomado de *Manual DMA 4100 M*, por Anton Paar, 2012, Anton-Paar.

## PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE DENSIDAD

1. Se conecta la salida del densímetro (Fig. 41:7) a un recipiente por medio de una manguera lo que permite recolectar la solución que se desaloja del equipo.
2. Los tubos seleccionados para el ensayo son medidos en el orden que se obtuvieron del sandpack. La solución del tubo se recolecta por medio de una jeringa, este proceso se realiza de forma lenta procurando no recolectar burbujas de aire dado que afectan la medición de la densidad. En caso de que se presenten burbujas en la solución, la jeringa debe colocarse en forma vertical dando pequeños golpes a la misma de forma que las burbujas migren a la parte superior para poder desalojarlas antes de ingresar al equipo.
3. Se inyecta la solución por la entrada del densímetro (Fig. 41: 6) hasta llenar el tubo de vidrio de forma en U de borosilicato.
4. Se ajusta la temperatura de la muestra a 21°C.
5. Se procede a la medición de densidad de la solución a 21°C.
6. Se desaloja la muestra del equipo inyectando aire por medio de la jeringa o bomba de aire del equipo, en cuyo caso se conecta una manguera entre la salida de bomba (Fig. 41: 8) y la entrada (Fig. 41: 6).
7. Previo a la medición de la siguiente solución se limpia el tubo de vidrio con agua destilada que se desplaza fuera del equipo por medio de la inyección de aire a través de la jeringa o bomba de aire.
8. Los valores obtenidos serán registrados en la Tabla 7 para la obtención de la concentración del trazador NaCl a partir de las curvas de calibración presentes en el anexo D.2.

**Tabla 7**

*Procedimiento de medición de la densidad.*

Nº Tubo	Peso tubo vacío (gr)	Peso tubo lleno (gr)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Concentración (grNaCl/l)	Volumen Inyectado	Volumen Acumulado (cm <sup>3</sup> )
---------	----------------------	----------------------	--------------------------------	--------------------------	-------------------	--------------------------------------

					(cm <sup>3</sup> )	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
....						

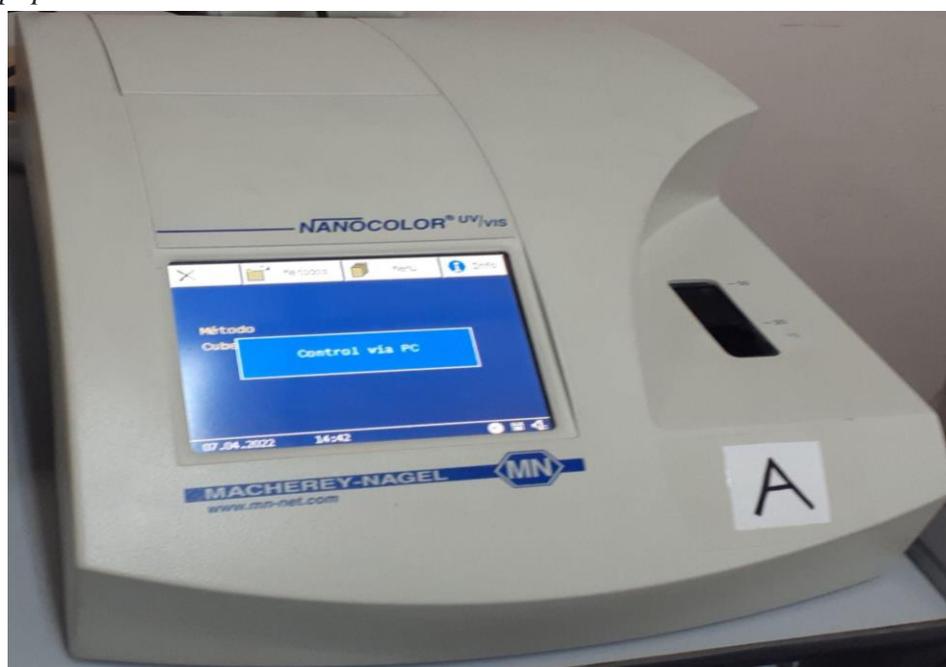
*Nota.* Datos tomados de los ensayos realizados.

### 3.11.3 EQUIPO UV-VIS

El espectrofotómetro UV-VIS es un instrumento que mide la absorbancia en la región UV-VIS mediante la ley de Lambert-Beer. Mide la intensidad de la luz que atraviesa una solución de muestra en una celda y la compara con la intensidad de la luz antes de atravesar la muestra.

**Fig. 43**

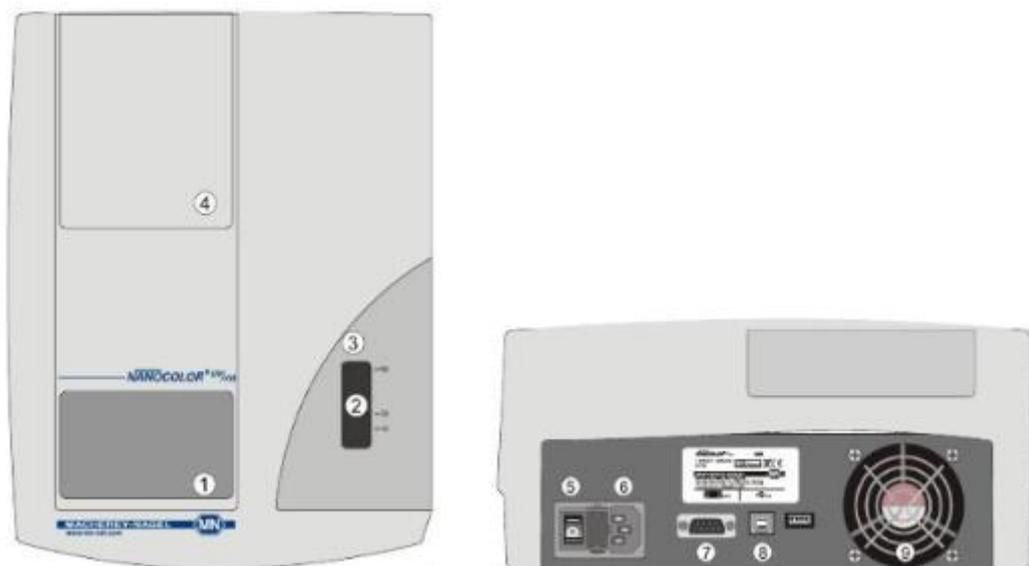
*Equipo UV/VIS.*



*Nota.* Tomado de *Laboratorio de operaciones*, Universidad del Comahue.

**Fig. 44**

*Partes del equipo UV/VIS.*



*Nota.* Tomado de *Manual Nanocolor UV-VIS* (p.5), por Macherey-Nagel, 2015, Manualslib.

1. Pantalla táctil LCD iluminada en color.
2. Portacubetas con reconocimiento automático de cubetas.
3. Lector de código de barras.
4. Compartimento de las lámparas (lámpara de halógeno + lámpara de deuterio)
5. Interruptor principal.
6. Conector para el cable de alimentación eléctrica.
7. Puerto RS 232 para la transferencia de datos o conexión de una impresora.
8. Puertos USB para transferencias de datos y actualizaciones.
9. Ventilador.

### Especificaciones técnicas

**Tabla 8**

*Especificaciones técnicas de equipo UV/VIS.*

Rango de longitudes de onda	● 190 a 1100 nm
Exactitud de la longitud de onda	● $\pm 1$ nm
Resolución de la longitud de onda	● 0,3 nm
Calibración de la longitud de onda	● Automática
Velocidad de barrido	● 900 nm/ 1 barrido completo en menos de un 1 min.
Ancho de banda espectral	● < 4 nm.
Rango fotométrico	● $\pm 3$ A entre las longitudes de onda de

	200 a 900 nm.
Exactitud fotométrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 0,005 A con 0,0-0,5 A:1% con 0,5 a 2,0 A.</li> </ul>
Peso	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 6,5 kg.</li> </ul>

*Nota.* Tomado de *Manual Nanocolor UV-VIS* (p.4), por Macherey-Nagel, 2015, Manualslib.

### **MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL EQUIPO UV/VIS:**

- **Patrón:** permite definir la concentración de la muestra en base a la concentración de una solución patrón y un blanco. Al seleccionar este método, aparece una ventana para introducir la concentración de la solución patrón y la longitud de onda a la que se realizará la medición.
- **Absorbancia:** mide la absorbancia de una muestra contra un blanco. Al seleccionar este método, aparece una ventana para introducir la longitud de onda a la que se realizará la medición.
- **Cinética:** permite medir la cinética de la reacción en una muestra contra un blanco. Al seleccionar este método, aparece una ventana para introducir el tiempo de duración de la medición, el intervalo y la longitud de onda.
- **Transmitancia:** mide la transmitancia en una muestra contra un blanco. Al seleccionar este método, aparece una ventana para introducir la longitud de onda a la que se realizará la medición.
- **Barrido:** El espectrofotómetro ofrece la posibilidad de medir la extinción de una muestra a través del rango de longitudes de onda, de 190–1100 nm (en el NANOCOLOR UV/VIS II) o bien de 320–1100 nm (en el NANOCOLOR VIS II). Dependiendo del rango seleccionado, el aparato usará la lámpara halógena o la lámpara de deuterio para el barrido. La medición se realiza contra un blanco.

### **PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE ABSORBANCIA.**

1. Se coloca el blanco en la celda que contiene el equipo para medir su absorbancia, el mismo corresponde a una solución con la concentración máxima de cloruro de sodio (NaCl) en la que fue disuelto el BOH. Esta absorbancia por medio de un ajuste en el equipo será el cero de medición de las posteriores muestras a fin de no afectar las mediciones de concentración del trazador BOH.
2. Se lava la celda con agua destilada y se procede a colocar la muestra seleccionada del ensayo en dicha celda. La muestra absorberá las radiaciones dentro del espectro UV-VIS y las moléculas adquieren un estado de energía mayor al fundamental lo que será captado por el detector de luz y posteriormente procesado por un registrador dentro del equipo permitiendo obtener el espectro de absorción que es la representación de los fotones absorbidos de la muestra para distintas longitudes de onda, donde la absorbancia máxima no debe exceder el rango de medida del espectrómetro; en caso de que la

muestra exceda la absorbancia máxima permitida debe disolverse y volver a tomarse la medición de la absorbancia para distintas longitudes de onda.

A partir del espectro de absorción para una longitud de onda característica de  $\lambda = 206 \text{ nm}$ , se registra 4 valores de absorbancia correspondiente y lo promediamos para obtener un valor aproximado.

3. Se repite el paso 2, para las muestras posteriores
4. Los valores obtenidos son registrados en la Tabla 9 para la obtención de la concentración del trazador BOH a partir de las curvas de calibración presentes en el anexo D.3.

**Tabla 9**

*Procedimiento de medición del BOH.*

Nº Tubo	Peso de tubo vacío (g)	Peso de tubo lleno (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen Inyectado (cm <sup>3</sup> )	Volumen Acumulado (cm <sup>3</sup> )	BOH	Concentración (ppm)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
...							

*Nota.* Datos tomados de los ensayos realizados.

### 3.12 CURVAS DE CALIBRACIÓN

Es la representación gráfica que relaciona una propiedad medida de un instrumental en función de concentraciones conocidas de la sustancia que se está midiendo. Establece la precisión y exactitud (coeficiente de determinación  $R^2$ ) de los datos obtenidos en el intervalo de trabajo [36].

Las curvas de calibración fueron realizadas a soluciones de baja salinidad (5 a 20 g NaCl/l), media salinidad (40 a 60 g NaCl/l) y alta salinidad (80 a 110 g NaCl/l). Para ello se tomó en cada rango de salinidad una variación del 0,2 a 10% debido a que este rango de concentración es en el que se analizará la detección del trazador salino.

**Tabla 10**

*Variación en el rango de concentración para analizar la detección del trazador salino.*

	gr NaCl/Lt H2O				
%	5	10	20	40	50,000
0,2	5,01	10,02	20,04	40,08	50,100
0,5	5,03	10,05	20,1	40,2	50,250
1	5,05	10,1	20,2	40,4	50,500
1,25	5,06	10,125	20,25	40,5	50,625
1,5	5,08	10,15	20,3	40,6	50,750
2	5,10	10,2	20,4	40,8	51,000
5	5,25	10,5	21	42	52,500
10	5,50	11	22	44	55,000
	gr NaCl/Lt H2O				
%	60 g/lit	80	90	100	110
0,2	60,12	80,16	90,18	100,2	110,22
0,5	60,3	80,4	90,45	100,5	110,55
1	60,6	80,8	90,9	101	111,1
1,25	60,75	81	91,125	101,25	111,375
1,5	60,9	81,2	91,35	101,5	111,65
2	61,2	81,6	91,8	102	112,2
5	63	84	94,5	105	115,5
10	66	88	99	110	121

*Nota.* Datos tomados de los ensayos realizados.

Estas muestras fueron preparadas a partir de un proceso de disolución a soluciones de 60g NaCl/l y 120g NaCl/l es decir, adicionando agua destilada por medio de la siguiente relación:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad \text{Ec. (33)}$$

$$V_2 = \left( \frac{C_1 \cdot V_1}{C_2} \right) \quad \text{Ec. (34)}$$

Siendo

V=volumen.

C=concentración de NaCl

Siendo por lo tanto el volumen de agua destilada a adicionar:

$$\text{Volumen de agua destilada a agregar} = V_2 - V_1 \quad \text{Ec. (35)}$$

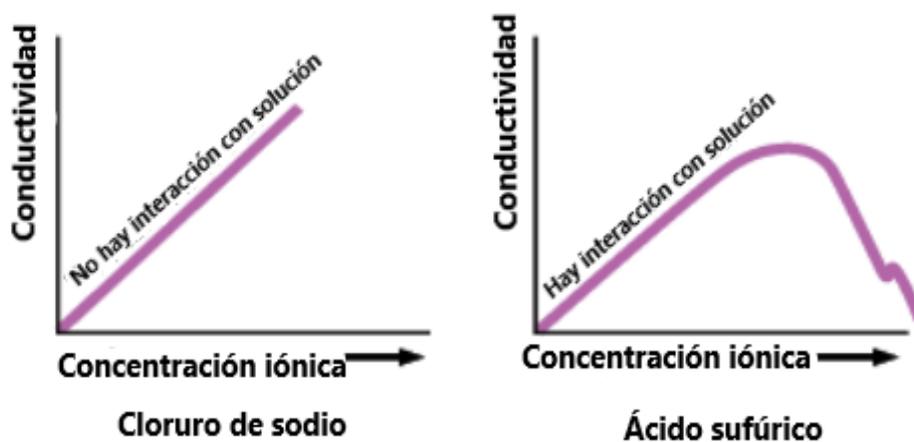
### 3.13 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y RANGO DE OPERACIÓN.

- Curvas de calibración: Conductividad eléctrica vs concentración de sal.

Debido a que la carga de iones en una solución facilita la conductancia de la corriente eléctrica, la conductividad de una solución es proporcional a su concentración de iones. Sin embargo, como se ve en la Fig. 45, esto no se cumple siempre, hay soluciones muy concentradas en donde las interacciones iónicas pueden alterar la relación lineal entre la conductividad y la concentración (por ejemplo: ácido sulfúrico).

**Fig. 45**

*Gráficos de comparación entre el cloruro de sodio y el ácido sulfúrico.*



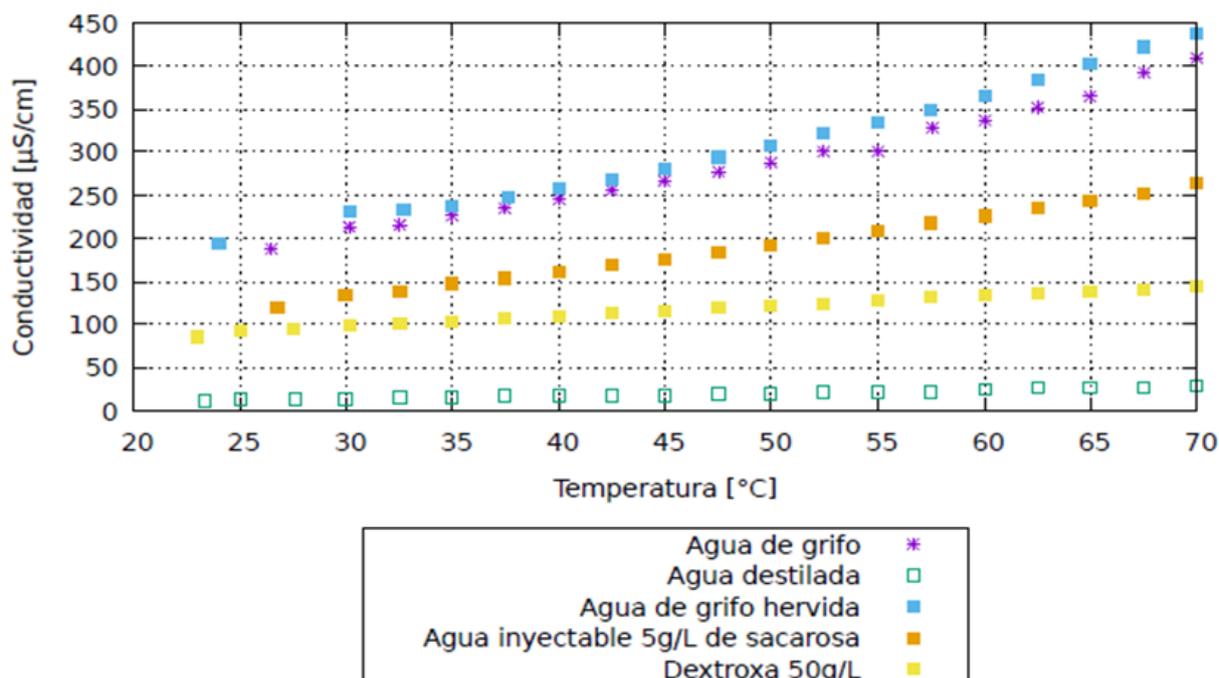
Nota. Tomado de *Teoría de Conductividad y consejos técnicos*, por Cole-Parmer an antylia scientific Company, 2020, Coleparmer.

La variación de las temperaturas en las disoluciones eléctricas afecta la conductividad, donde al aumentar la temperatura la excitación térmica es decir el aumento de la movilidad de los iones en disolución aumenta la conductividad eléctrica (Fig. 46).

El rango de operación de nuestro ensayo fue a temperatura ambiente (20°C a 25°C) y a presión atmosférica, por lo que se considera que la conductividad no fue afectada por la temperatura.

**Fig. 46**

*Efecto de la temperatura sobre la conductividad eléctrica de varias sustancias.*



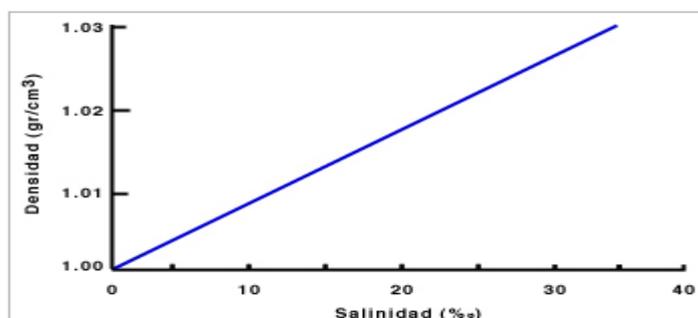
Nota. Tomado de *Medida de la conductividad eléctrica en disoluciones acuosas como función de la temperatura usando Arduino*, por M. Rivas, C. Ramírez, L. Dueñas, S. Pineda, 2018.

- Curva de calibración: Densidad vs. Concentración de sal:

Tal como puede verse en el siguiente gráfico, el aumento de la concentración de sal aumenta la masa del agua en la que se disolvió sin aumentar su volumen generando un aumento de la densidad [39].

**Fig. 47**

*Efecto del aumento de la salinidad en la densidad una solución.*



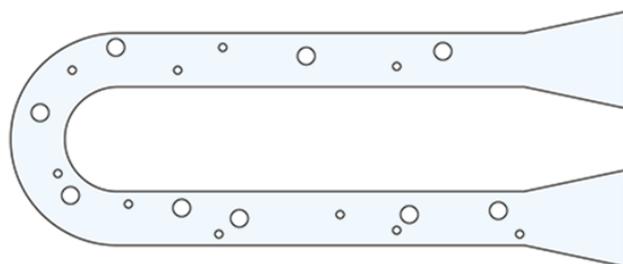
*Nota.* Tomado de *Densidad del agua*, por Experimentos científicos: extendiendo el mundo a través de pequeños experimentos y ciencia, Experimentos científicos.

- Efecto de burbujas de aire e impurezas en la medición de la densidad:

La presencia de burbujas de aire e impurezas en la solución afecta el valor de la densidad debido a que modifican la masa de la solución a medir.

**Fig. 48**

*Burbujas de aire e impurezas en el tubo en U del densímetro.*



*Nota.* Tomado de *Medición de la densidad: Todo lo que es preciso saber sobre la medición de la densidad*, por Mettler Toledo, Mt.

- Efecto de la temperatura en la medición de densidad:

La temperatura influye en el espacio que ocupan los átomos en una molécula. La vibración aumenta con una temperatura más alta, lo que separa más los átomos y, por lo tanto, reduce el valor de densidad. Por tanto, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será el volumen y menor la densidad [41].

- Efecto de la presión en la medición de la densidad:

La densidad aumenta cuando la presión aumenta debido a que las distancias entre las moléculas de la sustancia disminuyen [42].

Los líquidos tienen un valor de compresibilidad de alrededor de  $10^{-6}$  bar<sup>-1</sup> por lo que el efecto de la presión sobre la medición de densidad es despreciable en nuestro ensayo ya que fue realizado a presión atmosférica y 21°C de temperatura. [43].

En nuestro ensayo, debido a que la densidad no es directamente proporcional a la concentración de sales en la solución; para medir la densidad de soluciones cuya concentración fuera superior a 70 g NaCl/l, se utilizó la herramienta Water Density Calculator que determina el valor de densidad de diferentes soluciones en función de la temperatura.

- Absorbancia vs concentración:

Si se grafica la absorbancia contra concentración, Fig. 49, se obtiene una línea recta que pasa a través del origen (0,0). La ley no se cumple a concentraciones altas. Esta desviación de la ley se denomina negativa, cuando la parte curva es ascendente se la denomina positiva.

**Fig. 49**

*Desviación negativa de la ley de Lambert y Beer.*

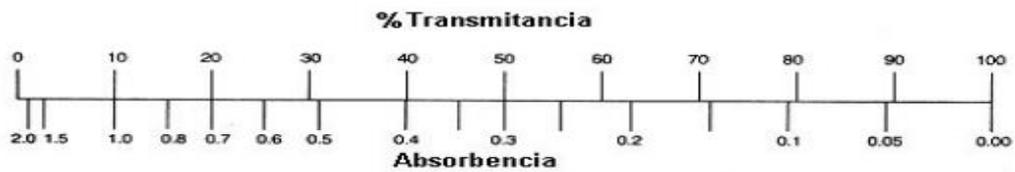


*Nota.* Tomado de *Recorrido: Espectrofotometría*, por Campus virtual: Facultad de farmacia y bioquímica, Campus.

Dado que la relación lineal entre concentración y absorbancia es sencilla y se mantiene, a bajas concentraciones se expresa la ley de Lambert-Beer usando absorbancia como una medida de la absorción preferentemente a %T. La relación entre absorbancia y transmitancia se ilustra en la siguiente Figura:

**Fig. 50**

*Porcentaje de transmitancia en comparación con la Absorbancia.*



*Nota.* Tomado de *Taller básico de Espectroscopía UV-VIS* (p.6), por Amézquita López. F y Mendoza Olivares. D, 2008, Universidad de Guanajuato.

Si toda la luz pasa a través de una solución sin absorción, entonces la absorbancia es cero, y el por ciento de transmitancia es 100%. Si toda la luz es absorbida, entonces el porcentaje de transmitancia es cero, y la absorción es infinita.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados sobre muestras de sandpack, mediante la aplicación de trazador salino con varios rangos de salinidad (baja, media y alta) para medir el volumen poral.

### 4.1 ENSAYO EN RANGO DE BAJA SALINIDAD.

La siguiente Tabla muestra los datos recolectados en el laboratorio de volumen acumulado de solución y concentración normalizada de g NaCl/l medida por medio de conductímetro, densímetro y concentración normalizada de alcohol bencílico medido en UV/VIS.

**Tabla 11**

*Datos de curva completa de 18,9 a 19,9 g NaCl/l.*

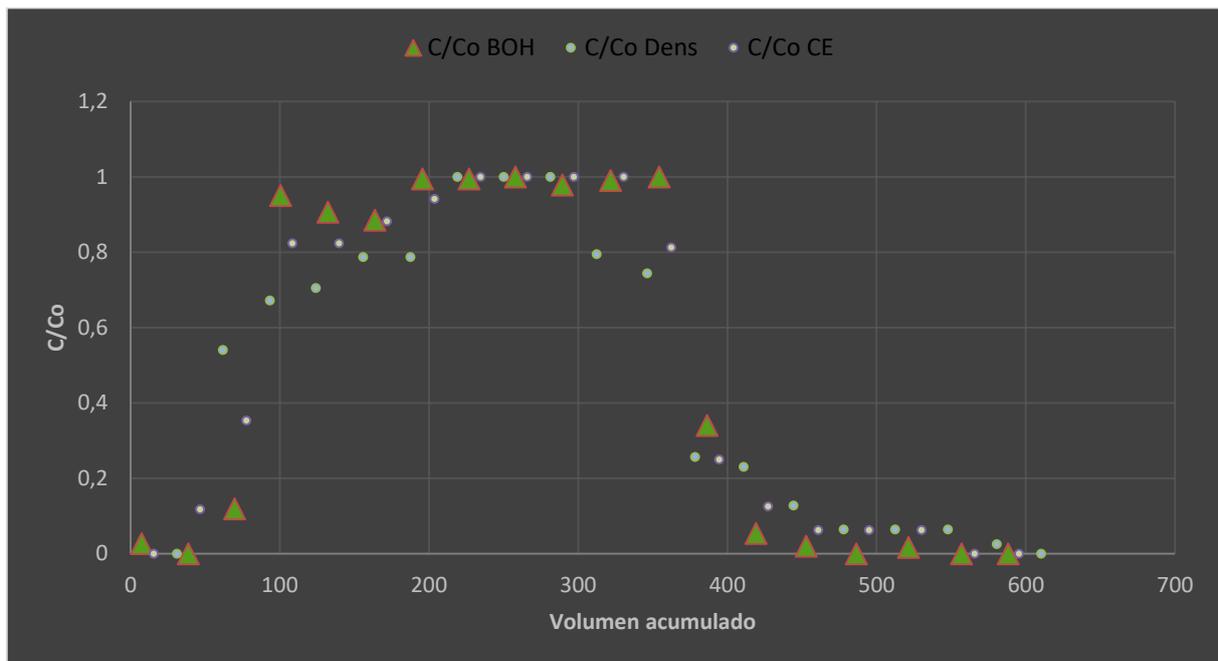
Curva Completa 18,9 a 19,9 g NaCl/l					
C/Co Densidad	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )	C/Co CE	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )	C/Co BOH	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )
0,000	31,0	0,000	15,4	0,0273	7,3
0,541	61,9	0,118	46,5	0,0000	38,5
0,672	93,3	0,353	77,5	0,1193	69,6
0,705	124,2	0,824	108,3	0,9505	100,3
0,787	155,7	0,824	139,8	0,9068	132,0
0,787	187,5	0,882	171,8	0,8853	163,6
1,000	219,1	0,941	203,6	0,9944	195,5
1,000	250,0	1,000	234,4	0,9944	226,7
1,000	281,3	1,000	265,7	1,0000	257,8
0,795	312,3	1,000	297,0	0,9784	289,2
0,744	346,2	1,000	330,5	0,9902	321,6
0,256	378,4	0,813	362,3	1,0000	354,2
0,231	410,9	0,250	394,5	0,3409	386,4
0,128	444,2	0,125	427,3	0,0539	419,1
0,064	477,9	0,062	460,9	0,0200	452,7
0,064	512,3	0,062	494,9	0,0000	486,2
0,064	547,8	0,062	530,0	0,0173	521,2
0,026	580,5	0,000	565,7	0,0000	556,7
0,000	610,4	0,000	595,4	0,0000	588,0

*Nota.* Datos obtenidos de los ensayos realizados.

La Fig. 51 muestra la Curva de distribución de trazador NaCl obtenida para una concentración entre 18,9 a 19,9 g NaCl/l y BOH de 52,5 ppm diluido en 19,9 g NaCl/l.

**Fig. 51**

*Curva de distribución del trazador NaCl.*



*Nota.* Datos de los ensayos realizados.

Las Tablas 12 y 13 muestran los volúmenes porales obtenidos y el Error Relativo en el cálculo a partir de la medición de las propiedades de Conductividad Eléctrica, Densidad y BOH:

**Tabla 12**

*Volúmenes porales obtenidos.*

Volumen poral (cm <sup>3</sup> )					
Conductividad Eléctrica		Densidad		BOH	
Subida	Bajada	Subida	Bajada	Subida	Bajada
90,8	89,9	89,4	89,2	83,2	90,5

*Nota.* Datos de los ensayos realizados.

**Tabla 13**

*Error relativo en el cálculo.*

Error Relativo					
Conductividad Eléctrica		Densidad		BOH	
Subida	Bajada	Subida	Bajada	Subida	Bajada
2,08	3,02	3,6	3,82	10,31	2,42

*Nota.* Datos de los ensayos realizados.

Puede concluirse de las tablas 12 y 13 que el volumen poral obtenido a partir de las propiedades de conductividad eléctrica y densidad se obtienen de manera positiva, a su vez puede observarse que los resultados obtenidos a través de la subida como bajada de la curva de distribución no tienen diferencias significativas lo que permite determinar la coherencia de los resultados del ensayo de baja salinidad, lo cual también es comprobado por el comportamiento del trazador de BOH.

Esto permite determinar que la caracterización del sandpack podría realizarse con un trazador cuya variación de salinidad con respecto a la muestra con la que se satura sea de al menos un 5,29% en un ensayo de bajas concentraciones de cloruro de sodio en las condiciones de estudio empleadas en este trabajo.

#### 4.2 ENSAYO EN RANGO DE MEDIA SALINIDAD

Las siguientes Tablas y Gráficos muestran los resultados obtenidos para soluciones de media salinidad.

**Tabla 14**

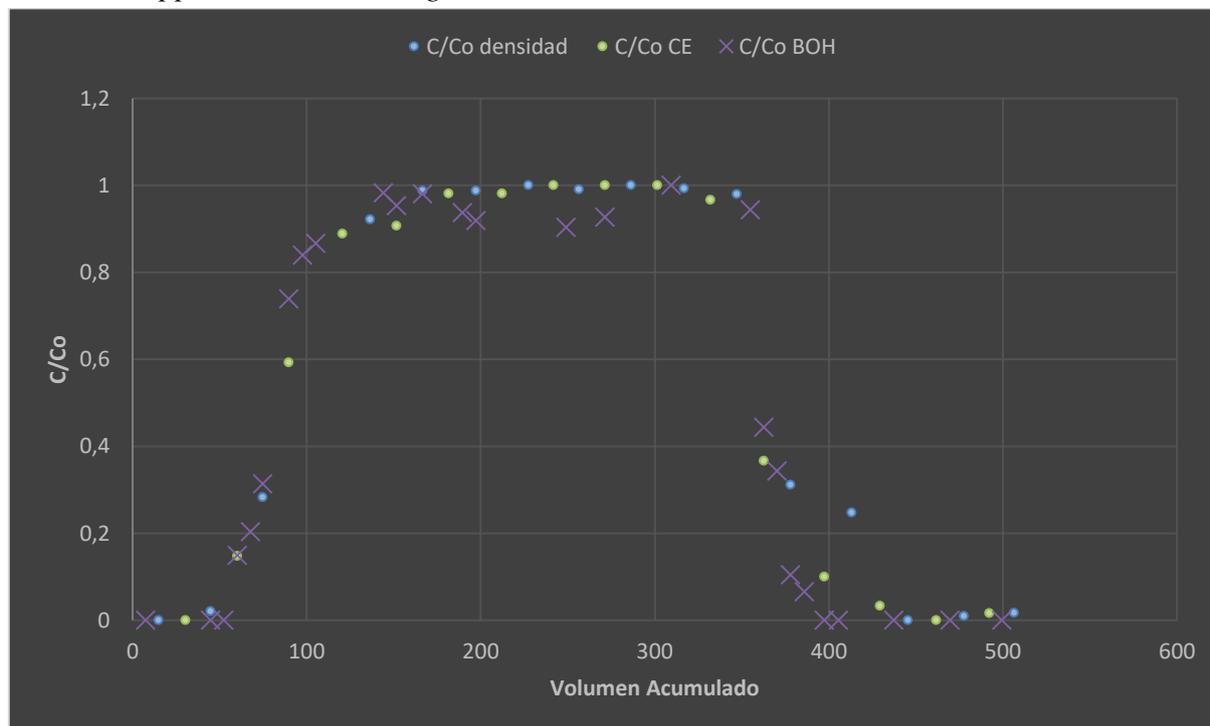
*Datos recolectados en el laboratorio de volumen acumulado de solución y concentración normalizada de g NaCl/l medida por medio de conductímetro, densímetro y concentración normalizada de alcohol bencílico medido en UV/VIS.*

Curva completa 48,8 a 53,7 g NaCl/l					
C/Co DENSIDAD	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )	C/Co CE	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )	C/Co BOH	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )
0,000	14,8	0,000	30,2	0,000	7,4
0,021	44,6	0,148	60,0	0,000	44,6
0,283	74,7	0,593	89,7	0,000	52,3
0,922	136,3	0,889	120,4	0,149	60,0
0,988	166,5	0,907	151,6	0,203	67,7
0,988	197,2	0,981	181,5	0,314	74,7
1,000	227,2	0,981	212,1	0,739	89,7
0,991	256,3	1,000	241,7	0,840	97,5
1,000	286,2	1,000	271,2	0,867	105,1
0,993	316,7	1,000	301,4	0,982	143,8
0,980	347,0	0,967	331,8	0,953	151,6
0,312	377,8	0,367	362,5	0,980	166,5
0,247	412,9	0,100	397,3	0,937	189,4
0,000	445,3	0,033	429,3	0,919	197,2
0,010	477,5	0,000	461,6	0,903	248,8
0,017	506,4	0,017	492,1	0,927	271,2
				1,000	309,2
				0,944	354,8
				0,444	362,5
				0,343	370,1
				0,105	377,8
				0,066	385,7
				0,000	397,3
				0,000	405,3
				0,000	437,2
				0,000	469,5
				0,000	499,4

Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 52**

Curva de distribución de trazador NaCl para una concentración entre 48,8 a 53,7 g NaCl/l y BOH de 25 ppm diluido en 53,7 g NaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Tabla 15**

Volúmenes porales obtenidos a partir de propiedades de Conductividad Eléctrica, Densidad y BOH.

Volumen poral (cm <sup>3</sup> )					
Conductividad Eléctrica		Densidad		BOH	
Subida	Bajada	Subida	Bajada	Subida	Bajada
85,9	91,3	89,8	90,3	68,3	88,5

Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Tabla 16**

Error Relativo en el cálculo de volumen poral obtenidos a partir de propiedades de Conductividad Eléctrica, Densidad y BOH.

Error Relativo					
Conductividad Eléctrica		Densidad		BOH	
Subida	Bajada	Subida	Bajada	Subida	Bajada
7,4	1,5	3,2	2,6	26,3	4,6

Nota. Datos de los ensayos realizados.

En el ensayo donde se utilizó una salinidad intermedia (48,8 a 53,7 g NaCl/l), la variación de salinidad con respecto a la muestra con la que se satura es de un 10,04%.

Puede observarse que la medición del volumen poral a partir de las propiedades de estudio y con el modelo matemático empleado dieron resultados similares tanto a partir del ascenso como en el descenso de la curva de distribución del trazador (Tabla 15) permitiendo caracterizar el sandpack de manera satisfactoria. Lo que implica que en ensayos de salinidad media, el medio poroso puede caracterizarse con un trazador donde la variación de salinidad del fluido desplazante y desplazado sea de al menos un 10,04%, siendo las muestras tomadas en condiciones de temperatura similares, dado que el aumento de temperatura aumenta la conductividad de los líquidos y producen una expansión del volumen de la muestra que disminuye la densidad, tomando en consideración que las curvas de calibración fueron realizadas a temperatura constante.

En este ensayo la primera experiencia de medición de la absorbancia se realizó con una muestra madre incorrecta debido a que no se pudo obtener el espectro de absorción, por este motivo se procedió a diluir las muestras. Sin embargo, posteriormente y al constatar que nos habíamos equivocado de muestra madre se repitieron las mediciones con las muestras diluidas a lambda constante (206 nm) lo que nos permitió obtener el volumen poral con un error relativo del 26,38% con el área encerrada en la subida de la curva de distribución y el volumen poral con error relativo del 4,63% en el área bajo la curva de distribución del trazador.

#### 4.3 ENSAYO EN RANGO DE ALTA SALINIDAD.

Tal como para las soluciones de baja y mediana salinidad, para las de salinidad mayor (98,4 a 104 gNaCl/l), se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 17**

*Datos recolectados en el laboratorio de volumen acumulado de solución y concentración normalizada de NaCl/l medida por medio de conductímetro, densímetro y concentración normalizada de alcohol bencílico medido en UV/VIS.*

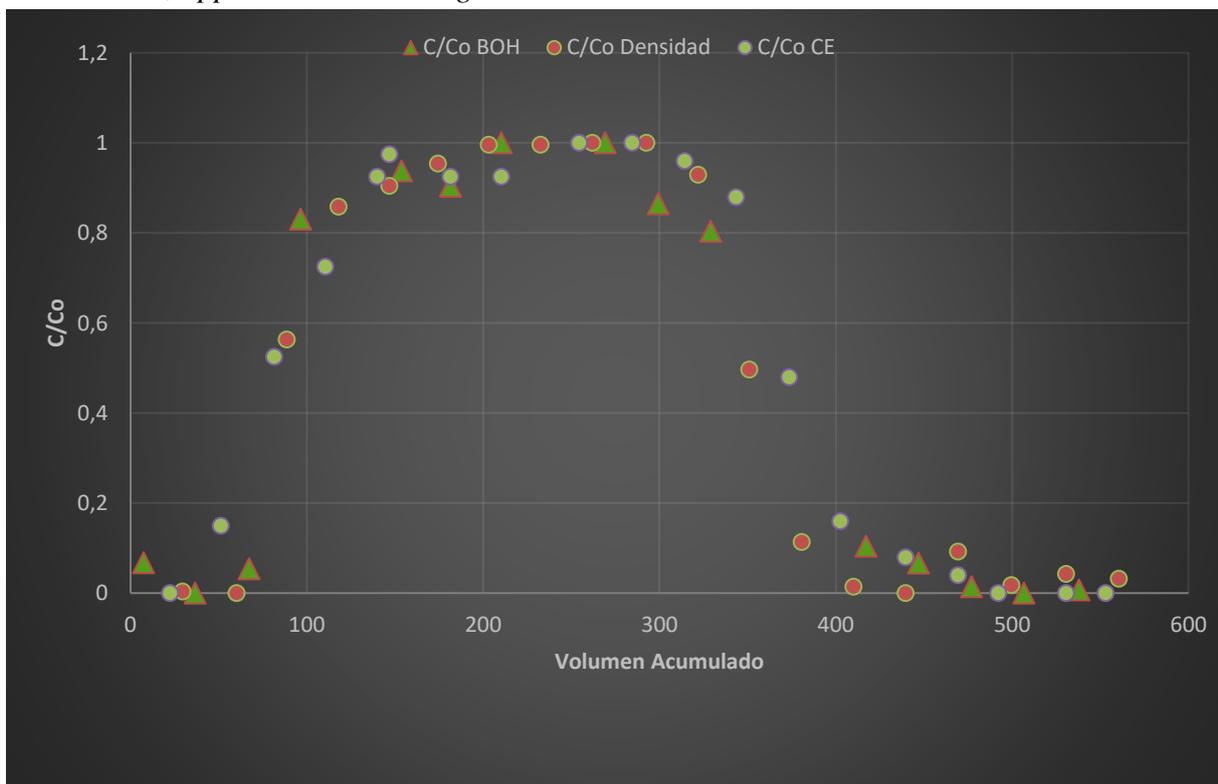
Curva Completa					
C/Co Densidad	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )	C/Co CE	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )	C/Co absorbancia	Volumen acumulado (cm <sup>3</sup> )
		0,000	22,2	0,068	7,3
0,0038	29,3	0,150	51,1	0,000	36,5
0	60,1	0,525	81,3	0,054	67,1
0,563	88,5	0,725	110,4	0,831	96,2
0,858	117,8	0,925	139,7	0,938	153,6
0,904	146,6	0,975	146,6	0,904	181,4
0,954	174,2	0,925	181,4	1,000	210,1
0,996	203,0	0,925	210,1	1,000	269,1
0,996	232,3	1,000	254,3	0,865	299,2
1,000	261,9	1,000	284,5	0,804	329,0

1,000	292,5	0,960	314,2	0,104	417,1
0,929	321,7	0,880	343,4	0,067	446,8
0,496	350,8	0,480	373,4	0,014	477,0
0,113	380,6	0,160	402,4	0,000	506,7
0,014	409,9	0,080	439,5	0,007	537,9
0,000	439,5	0,040	469,3		
0,092	469,3	0,000	492,0		
0,018	499,4	0,000	530,6		
0,043	530,6	0,000	552,9		
0,032	560,4				

Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 53**

Curva de distribución de trazador NaCl para una concentración entre 98,4 a 104 gNaCl/l y BOH de 410,8 ppm diluido en 104 g NaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Tabla 18**

Volúmenes porales obtenidos a partir de propiedades de Conductividad Eléctrica, Densidad y BOH.

Volumen poral (cm <sup>3</sup> )					
Conductividad Eléctrica		Densidad		BOH	
Subida	Bajada	Subida	Bajada	Subida	Bajada
86,6	117,7	90,8	91,3	87,0	90,8

Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Tabla 19**

*Error Relativo en el cálculo de volumen poral obtenidos a partir de propiedades de Conductividad Eléctrica, Densidad y BOH.*

Error Relativo					
Conductividad Eléctrica		Densidad		BOH	
Subida	Bajada	Subida	Bajada	Subida	Bajada
6,6	26,8	2,08	1,5	6,18	2,07

*Nota.* Datos de los ensayos realizados.

En el ensayo de alta salinidad (98,4 a 104 gNaCl/l), la variación de salinidad con respecto a la muestra con la que se satura es de un 5,69%.

Puede observarse que en la medición del volumen poral el valor se sobrestima utilizando la propiedad de conductividad eléctrica esto puede deberse a que el rango de medición del conductímetro es hasta 70 g y a su vez la resolución es de 0,1 g, lo que conlleva una dilución de la medición (constante de dilución de 2) y disminuye la exactitud del resultado con respecto a otro método de medición aplicado.

Este ensayo tuvo que repetirse utilizándose las muestras extras recolectadas dado que los primeros resultados arrojados eran anómalos con comportamiento oscilatorio. La hipótesis a la que llegamos para explicar este comportamiento es que la precisión con la que mediamos el volumen de agua destilada utilizado pipetas graduadas eran ineficiente para distinguir la concentración de NaCl entre las muestras por lo que para mejorar la exactitud de los resultados se agregó el uso de la balanza analítica que posee una resolución de 0,1 mg, para pesar el agua destilada que se debería adicionar a cada muestra a fin de diluirla a la mitad de su concentración original considerando la densidad del agua destilada de  $1\text{ g/cm}^3$ . En cuanto al uso de la densidad como propiedad de medición de la concentración de NaCl de las muestras, el resultado muestra un error relativo despreciable cuya tendencia y resultado se verifica con el uso del trazador patrón.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En los ensayos de baja y media salinidad, la exactitud con la que se mide el volumen poral no se ve significativamente afectado por la propiedad de estudio empleada, sin embargo, el tiempo que se requiere para la medición de las mismas difiere apreciablemente.
- El tiempo de operación del densímetro es superior a la del conductímetro, debido a que cada medición debe ajustarse a la temperatura y procurar que no quede ninguna burbuja de aire en la muestra a medir en la jeringa y en el tubo en U del densímetro, ya que puede afectar notablemente el valor de la densidad medido. Por lo que a fin de optimizar las operaciones de laboratorio se recomienda que, en ensayos de baja y media salinidad, se utilice como parámetro de medición la conductividad eléctrica.
- En los ensayos de alta salinidad se puede observar que la dispersión de las concentraciones entre las muestras es menor que en los otros ensayos dado que el avance del frente del trazador es rápido, lo que requiere un instrumento de medición que permita distinguir entre la concentración de las muestras con una resolución elevada como es el caso del densímetro cuyo error relativo es despreciable. Por lo tanto, en los ensayos de laboratorio de alta salinidad a fin de obtener resultados con un error relativo menor se recomienda que se utilice como parámetro de medición la densidad.
- El valor de volumen poral obtenido por los diferentes métodos de medición aplicados es en general menor al volumen poral de la muestra a excepción del ensayo a alta salinidad medido a partir de la conductividad eléctrica que presenta un alto error relativo. Esto se debe a que el volumen poral contactado por el trazador no es equivalente al 100% del volumen poral de la muestra, la variación es pequeña pero puede ser consecuencia de la distribución de velocidades en las gargantas porales que tendrán una mayor velocidad en las zonas centrales en comparación con las paredes del sandpack, efecto que se ve intensificado por la heterogeneidad (cuanto mayor es la heterogeneidad, mayor es el efecto sobre el flujo del trazador en el medio poroso) y selectividad de los clastos (menor selectividad, mayor heterogeneidad del medio) por lo que el trazador penetra por caminos preferenciales saliendo rápidamente del sandpack. Esto trata de disminuirse inyectando 3 veces el volumen poral a fin de intentar contactar la mayor cantidad de gargantas porales. Además, la posición vertical del sandpack permite que no se pueda ignorar el efecto de la gravedad y que el barrido del trazador sea más uniforme. Debe considerarse a su vez que el cálculo del volumen poral por medio del método numérico trapecio compuesto tiene un error global de orden 2.
- El volumen poral obtenido por medio del trazador patrón de alcohol bencílico evaluado a un  $\lambda$  fijo no presenta un error relativo significativo. La causa que puede explicar que la concentración recuperada sea menor a la inyectada es la dilución de las muestras en el ensayo de media salinidad, dado que al estar muy concentrada las muestras, el equipo UV-VIS no fue capaz de leer la absorbancia por lo que se procedió a la dilución de las mismas. La concentración del trazador debe ser baja (solución diluida) para que la absorbancia de la muestra entre dentro del rango de medición.

## ANEXOS.

### ANEXO A: PROCEDIMIENTO DE ARMADO DEL SANDPACK.

1. Tamizar las arenas con mallas separando los granos, esto debe realizarse de manera escalonada. Lo que permite clasificar las arenas por tamaños. [\[50\]](#)

**Fig. 54**

*Tamices empleados para la separación de las arenas.*



*Nota.* Tomado de Laboratorio de petrofísica, Universidad del Comahue.

**Fig. 55**

*Separación de arenas con distintos tamices.*



*Nota.* Tomado de Laboratorio de petrofísica, Universidad del Comahue.

2. Se seleccionan los porcentajes de las arenas tamizadas que van a componer el sandpack. [\[50\]](#)
3. Se pesa el material y si fuera a utilizarse más de una granulometría, esta debe mezclarse en un recipiente. [\[50\]](#)
4. Se arma la celda compuesta por un tubo de nylon (Fig. 56) de 3,8 cm de diámetro y 26 cm de longitud con dos cabezales, en la parte superior tiene una conexión para la salida de los fluidos, mientras que en la parte inferior tiene 2 conexiones (Fig. 57), una para la entrada del fluido y otra para la presión, y mallas de 50-60 $\mu$ m. [\[50\]](#)

**Fig. 56**

*Tubo de nylon.*



*Nota.* Tomado de Laboratorio de petrofísica, Universidad del Comahue.

**Fig. 57**

*Cabezal con dos conexiones.*



*Nota.* Tomado de Laboratorio de petrofísica, Universidad del Comahue.

5. Se ajusta uno de los cabezales al tubo junto con la malla. Se coloca la arena seleccionada y mezclada, luego se procede a golpear por unos minutos hasta que los granos se compacten. [50]
6. Se pesa el sobrante de arena para registrar la cantidad exacta de arena utilizada en el sandpack. [50]
7. Se coloca el segundo cabezal junto con la malla de 50-60 $\mu\text{m}$ . [50]
8. Se completa el armado, conectando las entradas y salidas del fluido por medio de mangueras de  $\frac{1}{8}$ " de diámetro con la cavidad de entrada y salida. [50]

Nuestro sandpack estaba compuesto por:

30-70 arena.

50-60 malla.

**Fig. 58**

*Sandpack utilizado en los ensayos.*



*Nota.* Tomado de Laboratorio de petrofísica, Universidad del Comahue.

Datos de la muestra:

*Longitud = 21,3 cm*

$$\text{Área} = 11,34 \text{ cm}^2$$

$$\text{Permeabilidad: } K_{abs} = 21,97 \text{ Darcy}$$

$$\text{Porosidad: } \phi = 38,4\%$$

## ANEXO B: DETERMINACIÓN DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA

### ANEXO B.1: Introducción.

El equipamiento para efectuar mediciones de permeabilidad al líquido sobre muestras de rocas limpias, y bajo presión de sobrecarga, opera haciendo pasar agua de formación, doble API (o agua sintética/salmuera), o kerosene a presión regulada a través de una muestra cilíndrica o cúbica (de dimensiones conocidas), la cual se empaqueta en una celda triaxial, el fluido es impulsado por intermedio de un panel regulador de presión en cascada de amplio espectro de presiones (30 mm H<sub>2</sub>O a 350 psig) y un botellón de flujo (Figuras 59 y 60), la cara de salida se encuentra a presión atmosférica y conectada a una ruleta con vasos previamente pesados o un vaso de precipitado colocado sobre una balanza previamente tarado. Se toma el tiempo que tarda en cargarse un vasito. [46]

De este modo se obtiene el caudal y utilizando la fórmula de Darcy (Ec.11) para líquidos incompresibles se calcula la permeabilidad:

$$k_{\text{liquido}} = \frac{(W_{\text{lleno}} - W_{\text{vacío}}) \cdot \mu \cdot L}{\rho \cdot A \cdot \Delta T \cdot \Delta P} \quad \text{Ec. (39)}$$

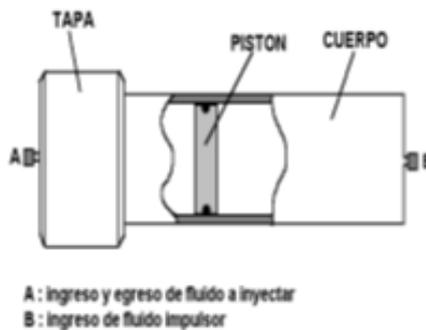
Donde:

$W_{\text{lleno}}$ : peso de vaso lleno (gramos).

$W_{\text{vacío}}$ : peso de vaso vacío (gramos).

**Fig. 59**

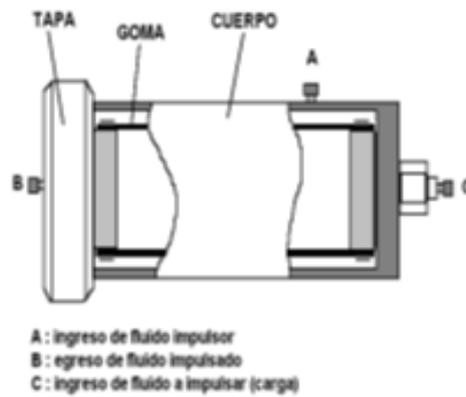
*Botellón con pistón.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, por Abrigo, S., 2021, Universidad Nacional del Comahue.

**Fig. 60**

*Botellón con goma interior.*



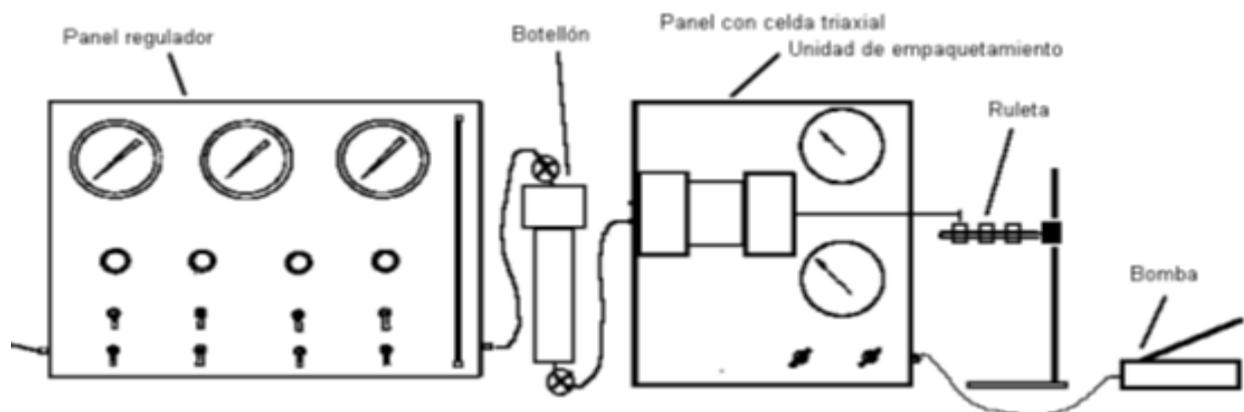
*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, por Abrigo, S., 2021, Universidad Nacional del Comahue.

## **ANEXO B.2: Descripción del equipo utilizado.**

El equipo está integrado por un panel regulador, un panel con celda triaxial y un botellón de flujo (Fig. 61). [\[46\]](#)

**Fig. 61**

*Equipo empleado en el laboratorio.*



*Nota.* Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, por Abrigo, S., 2021, Universidad Nacional del Comahue.

Se disponen de dos tipos de botellones, de diferentes principios de funcionamiento, prestaciones, y capacidades cúbicas. Ambos pretenden evitar el contacto entre el gas impulsor y el fluido desgasificado, para evitar la disolución del gas en el líquido por efectos de la presión. [46]

1) Botellón con pistón (Fig. 59).

- a) Botellón de acero inoxidable, de 1 litro de capacidad, pistón de PVC, para servicio severo de alta presión (3000 psi máx). [46]
- b) Botellón de acrílico transparente (Lucite), para bajas presiones de servicio (máx 50 psi), con muy baja pérdida de carga en el pistón (2 pulg H<sub>2</sub>O). Aplicable a la medición de altas permeabilidades. [46]

2) Botellón con goma interior (Fig. 60), 3 litros de capacidad, servicio de baja presión y severo (3000 psi máx). [46]

### ANEXO B.3: Conexión.

Alimentación de gas nitrógeno 400-3000 psi, para ingresar al panel regulador con presión regulada de hasta 400 psig, por intermedio de una reductora de presión de buena calidad. [46]

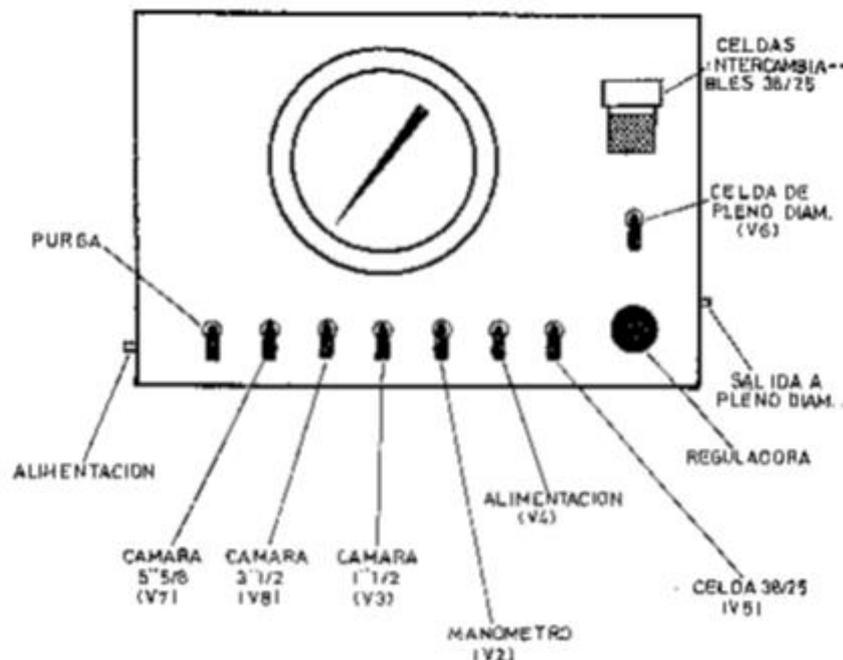
### ANEXO C: DETERMINACIÓN DE POROSIDAD

#### ANEXO C.1: Esquema y descripción del equipo.

El laboratorio CEPCom cuenta con un porosímetro de helio modelo LN-P.B.2.

**Fig. 62**

*Porosímetro modelo LN-P.B.2.*



Nota. Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, por Abrigo, S., 2021, Universidad Nacional del Comahue.

El instrumento opera bajo la ley de Boyle. Este es un método rápido y no destructivo. [46]

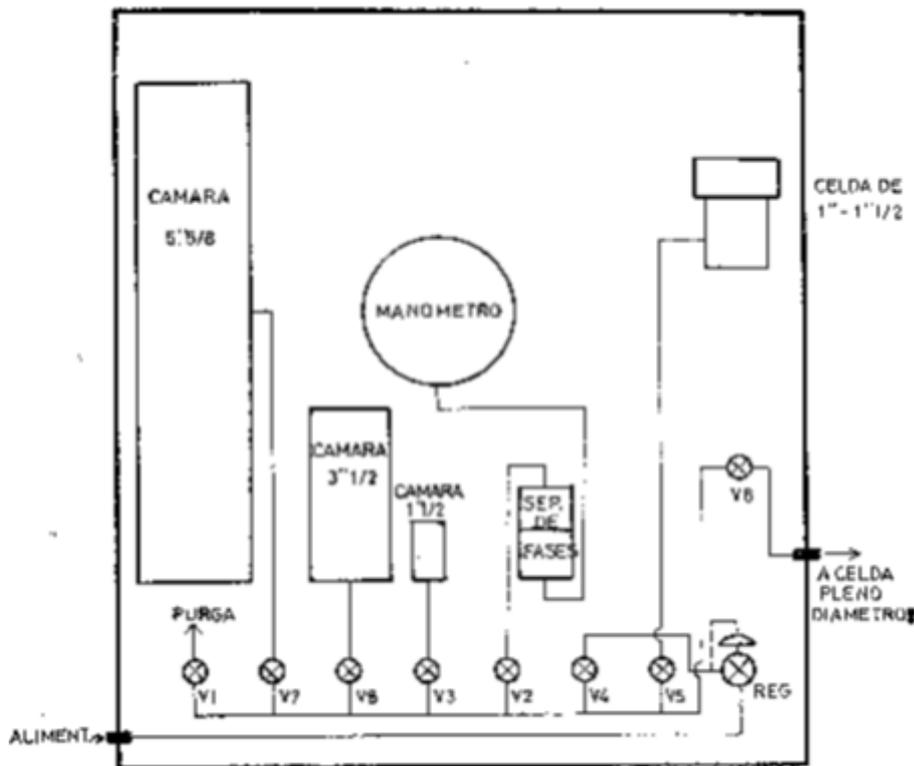
El rango de porosidad que determina es de 0.45% a 45% con un error inferior al 0.5% en el volumen de la roca. Opera con testigos cilíndricos de 1" y de 1 1/2", y de longitudes de hasta 50 mm; también se pueden realizar ensayos con muestras irregulares de dimensiones similares a las citadas y ensayos de pleno diámetro, lo que permite trabajar con todo el material de la corona, no con un testigo lateral extraído del mismo. [46]

### ANEXO C.2: Fundamento.

Un volumen conocido de gas a una presión prefijada ( $P_1=100$  psig) es expandido isotérmicamente conectándose a una celda de medición de volumen conocido, donde se encuentra un testigo con gas a presión atmosférica ( $P_0$ ), cuya porosidad es desconocida. El gas utilizado en estas mediciones es el helio, debido a que es un gas inerte. [46]

**Fig. 63**

*Porosímetro modelo LN-P.B.2.*



Nota. Tomado de *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*, por Abrigo, S., 2021, Universidad Nacional del Comahue.

Se mide la presión estabilizada resultante ( $P_f$ ), y por medio de la correspondiente curva de calibración, se calcula el volumen de la roca. [46] Conocido el volumen aparente del testigo, medido con calibre o por medio del picnómetro, se calcula el valor de porosidad, ya que:

$$Porosidad = \phi = \frac{V_p}{V_{gr} + V_p} \quad \text{Ec. (3)}$$

### ANEXO C.3: Determinación del volumen aparente.

- ❖ Si la muestra es regular, el volumen aparente, se puede medir con un calibre, debiéndose efectuar por lo menos 5 (cinco) determinaciones de diámetro y 5 (cinco) de longitud. Con los valores medios se calcula el volumen aparente. Estas mediciones deberán ser volcadas en la planilla de medición del testigo. [46]
- ❖ Si la muestra es irregular su volumen aparente se puede determinar por picnometría. En este caso en la planilla de medición se deberá anotar los datos del enrase del mercurio: Volumen inicial ( $Vol. i$ ) y volumen final ( $Vol. f$ ) (con el testigo inmerso), la diferencia será el volumen aparente:

$$Vol.aparente = (Vol. i - Vol. f)(cm^3) \quad \text{Ec. (40)}$$

### ANEXO C.4: Cálculo del volumen real, porosidad y densidades.

Para la obtención del volumen de sólido se utiliza la curva de calibración. Dicha curva tiene la forma de una hipérbola:

$$V_s = a_o - \frac{a_1}{\Delta P_f} \quad \text{Ec. (41)}$$

Esta ecuación corresponde a un gas ideal expandido isotérmicamente, suposición que siempre tendremos en cuenta. En dichas condiciones, el número de moles de gas total no varía durante la expansión. [46]

Para el estado inicial:

$$P_1 \cdot V_1 = n_1 \cdot R \cdot T \quad \text{Ec. (42)}$$

$$P_o \cdot (V_o - V_s) = n_o \cdot R \cdot T \quad \text{Ec. (43)}$$

$$P_1 \cdot V_1 + P_o \cdot (V_o - V_s) = (n_1 + n_o) \cdot R \cdot T \quad \text{Ec. (44)}$$

Para el estado final:

$$P_f \cdot [V_1 + (V_o - V_s)] = n_f \cdot R \cdot T \quad \text{Ec. (45)}$$

El número de moles del gas total no varía durante la expansión, es decir que  $n_T = n_1 + n_o$ .

$$P_1 \cdot V_1 + P_o \cdot (V_o - V_s) = P_f \cdot (V_o - V_s) + P_f \cdot V_1 \quad \text{Ec. (46)}$$

$$(V_s - V_o) = \frac{(P_1 - P_o) \cdot V_1}{(P_f - P_o)} \quad \text{Ec. (47)}$$

Siendo:

$V_s$  =volumen del cilindro de calibración.

$V_o$  =volumen de la cámara de medición.

$V_1$  =volumen de la cámara de referencia.

$P_1$  =presión inicial en la cámara de referencia.

$P_o$  =presión inicial en la cámara de medición (presión atmosférica).

$P_f$  =presión final en el sistema interconectado.

En la práctica, para la obtención de la curva de calibración, se opera el equipo de la misma manera que para la medición de porosidad, pero colocando un cilindro de calibración en lugar de una muestra. [46]

Para un cierto valor de  $V_s$  (otro cilindro de calibración distinto al usado en la primera calibración) se obtiene otro valor de  $P_f$ , así se hace para varios valores de  $V_s$  y se grafica:  $V_s$  vs.  $\frac{1}{(P_f - P_o)}$ , obteniéndose así la curva de calibración. [46]

El *volumen poral* resulta de restar el volumen aparente de la muestra, el volumen de sólido extraído de la curva de calibración para el  $\Delta P$  obtenido en el ensayo:

$$V_\phi = V_{aparente} - V_s \quad \text{Ec. (47)}$$

Por lo tanto, la *porosidad* es:

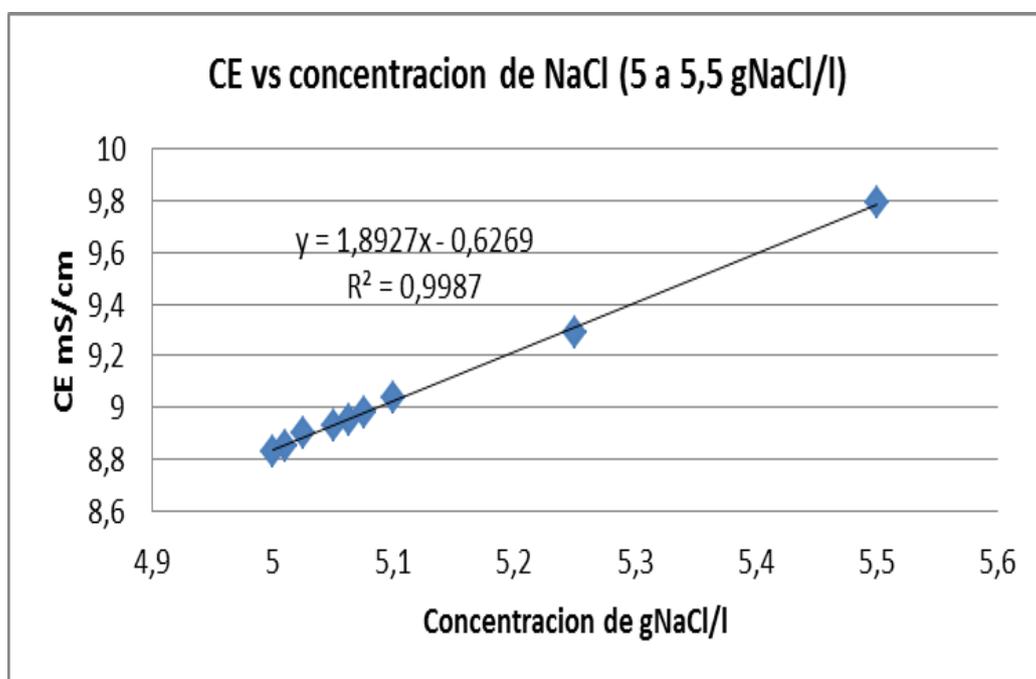
$$\text{Porosidad} = \phi = \frac{V_p}{V_{gr} + V_p} \quad \text{Ec. (3)}$$

## ANEXO D: CURVAS DE CALIBRACIÓN.

### ANEXO D.1: Conductividad eléctrica-Salinidad.

**Fig. 64**

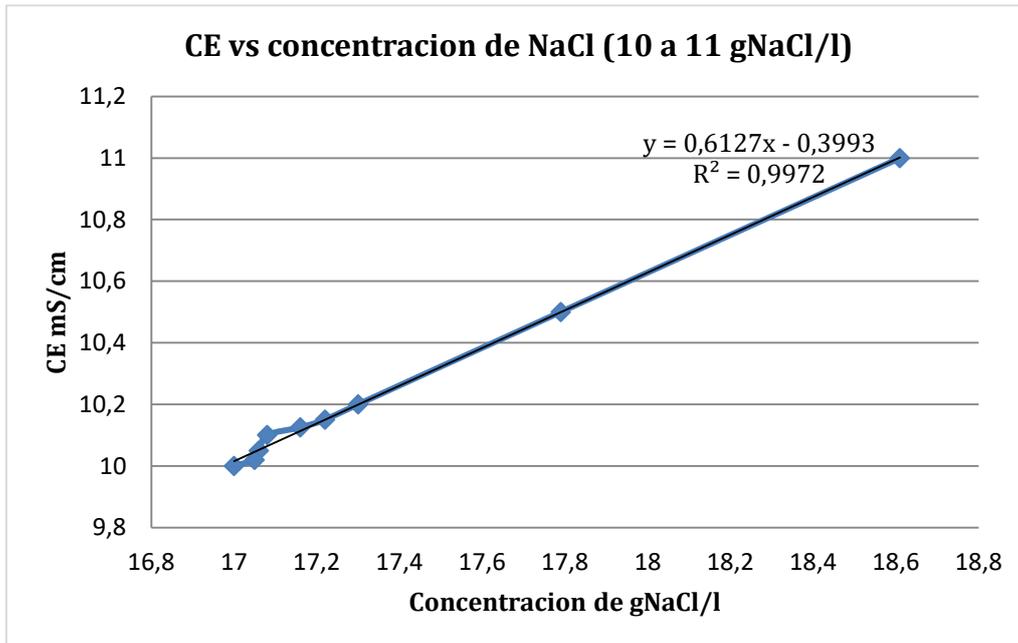
*Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (5-5,5) gNaCl/l.*



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 65**

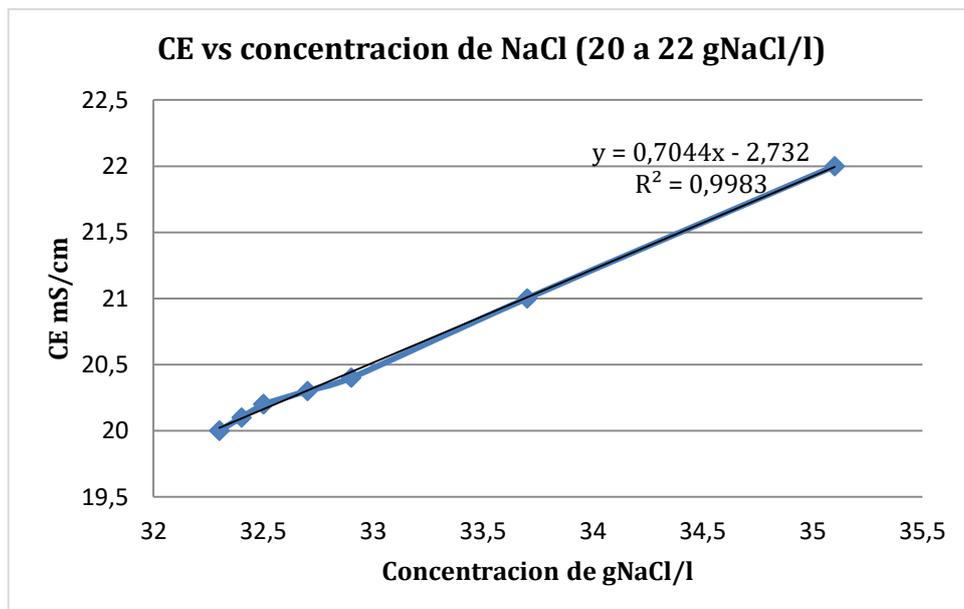
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (10-11) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 66**

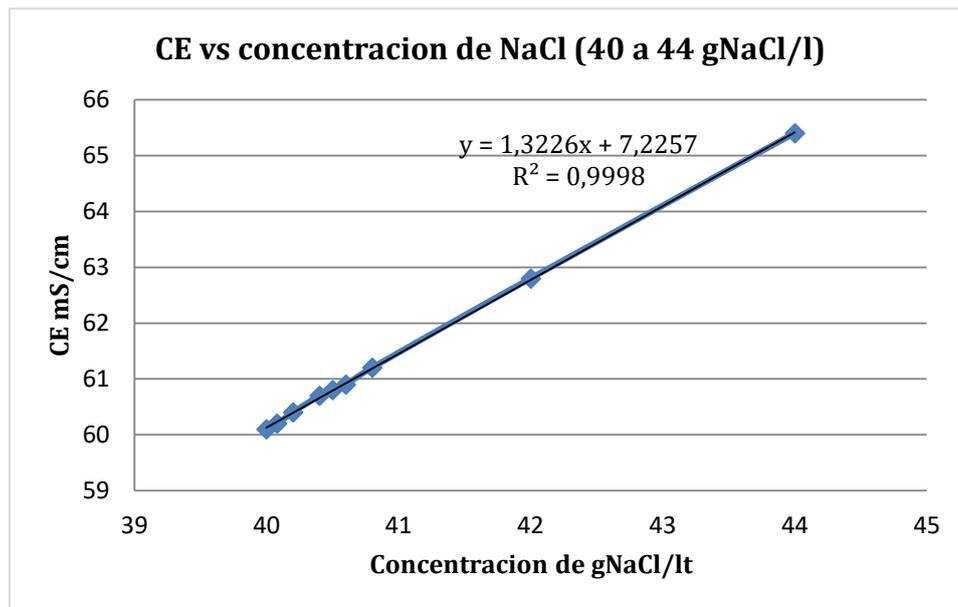
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (20-22) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 67**

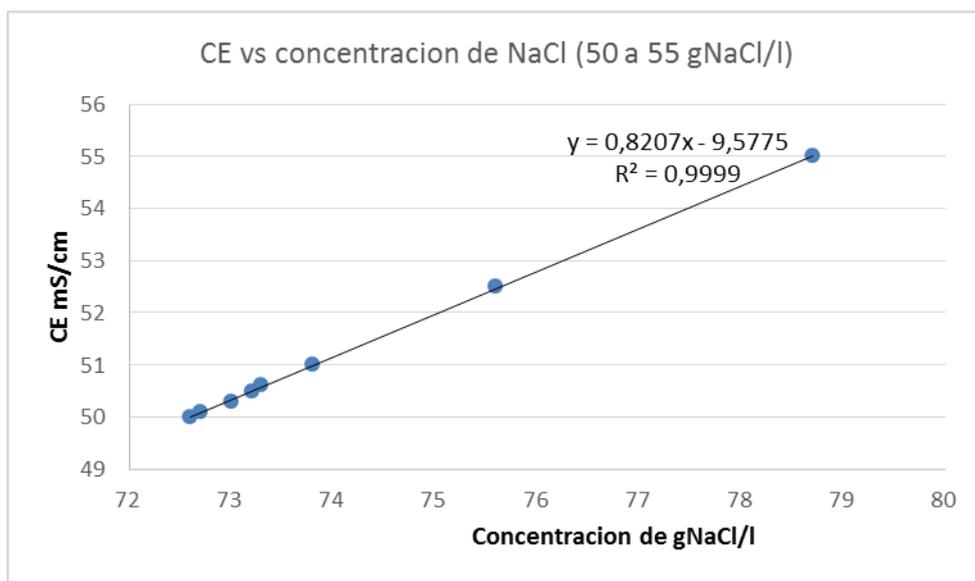
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (40-44) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 68**

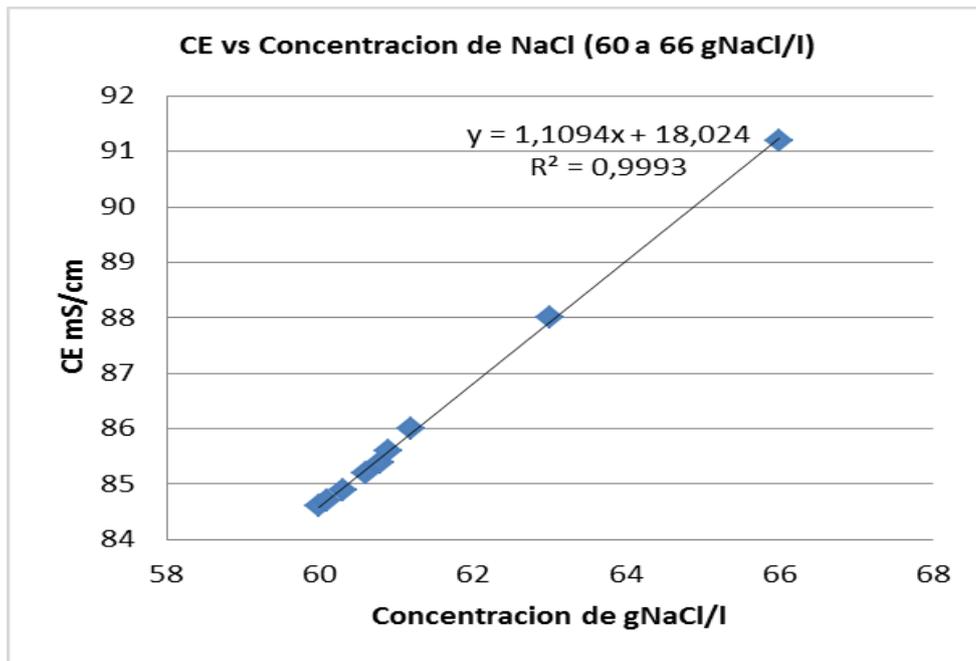
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (50-55) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 69**

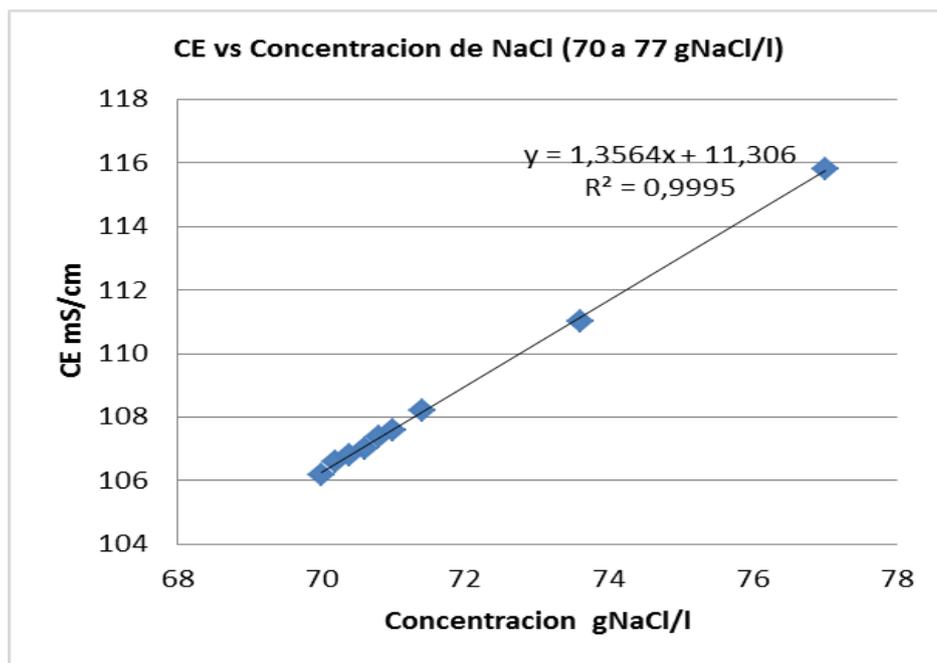
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (60-66) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 70**

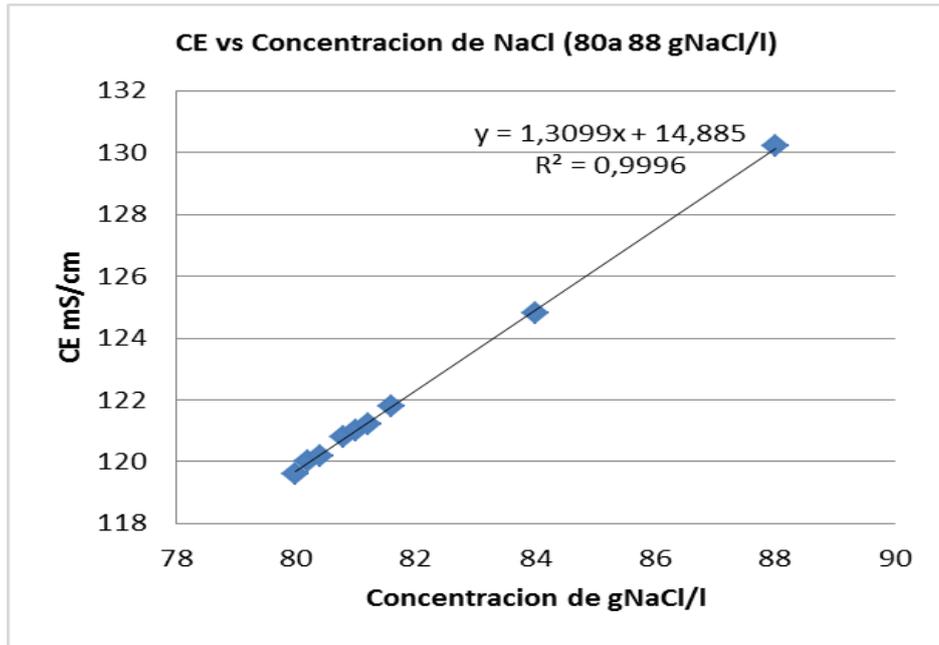
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (70-77) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 71**

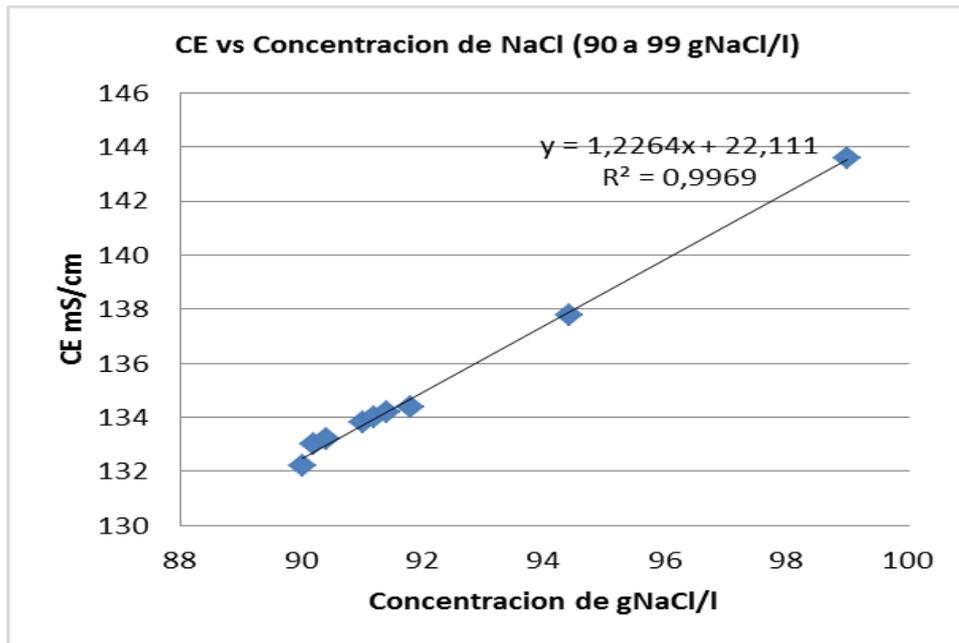
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (80-88) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 72**

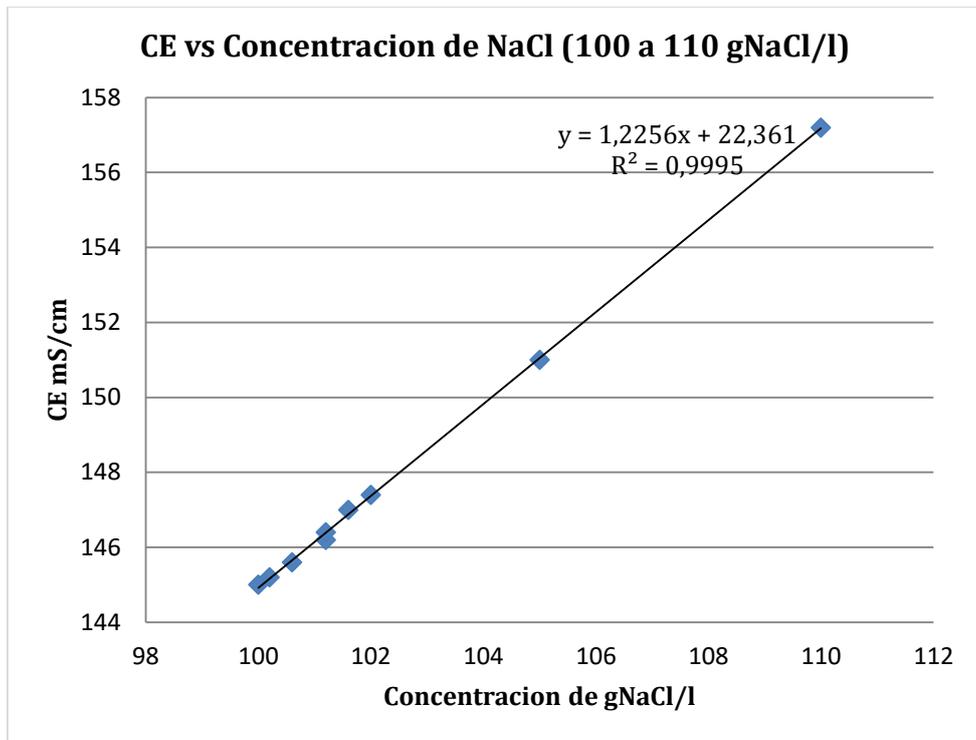
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (90-99) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 73**

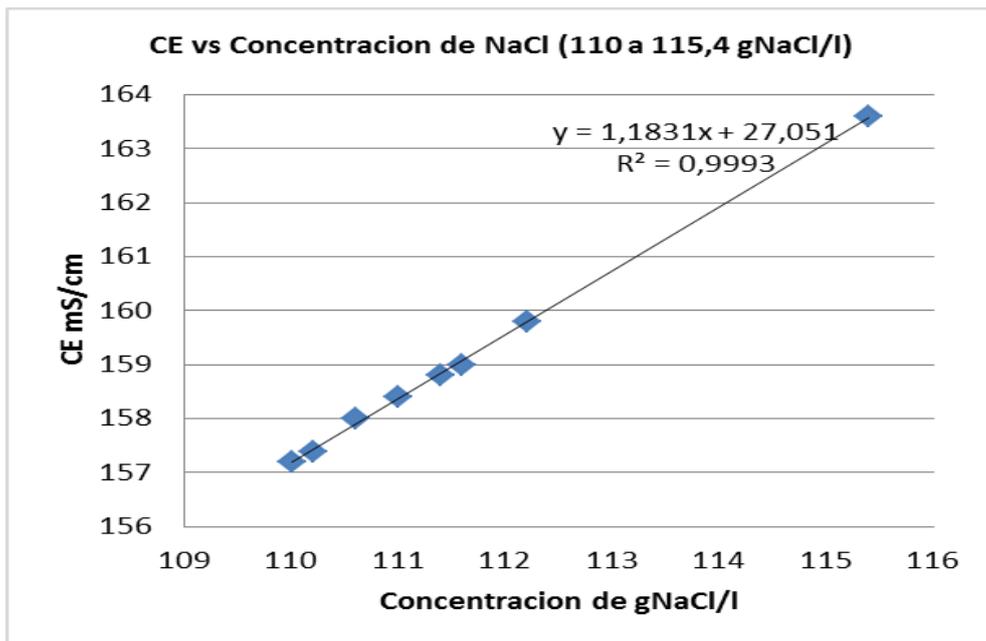
Conductividad eléctrica vs concentración de NaCl (100-110) gNaCl/l.



*Nota.* Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 74**

*Conductividad eléctrica densidad vs concentración de NaCl (110-115,4) gNaCl/l.*

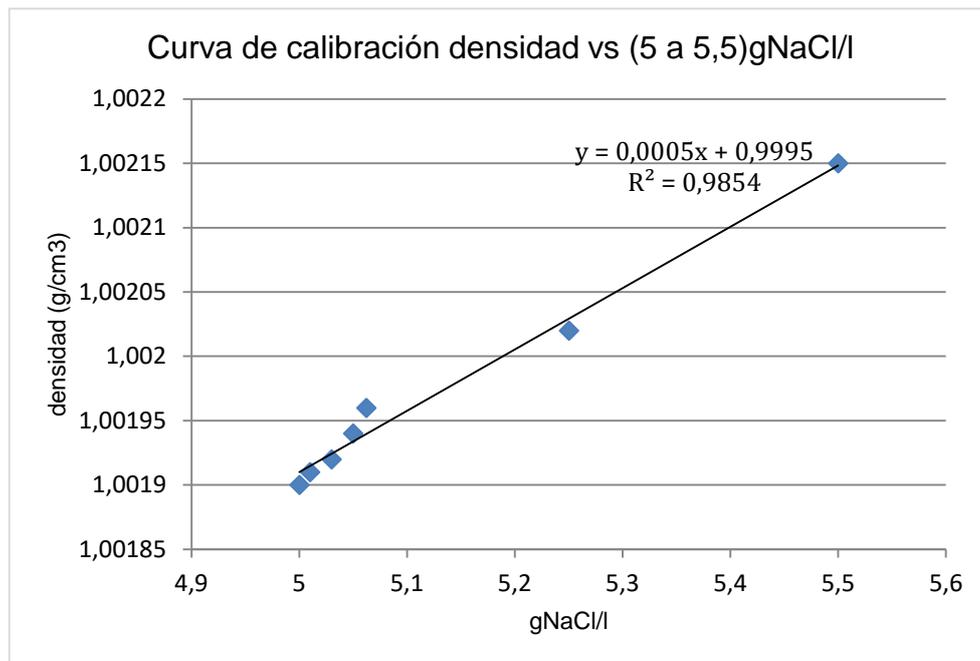


*Nota.* Datos de los ensayos realizados.

**ANEXO D.2: Densidad-Salinidad.**

**Fig. 75**

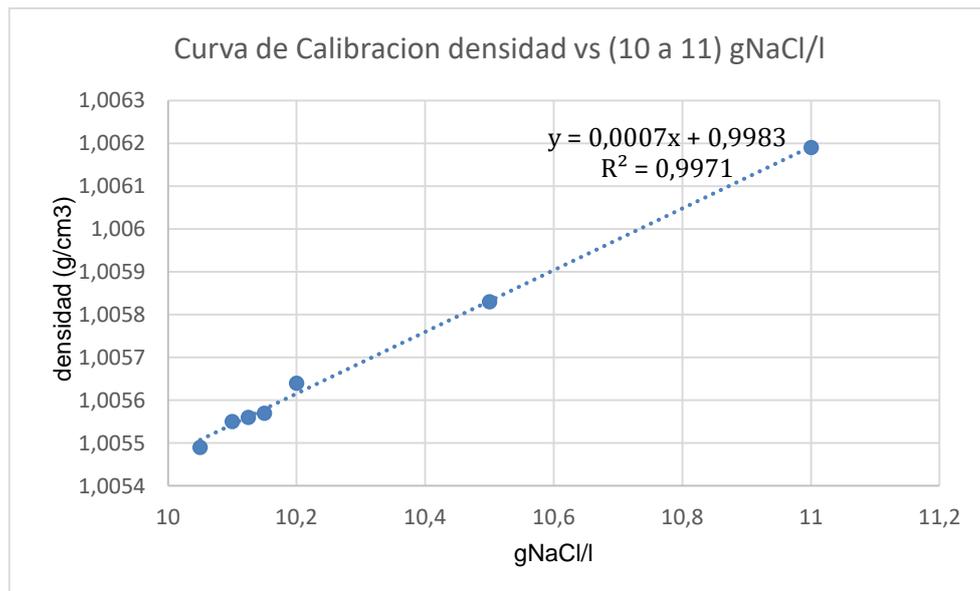
Curva de calibración densidad vs (5 a 5,5) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 76**

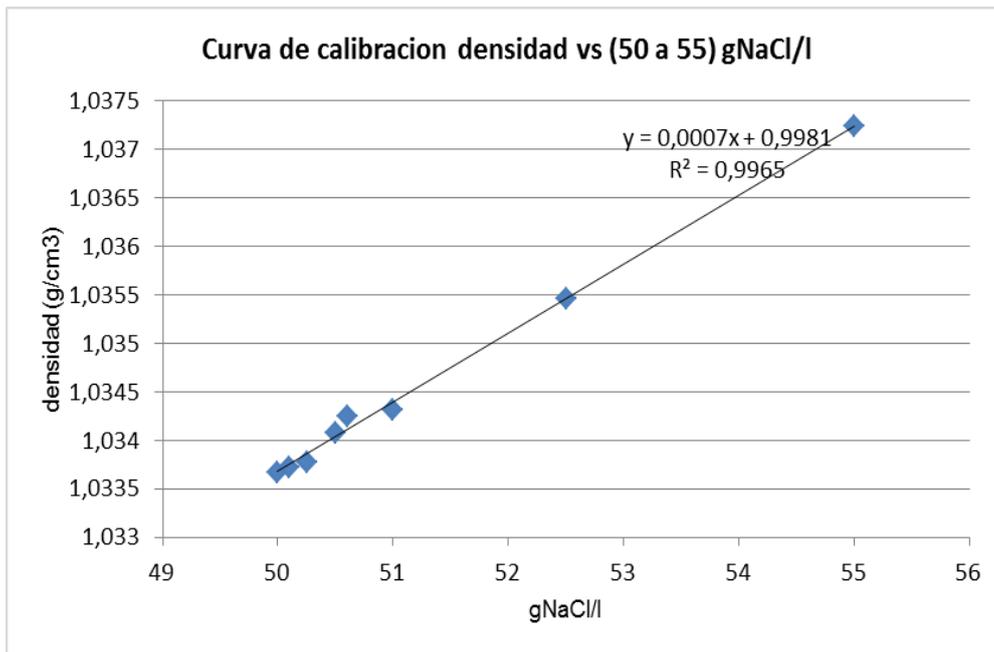
Curva de calibración densidad vs (10 a 11) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 77**

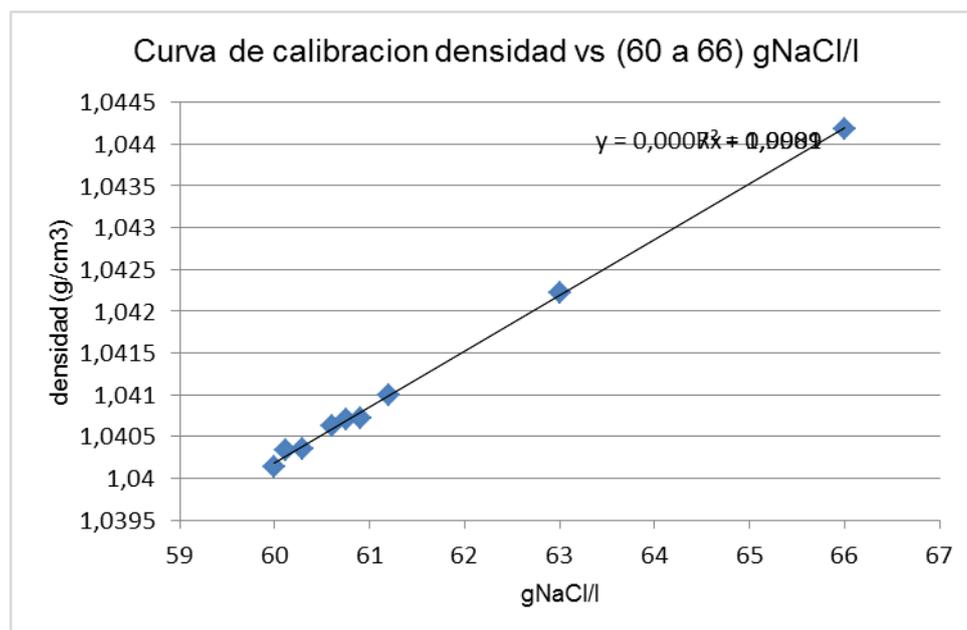
Curva de calibración densidad vs (50 a 55) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 78**

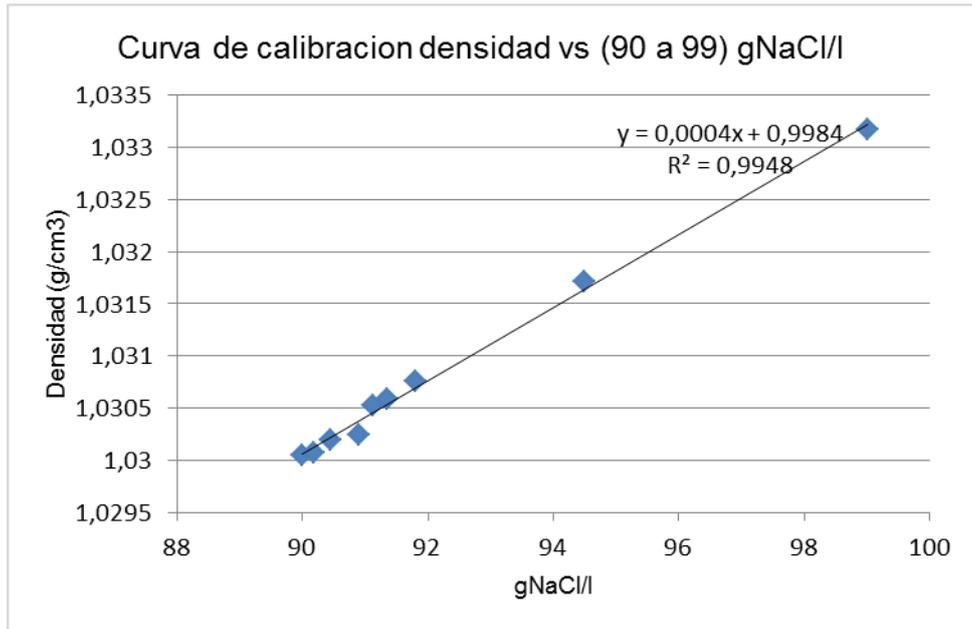
Curva de calibración densidad vs (60 a 66) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 79**

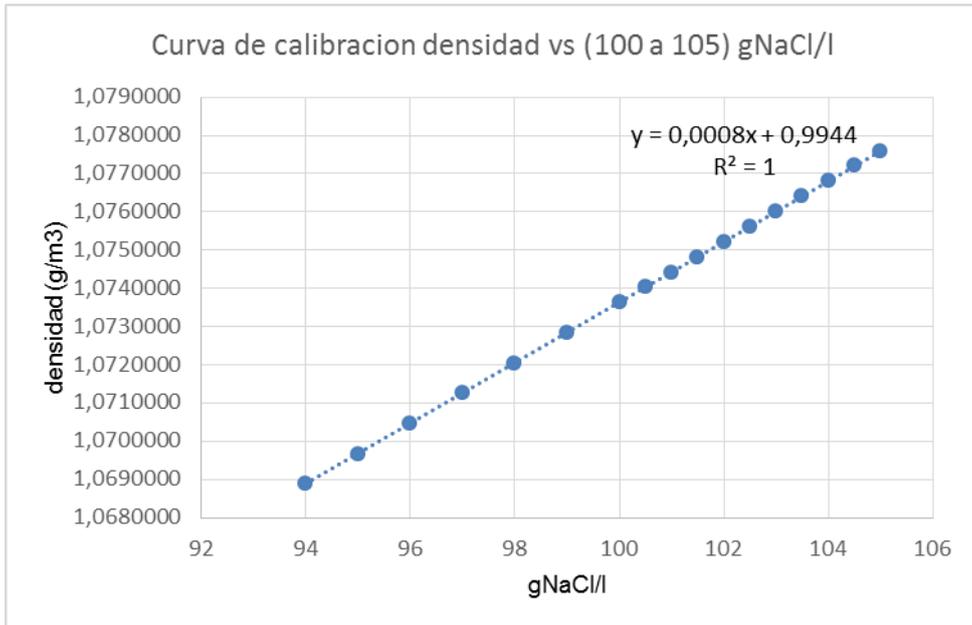
Curva de calibración densidad vs (90 a 99) gNaCl/l.



Nota. Datos de los ensayos realizados.

**Fig. 80**

Curva de calibración densidad vs (100 a 105) gNaCl/l.

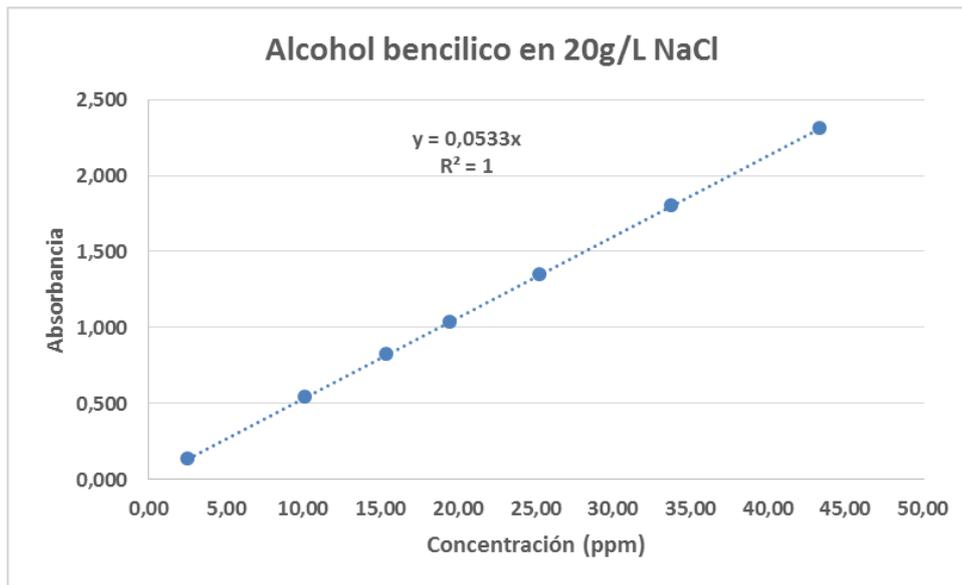


Nota. Datos de los ensayos realizados.

**ANEXO D.3: Absorbancia-Concentración de ácido bencílico.**

**Fig. 81**

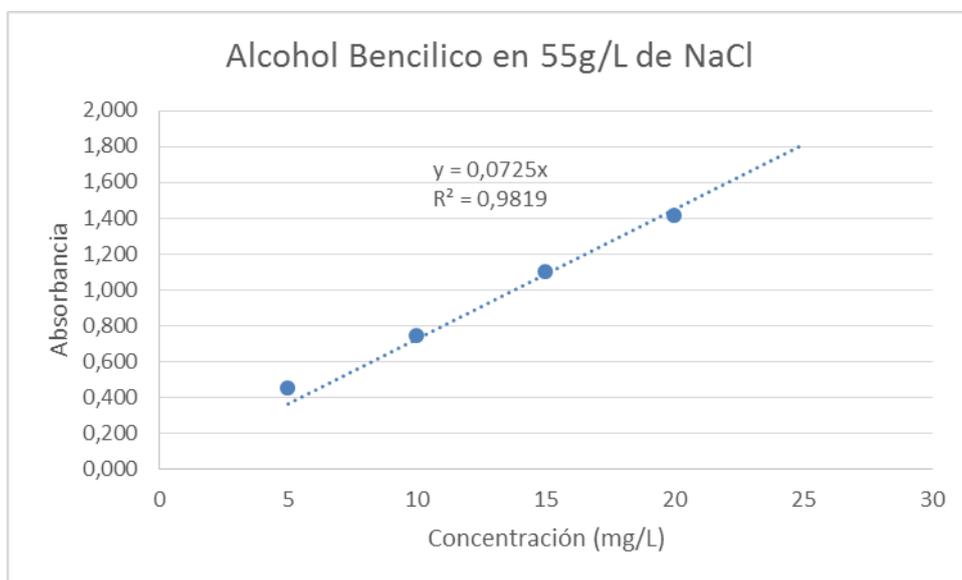
Curva de calibración: Absorbancia vs concentración de ácido bencílico en 20g/l NaCl.



*Nota.* Elaborado por Dra. Paola Natalia Esteves en el Laboratorio de operaciones.

**Fig. 82**

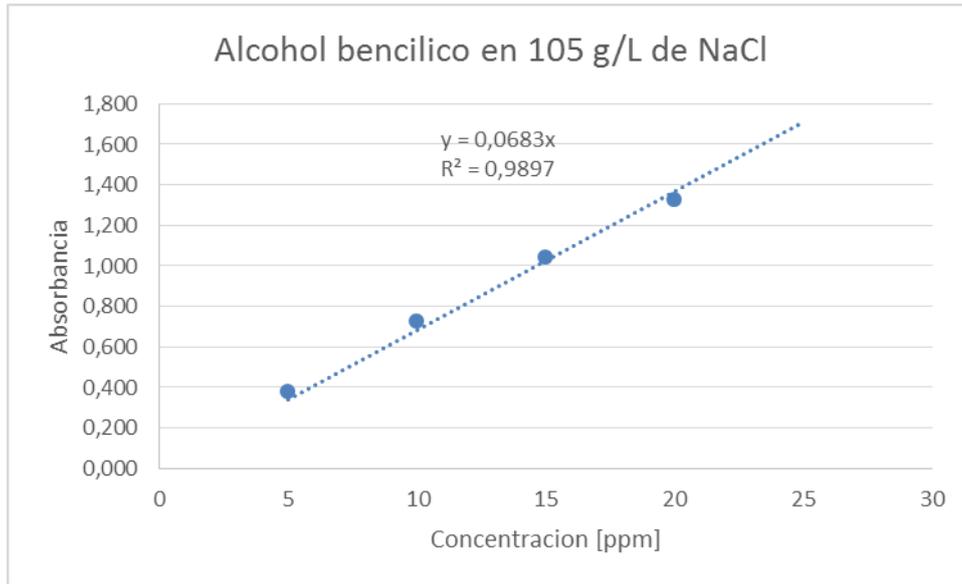
*Curva de calibración: Absorbancia vs concentración de ácido bencílico en 55g/l NaCl.*



*Nota.* Elaborado por Dra. Paola Natalia Esteves en el Laboratorio de operaciones.

**Fig. 83**

*Curva de calibración: Absorbancia vs concentración de ácido bencílico en 105g/l NaCl.*



*Nota.* Elaborado por Dra. Paola Natalia Esteves en el Laboratorio de operaciones.

## Bibliografía:

1. G. Michael Shook, Shannon L. Ansley, Allan Wylie (2004). *Tracers and Tracer Testing: Design, Implementation, and Interpretation Methods*. Laboratorio Nacional de Ingeniería y Medio Ambiente de Idaho.
2. Moshood Sanni. *Petroleum engineering: principles, calculations and workflows*. American Geophysical Union and John Wiley and Sons, Inc.
3. E. Haro, J. Arcos, A. Torres, C. Sanchez, J. Torres (12 de Marzo de 2010). *Caracterización petrofísica de un yacimiento*. Escuela Politécnica Nacional. Slideshare. <https://es.slideshare.net/1948yo/caracterizacion-petrofisicadeunyacimiento>
4. Paris de Ferrer, Magdalena (2009). *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos*. Magdalena Paris de Ferrer.
5. Flores Gutiérrez, Osiris (1 de Septiembre de 2013). *Variación del volumen poroso de arenas y calizas con doble porosidad*. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio. [https://repositorio.unam.mx/contenidos/variacion-del-volumen-poroso-de-arenas-y-calizas-con-doble-porosidad-218891?c=EB9kgX&d=false&q=\\*&i=12&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/variacion-del-volumen-poroso-de-arenas-y-calizas-con-doble-porosidad-218891?c=EB9kgX&d=false&q=*&i=12&v=1&t=search_0&as=0)
6. Ahmed, Tarek (2010). *Reservoir Engineering Handbook* (Edición 2019). Gulf Professional Publishing.
7. Rodríguez, Luis. *Daño a la formación y estimulación de pozos*. Slideshare. <https://es.slideshare.net/MauroAugustoSueltoLozano/8-dao-de-fm-y-estimulacion>
8. E. López, L. Gonzáles, E. Hernández, D. Mendoza, M. Vargas (19 de Mayo de 2017). *Interacción roca-fluido*. Suchiapas, Chiapas. Prezi. <https://prezi.com/p/4ux1sqm8fnid/interaccion-roca-fluido/>
9. Significados. <https://www.significados.com/densidad/>
10. Concepto. <https://concepto.de/conductividad-electrica/>
11. Díaz, A., Ruiz, A., Reyes E., Galván, A., Novo, J., Peinado, J., Meléndez, T., Fiñana, I. *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Córdoba. [https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08\\_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf](https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf)
12. Skoog, Holler, Nieman (2001). *Principios de análisis instrumental* (Quinta edición). Editorial McGraw-Hill.
13. Ramírez Sabag Jetzabeth (2020). *Análisis Integral de Pruebas de Trazadores en Yacimientos* (Edición 2021). Editorial Reverté.
14. Somaruga, Carlos (2020). *Apuntes de la materia Trazadores*. Universidad Nacional del Comahue.
15. Sanchez San Román, Javier (Junio de 2012). *Transporte de los contaminantes*. Universidad de Salamanca (España). Hidrología. [https://hidrologia.usal.es/temas/Transporte\\_de\\_contaminantes.pdf](https://hidrologia.usal.es/temas/Transporte_de_contaminantes.pdf).
16. D. R. Nielsen, J. W. Biggar (1961). *Miscible Displacement in Soils: I. Experimental Information*.
17. Research AG S.A (Agosto de 2021). *Hoja de seguridad: Cloruro de sodio*. Research-ag. <https://www.research-ag.com/producto/29116/hds>

18. Sigma-Aldrich (12 de Noviembre de 2021). *Ficha de datos de seguridad: alcohol bencílico*. Sigmaaldrich.  
<https://www.sigmaaldrich.com/AR/es/sds/sigald/13160>
19. Frigerio, Malvina (2021). Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I. Universidad Nacional del Comahue.
20. *Pesada: Balanza analítica*. Ub.  
<https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/pesada.html>
21. Kitlab.  
<https://kitlab.exa.unicen.edu.ar/erlenmeyer.html>
22. Ictsl.  
<http://www.ictsl.net/productos/aparatos/agitadormagneticoanalogicoacs160ccsbs.html>
23. Aliexpress.  
[https://www.aliexpress.us/item/2251832653591853.html?gatewayAdapt=esp2usa4itemAdapt&randl\\_shipto=US](https://www.aliexpress.us/item/2251832653591853.html?gatewayAdapt=esp2usa4itemAdapt&randl_shipto=US)
24. *Laboratorio de ciencias: kitasato*. Kitlab.  
<https://kitlab.exa.unicen.edu.ar/kitasato.html>
25. *Norces equipamiento científico: Kitasato Boro*. Norces.  
<https://norces.com/producto/kitasato-boro-3-3/>
26. *Equipos y laboratorio de Colombia: ¿Qué es un embudo buchner?*. Equipos y laboratorio.  
<https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/que-es-un-embudo-buchner>.
27. Cromtek: ciencia analítica y tecnología. *Filtración a vacío: ¿Cómo asegurar la bomba?*. Cromtek.  
<https://www.cromtek.cl/2022/01/07/filtracion-a-vacio-como-asegurar-la-bomba/>
28. Auxilab S.L. Material de laboratorio. *Tapón goma roja 2 orificios, diám.(inf-sup) 17.5-22.5mm, altura 23mm*.  
<https://www.auxilab.es/es/productos-laboratorio/tapon-goma-roja-2-orificios-diam-inf-sup-17-5-22-5-mm-altura-23-mm/>
29. PG Pedro gil. *Bombas de vacío: que son, como funcionan y aplicaciones prácticas*. Pedrogil.  
<https://www.pedrogil.com/bombas-vacio/>
30. *Cómo funciona. Bomba de vacío: cómo funciona una bomba de vacío*. Como-funciona.  
<https://como-funciona.co/una-bomba-de-vacio/>
31. *Materialesdelaboratoriohoy*.  
<https://materialesdelaboratoriohoy.us/plastico/el-papel-de-filtro/>
32. SI Analytics Gmbh. (30 de Abril de 2013). *Lab 960: conductímetro de laboratorio con reconocimiento automático del sensor*. Manualslib.  
<https://www.manualslib.es/manual/227469/Si-Analytics-Lab-960.html?page=26#manual>
33. Anton Paar (2012). *Manual DMA4100 M* (Edición 2012). Anton Paar Gmbh.
34. Macherey-Nagel. (2 de Noviembre de 2015). *Manual Nanocolor UV-VIS*. Manualslib.  
<https://www.manualslib.es/manual/229445/Macherey-Nagel-Nanocolor-Uv-Vis.html#manual>

35. Herrmann, Oliver. *Nanocolor UV/VIS: Análisis de agua*. Ictsl.  
<http://www.ictsl.net/downloads/espectrofotometronanocoloruvvis.pdf>
36. AGQ Labs Chile S.A. (2017). *Análisis químico, medir es comparar*. Agqlabs.  
<https://agqlabs.cl/wp-content/uploads/Analisis-quimico-medir-es-comparar.pdf>
37. Cole-Parmer an antylia scientific company. (3 de Mayo de 2020). Teoría de Conductividad y consejos técnicos. Coleparmer.  
<https://www.coleparmer.com/tech-article/conductivity?tlg=es-ES>
38. M. Rivas, C. Ramírez, L. Dueñas, S. Pineda (2018). *Medida de la conductividad eléctrica en disoluciones acuosas como función de la temperatura usando Arduino*.
39. Elementary Institute of Science. *Densidad del agua salada*. Create.  
<https://create.ucsd.edu/stem-initiative/cssi-outreach-lessons-and-handouts/Densidad%20de%20Agua%20Salada>
40. Experimentos científicos: extendiendo el mundo a través de pequeños experimentos y ciencia. *Densidad del agua*. Experimentos científicos.  
<https://www.experimentoscientificos.es/densidad/densidad-agua/>
41. Mettler Toledo. *Medición de la densidad: Todo lo que es preciso saber sobre la medición de la densidad*. Mt.  
[https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Application\\_Browse\\_Laboratory\\_Analytics/Density/density-measurement.html#:~:text=La%20vibraci%C3%B3n%20aumenta%20con%20una,reduce%20el%20valor%20de%20densidad.&text=Por%20tanto%2C%20cuanto%20mayor%20sea,menor%20y%20la%20densidad%20aumenta.](https://www.mt.com/mx/es/home/applications/Application_Browse_Laboratory_Analytics/Density/density-measurement.html#:~:text=La%20vibraci%C3%B3n%20aumenta%20con%20una,reduce%20el%20valor%20de%20densidad.&text=Por%20tanto%2C%20cuanto%20mayor%20sea,menor%20y%20la%20densidad%20aumenta.)
42. *Density of water*. Vedantu.  
<https://www.vedantu.com/physics/density-of-water>
43. Física Termodinámica. *Medición y cambios de densidad*. Oskrsf.  
<https://oskrsf.wordpress.com/fluidos/densidad/medicion-y-cambios-de-densidad/>
44. Campus virtual: Facultad de farmacia y bioquímica. *Recorrido: Espectrofotometría*. Campus.  
<https://campus.ffyb.uba.ar/mod/book/view.php?id=39533&chapterid=773>
45. Amézquita López, Fernando y Mendoza Olivares, Diana (2008). *Taller básico de Espectroscopía UV-VIS*. Universidad de Guanajuato.
46. Abrigo, Sergio (2021). *Apuntes de la materia Laboratorio de Petrofísica I*. Universidad Nacional del Comahue.
47. Roger Marc Nicoud (2015). *Chromatographic Processes Modeling, Simulation and Desing*.
48. Henner Schmidt (2006). *Preparative Chromatography of Fine Chemicals and Pharmaceutical Agents*.
49. Métodos Numéricos Modulo 4: Aproximación de integrales  
[https://multimedia.uned.ac.cr/pem/metodos\\_numericos\\_ensenanza/modulo4/descripcion.html](https://multimedia.uned.ac.cr/pem/metodos_numericos_ensenanza/modulo4/descripcion.html)
50. Laboratorio de petrofísica 1, Apuntes de cátedra, Universidad del Comahue.
51. F. Al. Dullien (2012) *Porous media: fluid transport and pore structure*.
52. Ing. Víctor Maldonado Yactayo. *Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención*.