

CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE DIAGRAMAS STIFF-DAVIS PARA ALUMNOS DE INGENIERÍA PETROLERA, EXPERIENCIA EN EL AULA

A. Paulina Gómora-Figueroa*, Julieta Villegas González y Josué H. Almazán Mendoza

Departamento de Ingeniería Petrolera, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM, C.U., Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

*p.gomora@unam.mx

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo mostrar la relevancia de los diagramas Stiff-Davis para las y los ingenieros petroleros, dichos diagramas son una representación gráfica que se construye utilizando la concentración de algunos de los iones presentes en el agua. La información que provee este análisis permite conocer, e incluso anticipar, posibles problemáticas y riesgos que se presenten en campo durante la producción de hidrocarburos. Sin embargo, la mayoría de las y los alumnos de la carrera de ingeniería petrolera de los últimos semestres no lo conocen, o bien, no saben para qué se utiliza. Lo anterior se debe, en gran medida, a que el agua es considerada como un producto no deseado durante la extracción de hidrocarburos. En este trabajo se reportan los resultados de dos actividades realizadas por 25 alumnos de la materia Temas Selectos en Ingeniería Petrolera, las cuales consistieron en la construcción e interpretación de diagramas Stiff-Davis. Estos diagramas fueron contruidos utilizando los recursos disponibles por cada alumno (hoja de Excel con equipo de cómputo o papel cuadriculado). Después de los ejercicios realizados, las y los alumnos se mostraron más interesados por conocer las aplicaciones de este análisis; sin embargo, es necesario realizar más ejercicios para practicar la interpretación y construcción de los diagramas, pues en los resultados obtenidos se aprecia que aún hay dudas para identificar algunos componentes de los diagramas y esto dificulta la interpretación de estos.

Palabras clave: Análisis de agua producida e inyectada, análisis de la composición del agua en la industria petrolera, geoquímica del agua, diagrama Stiff-Davis, Ingeniería Petrolera, python.

ABSTRACT

This work aims to show the importance of the Stiff-Davis diagrams for petroleum engineers. These diagrams are graphic representations built using eight ions determined in the water analysis. The Stiff-Davis diagrams help us know and anticipate potential flow assurance problems and other risks that may be present during hydrocarbon

production. However, most petroleum engineering students need to gain experience with these diagrams, although water is a non-desired byproduct during hydrocarbon extraction. In this paper, we report two activities with 25 senior students, which consisted of constructing and interpreting Stiff-Davis diagrams. The students built such diagrams using the resources available (e.g., an Excel spreadsheet or a piece of paper). Once the students developed these activities, they showed more curiosity to learn the analysis application. However, it is necessary to practice the construction and interpretation with more exercises since there are obvious doubts about identifying some of the diagram components, hampering the understanding of these diagrams.

Keywords: Analysis of produced and injected water, compositional water analysis in the oil and gas industry, water geochemistry, Stiff-Davis diagram, Petroleum engineering, python

INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo se caracteriza por proveer de un gran número de insumos y materias primas para la generación de energía, combustibles, así como una gran cantidad de productos usados cotidianamente, por lo que imaginar nuestra vida sin éstos resulta difícil. A pesar del auge que han tenido las energías alternativas en la generación de energía (Ritchie, 2017), la demanda de hidrocarburos sigue en aumento debido al incremento en la población a nivel mundial y el desarrollo económico de países emergentes (Martínez, 2019). Con la extracción de hidrocarburos es muy común la presencia de agua, a la cual se le denomina agua producida. Ésta puede provenir de un acuífero asociado al yacimiento o bien, puede pertenecer a formaciones de agua sin comunicación directa al yacimiento. Por otra parte, el agua producida también puede provenir de procesos de perforación, estimulación y aplicación de métodos de recuperación secundaria y mejorada. En zonas áridas, el acceso al agua representa un reto considerable, ya que el recurso es limitado y el agua disponible suele estar comprometida para uso agrícola, pecuario, industrial y residencial. Aunque la cantidad

de agua utilizada por la industria del gas y el petróleo es poca en comparación con los usos previamente mencionados, el balance hídrico se ve afectado (Dahm, 2014).

Eventualmente, parte del agua inyectada en los yacimientos regresa a la superficie, se estima que dependiendo de la formación, el agua que regresa oscila entre el 15 y el 80 % del volumen inyectado. Después de que concluyen las actividades de perforación, los pozos petroleros pueden producir una gran cantidad de agua junto con los hidrocarburos, la cual es considerada como el mayor subproducto no deseado en la producción de petróleo y gas. Se estima que por cada barril de petróleo producido se producen de 4 a 10 barriles de agua, siendo ésta el producto mayoritario de las operaciones de extracción de hidrocarburos (Guerra *et al.*, 2011 y Kenneth, 2007). En el caso particular de México se estima que por cada barril de petróleo se produce un barril de agua.

Sin embargo, el agua producida puede reutilizarse en otros procesos asociados a la producción de hidrocarburos, por ejemplo, la inyección de agua y productos químicos para asegurar la producción de hidrocarburos, la generación de vapor para recuperación incremental (o recuperación mejorada) y la obtención de energía eléctrica (Warner Jr, 2007). Algunos países, han realizado estudios sobre el uso del agua producida proveniente de campos terrestres de petróleo y gas, particularmente en zonas de escasez de agua (van Rossum, 2020, Takeuchi y Tanaka, 2020, U.S. EPA, 2018, U.S. EPA 2020). Este tipo de estudios tiene la finalidad de conocer las opciones de generación, manejo y disposición del agua producida, así como entender sus usos potenciales.

Diagrama o patrón Stiff-Davis

Las propiedades físicas y químicas del agua producida se definen por el tipo de hidrocarburos producidos, la geoquímica de la formación donde yacen los fluidos y su ubicación geográfica. Por ejemplo, entre el 80 % y el 90 % de los hidrocarburos que se disuelven en el agua son polares y aromáticos; los ácidos orgánicos que se encuentran típicamente en el agua producida son: fórmico, acético y propiónico. Además, las propiedades del agua pueden variar con respecto al tiempo debido a la interacción entre el agua y la formación, al reemplazo de los fluidos del yacimiento provenientes de otras formaciones o a otros fluidos inyectados durante la producción de hidrocarburos. Por lo tanto, estudiar la composición del agua producida puede proveer información relevante que complementa la evaluación de los pronósticos de producción de hidrocarburos en las diferentes fases de la vida productiva de un yacimiento (Morales-Hernández, 2017).

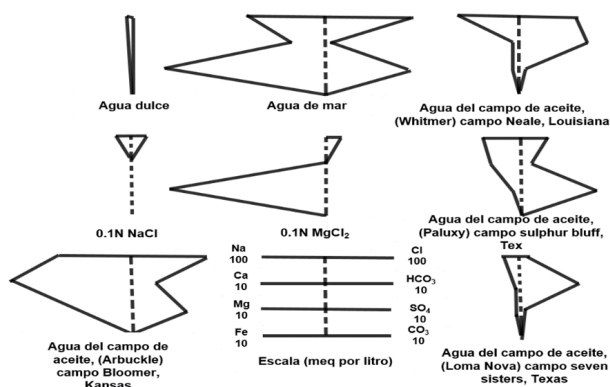


Figura 1. Patrones para diversas muestras de agua. Modificada de H. Stiff, (1951), Morales-Hernández (2017).

Una herramienta para analizar el agua producida es el diagrama Stiff-Davis, que se utiliza en diversas áreas de la ingeniería petrolera como un análisis de rutina.

El diagrama o patrón Stiff-Davis fue propuesto por primera vez en 1951 por H. Stiff y H. Davis (Stiff, 1951), se trata de una representación gráfica sencilla de algunos de los iones presentes en una muestra de agua, que resulta en patrones característicos que pueden ser interpretados o comparados con otros diagramas. Su simplicidad permite que estos puedan ser construidos empleando desde papel cuadrículado hasta diferentes herramientas de cómputo. En los patrones de la Figura 1 se observan líneas verticales (punteadas) que representan una concentración de cero para los iones positivos (cationes: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Fe^{2+}) y una concentración de cero para iones negativos (aniones: Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}). La identificación de la concentración de los cationes se realiza del lado izquierdo, mientras que la concentración de los aniones se ubica e incrementa hacia la derecha. La concentración de cationes y aniones se marca como puntos para cada ion. Al final se unen los puntos y se obtiene como resultado un patrón característico para la muestra de agua.

Los patrones presentados en la Figura 1, muestran que la forma de estos cambia con la composición (origen) del agua, además dichos patrones pueden sufrir alteraciones con el tiempo, debido a filtraciones de agua, inyección de fluidos o una combinación de ambas. Debido a la peculiaridad de cada uno de los patrones, las aplicaciones de esta forma de representación son diversas, ya que se facilita el análisis de las muestras de agua. A continuación, se enuncian algunos ejemplos;

1. El diagrama puede utilizarse para identificar diferentes estratos productores y correlacionarlos.
2. Es posible conocer si existe filtración de agua en un pozo. La apariencia del patrón se puede encoger, si se trata de dilución, o bien, puede cambiar y adquirir la forma del patrón del agua filtrada (contaminante).
3. Identificación de agua atípica y determinación del origen. Esto es común durante operaciones de perforación, donde se queda agua atrapada en estratos distintos al del agua de formación. En este caso el patrón de agua no se parece al del agua de formación.
4. Monitoreo de las operaciones de limpieza de un pozo durante la etapa de terminación.

El análisis Stiff-Davis también resulta útil en la caracterización hidrogeoquímica de diferentes acuíferos indicando las diferencias en la composición geoquímica y proporciona información sobre los procesos fisicoquímicos que afectan la calidad del agua, por lo que también se ha utilizado para el análisis de prospectos geotérmicos en diferentes zonas. (Yael y Dunel, 2018; Carrera-Villacrés, D., *et al.*, 2016).

A pesar de las aplicaciones que tiene este análisis, la mayoría de las y los alumnos de la carrera de Ingeniería Petrolera desconocen cómo se construye y qué utilidad tiene este análisis de rutina en la industria petrolera. De la misma forma, el alumnado, tampoco contempla que el agua producida puede tener aplicaciones diversas en la industria petrolera, así como en otros sectores (Aldana *et al.*, 2015; Cather *et al.*, 2003).

En este trabajo se presentan los resultados de dos actividades con un grupo de 25 alumnos de octavo, noveno y décimo semestre, en el marco de la materia Temas Selectos en Ingeniería Petrolera. La primera prueba consistió en que las y los alumnos construyeran patrones Stiff-Davis correspondientes a diferentes muestras de agua de mar a partir de su composición química. La segunda prueba consistió en analizar las propiedades físicas y químicas de dos muestras de

agua provenientes de pozos delimitadores para compararlas entre sí y determinar si ambas muestras son representativas de una muestra de agua de formación. Ambas actividades fueron asignadas a través de la plataforma Google Classroom. El objetivo de estas actividades es que las y los alumnos reconozcan la importancia del agua, que, a pesar de ser un subproducto en las actividades de extracción de hidrocarburos, tiene diversas aplicaciones en ingeniería petrolera. Además, estas actividades buscan que el alumnado comprenda cómo se lleva a cabo la construcción de un diagrama Stiff-Davis y aplique el conocimiento adquirido en el análisis y la evaluación de diferentes muestras de agua, las cuales resultan de la limpieza de pozos en etapa de terminación.

MÉTODOLÓGÍA

ACTIVIDAD 1. Construcción de Patrones Stiff-Davis para muestras de agua de mar

Para esta actividad se asignó la composición de cuatro muestras de agua de mar provenientes de distintos puntos geográficos y se muestran en la Tabla 1. Para construir los diagramas, lo primero que tiene que identificarse son los 8 iones por utilizar Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ (cationes) y Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻ (aniones). En este caso, el hierro (Fe²⁺) y el carbonato (CO₃²⁻) no están presentes en la tabla debido a que estos iones no suelen encontrarse en muestras de agua de mar, por lo que su concentración en mg/L es igual a 0. Cabe señalar que en el caso del hierro (Fe²⁺) si la concentración es distinta a 0 mg/L, muy posiblemente hay corrosión en algún punto del sistema de producción, por lo que debe monitorearse y en todo caso atenderse para evitar pérdidas económicas y accidentes.

Tabla 1. Composición de distintas muestras de agua de mar, unidades expresadas en miligramos por litro.				
Componente	Golfo de México ¹ [mg/L]	Mediterráneo Oriental [mg/L]	Golfo Árabe ¹ [mg/L]	Mar rojo ² [mg/L]
Cloruro (Cl ⁻)	18,980	21,200	23,000	22,219
Sodio (Na ⁺)	10,556	11,800	15,850	14,255
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	2,649	2,950	3,200	3,078
Magnesio (Mg ²⁺)	1,262	1,403	1,765	742
Calcio (Ca ²⁺)	400	423	500	225
Potasio (K ⁺)	380	463	460	210
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	140	-	142	146
Estroncio (Sr ²⁺)	13	-	-	-
Bromo (Br)	65	155	80	72
Borato (BO ₃ ³⁻)	26	72	-	-
Flúor (F ⁻)	1	-	-	-
Silicato (SiO ₃ ²⁻)	1	-	1.5	-
Yodo (I ⁻)	<1	2	-	-
SDT	34,483	38,600	45,000	41,000

¹ <https://www.fundeu.es/>

² <https://www.rae.es/dpd/mar>
SDT: Sólidos Disueltos Totales

El diagrama no puede construirse utilizando unidades de mg/L, por lo tanto, debe realizarse la conversión a [meq/L]. También se puede utilizar la escala logarítmica para visualizar mejor la forma del patrón. Por ejemplo, para una muestra de agua que contiene únicamente iones sodio (Na⁺) y iones sulfato (SO₄²⁻), el laboratorio reportó los resultados de 456.0 mg/L y 952.5 mg/L, respectivamente. Para llevar a cabo la conversión es necesario conocer la valencia y la masa molecular de los iones presentes en el agua, la información se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Una salmuera de sulfato de sodio está compuesta, en disolución, por iones sodio y iones sulfato. Las valencias de los iones se usan como miliequivalentes, pero sin la carga como se muestra.				
Ion	Masa molecular [g/mol]	Valencia	Número de miliequivalentes	Concentración [mg/L]
Na ⁺	22.9898	+1	1	456.0
SO ₄ ²⁻	96.0626	-2	2	952.5

Para obtener los miliequivalentes del ion SO₄²⁻ se utiliza el procedimiento siguiente:

$$\frac{952.5 \text{ mg}}{L} \times \frac{\text{mmol}}{96.0626 \text{ mg}} \times \frac{2 \text{ meq}}{\text{mmol}} = \frac{19.8308 \text{ meq}}{L}$$

Este procedimiento debe realizarse para todos los iones de las muestras de la Tabla 1. Es importante recordar que la valencia es igual al número de equivalentes; sin embargo, no se toma en cuenta el signo. La masa molecular de cada ion se obtiene de la tabla periódica; para los iones complejos como; el ion sulfato, bicarbonato y carbonato, la masa molecular se calcula. Ver sección de resultados.

El siguiente paso para construir el diagrama Stiff-Davis consiste en aplicar el logaritmo base 10 a los datos obtenidos (ver sección de resultados) para expandir el diagrama, lo cual es de utilidad para resaltar diferencias y similitudes entre distintas muestras de agua. El diagrama se construye de acuerdo con el siguiente criterio:

- Si log₁₀ = 0 -1, entonces en el diagrama se marca 1
- Si log₁₀ = 1 -2, entonces en el diagrama se marca 1-10
- Si log₁₀ = 2 - 3, entonces en el diagrama se marca 10-100
- Si log₁₀ = 3 - 4, entonces en el diagrama se marca 100-1000
- Si log₁₀ = 4 - 5, entonces en el diagrama se marca 1000-10000

ACTIVIDAD 2. Análisis de agua proveniente de un pozo delimitador

Se solicitó a las y los alumnos determinar si la muestra de agua de un pozo delimitador (DL) es representativa de la formación o no. Para ello se les proporcionaron los análisis de dos muestras de agua, una es representativa de agua de formación que se tomó como referencia; la otra muestra de agua proviene del pozo DL, las muestras provienen de pozos que pertenecen al Campo Aura y Campo Brisa, respectivamente. Ambos campos son vecinos, y se trata de yacimientos carbonatados y naturalmente fracturados, las propiedades del aceite crudo en ambos campos son muy similares y comparten un acuífero, por esta razón, la muestra de agua de formación proveniente de Campo Brisa se toma de referencia. Los datos de la muestra de pozo (Aura 1) y la muestra de referencia (Brisa 1) se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición de las muestras de agua Aura 1 (muestreada de pozo DL) y Brisa 1 (muestra de agua de referencia), unidades expresadas en miligramos por litro.

Componente	Aura 1 [mg/L]	Brisa 1 [mg/L]
Sodio (Na ⁺)	48,439.4	42,462.3
Calcio (Ca ²⁺)	35,200.0	14,400.0
Magnesio (Mg ²⁺)	5,710.5	729.0
Hierro (Fe ²⁺)	0.5	6.0
Cloruro (Cl ⁻)	153,000.0	92,335.5
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	610.0	385.5
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	390.0	900.0
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	0.0	0.0

Además, se proporcionó un fragmento del reporte de actividades de perforación del pozo DL de donde proviene la muestra de agua a analizar, debido a que durante dichas actividades se inyectan diferentes fluidos a los pozos que alteran las propiedades físicas y químicas del agua producida. A continuación, y para referencia del lector se mencionan brevemente algunas actividades realizadas en distintos intervalos del pozo DL en Campo Aura de donde se obtuvo la muestra a analizar en este ejercicio: “Se realizaron disparos a profundidad en el intervalo de 3907 a 2620 m, después se utilizó una bomba BEC (bombeo electro-centrífugo) para probar si el pozo producía aceite; sin embargo, sólo se recuperó salmuera. En el intervalo; de 3670 a 3720 m se inyectaron 15 m³ de HCl al 15 % (v/v), 5 m³ de disolvente, y 10 barriles de salmuera de CaCl₂, nuevamente se usó bomba, sólo se recuperó agua. Entonces se inyectó mejorador de flujo y con esta operación se recuperaron 812 barriles de fluido en superficie; 50 % aceite 50 % agua”. La Figura 2 presenta las características de algunas muestras de los fluidos recuperados durante las actividades de perforación, entre las cuales destacan la densidad, la salinidad, el pH y el porcentaje de agua producido durante las actividades antes descritas.

Como primer paso, se indicó a las y los alumnos que construyeran el diagrama Stiff-Davis y lo compararon con el diagrama del agua de referencia. Posteriormente, debían analizar las similitudes y diferencias entre los diagramas y utilizando la información proporcionada en el reporte de actividades de perforación para evaluar si la muestra de agua que proviene del pozo DL corresponde

a agua de formación o no. El procedimiento para construir los diagramas es el mismo que se describió en la Actividad 1. En esta ocasión no se proporcionó información sobre la concentración de iones diferentes a los necesarios para la construcción del diagrama Stiff-Davis para evitar confusiones entre el alumnado.

RESULTADOS

ACTIVIDAD 1. Construcción de Patrones Stiff-Davis para muestras de agua de mar

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la construcción de patrones o diagramas Stiff Davis, en la Tabla 4 se presentan las conversiones de mg/L a meq/L. La Tabla 5 muestra los resultados después de aplicar la operación de logaritmo base 10. Cabe señalar que con la información de cualquiera de las dos tablas se pueden construir los diagramas; deberá colocarse un punto por cada ion y al final se unen los puntos para obtener el patrón Stiff-Davis. Algunos de los trabajos realizados por los alumnos se muestran en la Figura A3. Los elementos que se evaluaron y las respuestas correctas de este primer ejercicio se exhiben en la Tabla 6.

En este ejercicio las y los estudiantes en su gran mayoría reconocieron el orden correcto para acomodar cationes y aniones y utilizaron adecuadamente las valencias de los iones para llevar a cabo las conversiones necesarias; sin embargo, cerca del 40 % tuvo algún problema para convertir a las unidades de meq/L; otras dificultades encontradas fueron; 1) no utilizar unidades en el diagrama; 2) menos de 35 % de las y los alumnos utilizaron escala logarítmica. 3) varias alumnas y alumnos no construyeron el diagrama completo ya que no marcaron los iones hierro y carbonato. Después de revisar la actividad entregada, ésta se resolvió en clase junto con las y los alumnos y se resaltó el orden de los iones para construir el diagrama. También se llevó a cabo la conversión de unidades y el uso de la escala logarítmica. En la Figura 3 se muestran los diagramas para el Golfo de México y el Golfo Árabe como ejemplo de lo que los y las alumnas debían obtener. Dado que se aplicó la escala logarítmica se omiten las unidades en los diagramas.

Hora	% En muestra recuperada			Dens. 20/4	*API	Temp [°C]	pH	H ₂ S	Salinidad	Gas
	Aceite	Agua	Sedim.					[ppm]	[ppm]	[ppm]
1:00	45	55	traza	1.05	-	32	4	20,000	220,000	2,570
2:00	60	40	traza	0.99	-	32	5	23,000	225,000	1,780
3:00	44	56	traza	1.03	-	34	5	25,000	215,000	2,945
4:00	traza	100	traza	1.17	-	35	4	14,000	220,000	1,371
5:00	traza	100	traza	1.17	-	35	4	29,000	215,000	401
6:00	traza	100	traza	1.17	-	36	4	35,000	215,000	1175
7:00	traza	100	-	1.17	-	36	4	31,000	215,000	123
8:00	M.I.	M.I.	M.I.	-	-	-	-	33,000	-	910
9:00	70	30	traza	1.01	-	37	4	35,000	215,000	1,730
10:00	99.4	0.2	0.4	1.016	7.3	50	5	25,000	M.I.	3,100
11:00	95.5	4	0.5	1.017	7.2	55	5	18,000	200,000	2,061
12:00	94	5.2	0.8	1.021	6.7	60	5	15,000	210,000	7,758
13:00	99.7	0.1	0.2	1.021	6.6	63	-	18,000	M.I.	713
14:00	99.6	0.2	0.2	1.022	6.5	62	-	22,000	M.I.	1,888
15:00	93	6.8	0.2	1.02	6.6	63	6	20,000	220,000	926
16:00	95.3	4.6	0.2	1.022	6.7	64	6	24,000	210,000	1,926
17:00	80	20	traza	1.03	-	38	5	22,000	215,000	1,007
19:00	88	12	traza	1.018	7.1	62	5	25,000	210,000	2,143
21:00	78	22	traza	1.04	-	42	5	22,000	215,000	1,682

Figura 2. Muestreo de fluidos y sus características. M.I = Muestra insuficiente para determinar. Las propiedades de los fluidos que se inyectaron en el pozo DL son: agua de perforación: densidad = 1.00 g/cm³, salinidad = 800 ppm, pH = 7. agua de mar: densidad = 1.03g/cm³, salinidad = 34,000 ppm pH = 7. salmuera cloruro de calcio: densidad = 1.18 g/cm³, salinidad = 225,200 ppm, pH = 7.

Tabla 4. Composición de distintas muestras de agua de mar, unidades expresadas en miliequivalentes por litro. El resto de los iones identificados no se utilizan.

Componente	Golfo de México [meq/L]	Mediterráneo Oriental [meq/L]	Golfo Árábigo [meq/L]	Mar rojo [meq/L]
Sodio (Na ⁺)	458.95	513.04	689.13	619.78
Calcio (Ca ²⁺)	20	21.15	25	11.25
Magnesio (Mg ²⁺)	105.16	116.91	147.08	61.83
Hierro (Fe ²⁺)	0	0	0	0
Cloruro (Cl ⁻)	542.28	605.71	657.14	634.82
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	1.66	0	1.69	1.73
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	55.18	61.45	66.66	64.12
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	0	0	0	0

Tabla 5. Composición de distintas muestras de agua de mar, tras aplicar logaritmo base 10.

Componente	Golfo de México [log ₁₀]	Mediterráneo Oriental [log ₁₀]	Golfo Árábigo [log ₁₀]	Mar rojo [log ₁₀]
Sodio (Na ⁺)	2.66	2.71	2.83	2.79
Calcio (Ca ²⁺)	1.30	1.32	1.39	1.05
Magnesio (Mg ²⁺)	2.02	2.06	2.16	1.79
Hierro (Fe ²⁺)	1	1	1	1
Cloruro (Cl ⁻)	2.73	2.78	2.81	2.80
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	0.22	0	0.22	0.24
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	1.74	1.78	1.82	1.80
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	1	1	1	1

Al analizar la Tabla 6 se concluye que se alcanzó el objetivo de esta actividad; sin embargo, es evidente que algunas cosas no quedaron completamente claras y que es necesario realizar más ejercicios junto con el alumnado. Los temas de la rúbrica que requieren de más atención son el uso de unidades y análisis dimensional al realizar las conversiones, así como la aplicación de la escala logarítmica.

Tabla 6. Resultados generados para el ejercicio de construcción de diagramas Stiff-Davis.

Rúbrica	# respuestas correctas	% respuestas correctas
Reconoce el lugar de los cationes y aniones	20	80
Conoce el valor correcto de las valencias de los iones	22	88
Coloca en orden correcto los iones	19	76
Convierte correctamente de mg/L a meq/L	16	64
Escribe unidades en el diagrama	2	8
Coloca escala al diagrama	15	60
Utiliza escala logarítmica	8	32
Construye correctamente el diagrama	6	24

ACTIVIDAD 2. Análisis de agua proveniente de un pozo delimitador

Esta actividad se asignó con la finalidad de aumentar el interés de las y los estudiantes por los diagramas Stiff-Davis aplicando los conocimientos adquiridos para analizar las propiedades de una muestra de agua obtenida durante la puesta en marcha de un pozo de aceite. La composición de las salmueras a comparar (Aura 1 y Brisa 1) en unidades de miliequivalentes por litro se muestran en la Tabla 7. Los aspectos evaluados de este ejercicio se presentan en la Tabla 8. Además de evaluar los elementos del ejercicio anterior, se agregaron dos elementos más; “Distingue entre una muestra de agua de formación y una mezcla usada en perforación” y “Sugiere que el agua es de formación; sin embargo, se encuentra contaminada con fluidos de perforación”. Para esta actividad se observó una mejoría en el desempeño del estudiantado los elementos siguientes; “reconoce el sitio de los cationes y aniones”, “convierte correctamente de mg/L a meq/L” y “utiliza escala logarítmica”, en un 12 %, 32 % y 32 %, respectivamente. Algunos de los trabajos realizados se muestran en la Figura A3.

Los elementos en los que debe seguirse practicando con los estudiantes son; el uso de unidades en el diagrama, el orden de los cationes y aniones, y el empleo una escala adecuada para elaborar el diagrama, pues se percibió que por realizar de forma rápida el ejercicio, muchos alumnos no utilizaron papel cuadrulado. La Figura 4 muestra los patrones (o diagramas) Stiff-Davis para muestras de Brisa 1 y Aura 1. Aunque los y las alumnas tuvieron menos complicaciones para construir los diagramas en este ejercicio, la gran mayoría no siguió

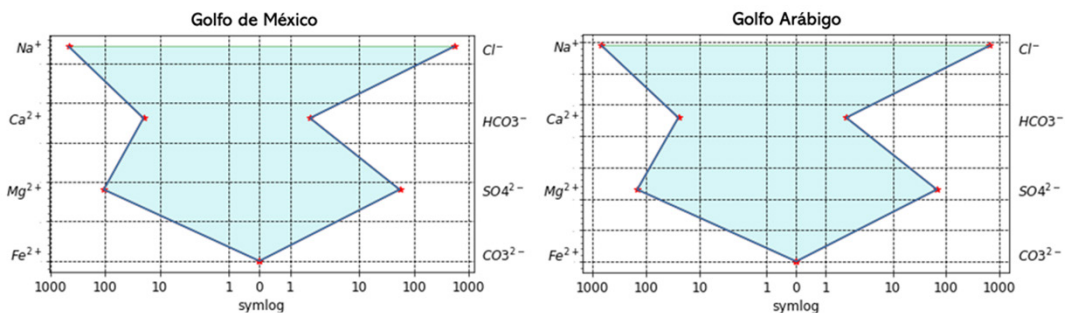


Figura 3. Patrones Stiff-Davis para muestras de agua del Golfo de México y el Golfo Árábigo. A pesar de que la composición no es la misma los patrones tienen mucha similitud entre sí. Se utilizaron las librerías; Pandas, Numpy y Matplotlib de Python.

las indicaciones del ejercicio en su totalidad ya que sus respuestas no estaban fundamentadas en las evidencias proporcionadas (análisis de agua representativa y fragmento del reporte de actividades de perforación del pozo DL de donde proviene la muestra de agua a analizar). Lo anterior sugiere que las instrucciones no fueron del todo claras y que es necesario realizar más ejercicios de este tipo para que los alumnos se sigan familiarizando con estos diagramas y su análisis.

Al comparar los dos diagramas Stiff-Davis se aprecia que la diferencia en concentración es de un orden de magnitud para los iones; calcio, magnesio, bicarbonatos y sulfatos en Aura 1, y aunque los patrones son similares (Figura 4), hay diferencias significativas y no se trata del mismo tipo de agua ya que la concentración de los iones, la densidad, la salinidad y el pH son distintos, ver Tabla 7. La muestra proveniente del pozo DL es una mezcla de agua, producto de las actividades de perforación y estimulación para hacer fluir al pozo.

Tabla 7. Composición de las muestras de agua Aura 1 (muestreada de pozo) y Brisa 1 (muestra de agua de referencia), unidades expresadas en miliequivalentes por litro.

Propiedad	Aura 1	Brisa 1
Densidad [g/mL]	1.17	1.11
Salinidad [mg/L]	252,127	153,000
pH [adim]	5.63	7.3
Componente	[meq/L]	[meq/L]
Sodio (Na ⁺)	2,106.9	1,846.2
Calcio (Ca ²⁺)	1,756.5	720.0
Magnesio (Mg ²⁺)	469.9	59.8
Hierro (Fe ²⁺)	0.0	0.2
Cloruro (Cl ⁻)	4,315.6	2,601.1
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	10.0	6.3
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	8.1	18.7
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	0.0	0.0

adim: adimensional

Pocas alumnas y alumnos discutieron las diferencias en la concentración de los iones sulfato, bicarbonato y calcio, inclusive notaron que el pH de Aura 1 era más bajo que en el caso de Brisa 1. También notaron la diferencia en la densidad entre las muestras. Uno más, notó que la salinidad de Aura 1 (252,127 ppm) era mayor que la salinidad de Brisa 1 (153,000 ppm); a pesar de estas observaciones los alumnos concluían que la muestra de Aura 1 se trataba de una muestra de agua de formación. El 12 % de las y los alumnos sugieren que la muestra de agua que se analiza (Aura 1) proviene de la contaminación del agua de formación con salmueras de perforación, o bien, que existe contaminación de algún aporte salino, ver Tabla 8.

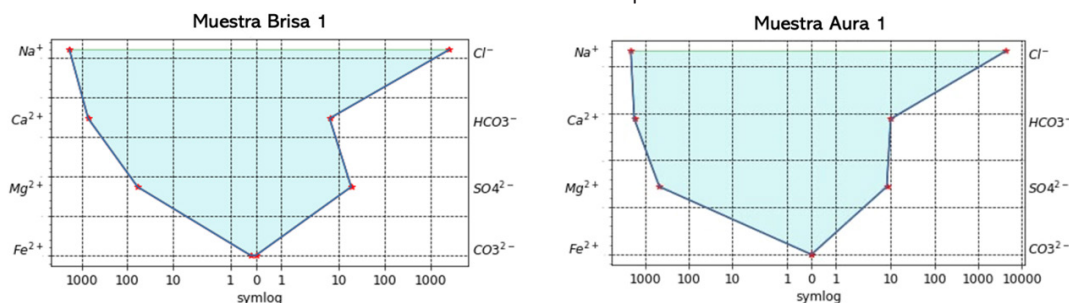


Figura 4. Patrones Stiff-Davis para muestras de Brisa 1 y Aura 1. Se observan diferencias en la concentración de calcio, magnesio, bicarbonatos y sulfatos al comparar con detenimiento los diagramas. Se utilizaron las librerías; Pandas, Numpy y Matplotlib de Python.

Tabla 8. Resultados correctos para el ejercicio de análisis de agua proveniente de un pozo delimitador.

Rúbrica	# respuestas correctas	% respuestas correctas
Reconoce el lugar de los cationes y aniones	23	92
Conoce el valor correcto de las valencias de los iones	24	96
Coloca en orden correcto los iones	21	84
Convierte correctamente de mg/L a meq/L	24	96
Escribe unidades en el diagrama	3	12
Coloca escala al diagrama	20	80
Utiliza escala logarítmica	16	64
Construye correctamente el diagrama	15	60
Distingue entre una muestra de agua de formación y una mezcla usada en perforación	2	8
Sugiere que el agua es de formación; sin embargo, se encuentra contaminada con fluidos de perforación	3	12

Resulta evidente que después de realizar un ejercicio de práctica los alumnos construyeron con más facilidad los diagramas Stiff-Davis, lo cual se nota en el número de respuestas correctas registradas en la rúbrica. Esto indica que la práctica mejora su habilidad para construir dichos diagramas. Debido a que el análisis del agua y el diagrama Stiff-Davis se evalúan de forma rutinaria en la industria petrolera, es deseable que los y las alumnas de Ingeniería Petrolera utilicen más estas herramientas en clases para analizar diferentes problemáticas relacionadas con la producción de agua durante la explotación de hidrocarburos.

Aunque la construcción de los diagramas Stiff-Davis es sencilla, la falta de atención puede resultar en interpretaciones erróneas o poco adecuadas. Por este motivo se consideró como siguiente paso para construir los diagramas Stiff-Davis hacer uso de Python, lo cual sería de utilidad para realizar un análisis más preciso; además, podría generar más interés del alumnado ya que se emplearía programación. El código para generar cualquier tipo de diagrama podría ayudar a que los y las alumnas lleven a cabo un análisis más detallado. En las Figuras A4, A5, A6 y A7 se muestra el código de Python elaborado para construir los diagramas Stiff-Davis. Se utilizaron las librerías; Pandas, Numpy y Matplotlib de Python. En este trabajo no fue posible incluir los resultados tras aplicar Python con el alumnado; sin embargo, ya se está probando en clases.

El anexo puede consultarse a través de la liga:

<https://docs.google.com/document/d/1jx8FSE4M6nnVXUzFKLGFupl3W0EN/edit?usp=sharing&oid=100333700647438593901&rtprof=true&sd=true>

CONCLUSIONES

De manera general, el agua y sus propiedades han sido consideradas como un producto no deseado durante la explotación de hidrocarburos, lo cual repercute en la educación del alumnado ya que muy pocos estudian los diagramas Stiff-Davis. En este trabajo se presentaron los resultados obtenidos al aplicar dos actividades para construir dichos diagramas e interpretar la información que estos proporcionan, utilizando hojas de cálculo en Excel y papel cuadriculado.

Debido a que el análisis del agua y los diagramas Stiff-Davis son estudios de rutina en ingeniería de yacimientos, perforación, productividad de pozos e instalaciones superficiales, es necesario realizar más actividades en clase para que los alumnos puedan realizar interpretaciones más precisas con la información que se proporciona. Si bien se cumplieron los objetivos de aprender a construir diagramas y conocer la relevancia de estos para las y los ingenieros petroleros, aún hace falta practicar la interpretación de los diagramas.

También llama mucho la atención es que algunos estudiantes no colocan unidades y a veces se equivocan al realizar la conversión de unidades debido a que no realizan un análisis dimensional, estas habilidades debieron adquirirse en semestres anteriores, inclusive en nivel preparatoria, por lo que es importante hacer énfasis con los alumnos para que ejerciten estos aspectos constantemente.

El análisis de las propiedades del agua producida puede servir para definir estrategias de aseguramiento de flujo, sistemas artificiales de producción y estimación de reservas. Además, el agua puede ser inyectada a los pozos como método de recuperación adicional (ej. generación de vapor). Los y las alumnas de Temas Selectos mostraron más interés por conocer otras aplicaciones de este análisis después de realizar las actividades. Actualmente, se trabaja en otros ejercicios utilizando el código de Python generado en este trabajo para evaluar si la programación ayuda a la interpretación de los diagramas donde se discutan las problemáticas en campo asociadas a la presencia de agua.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Leonardo Teja Juárez por su apoyo para la elaboración del código en Python. También agradecen a los proyectos PAPIIT IA105621 "Evaluación de rocas ígneas para almacenar dióxido de carbono a través de la formación de carbonatos", y al proyecto CONACyT 280816 "Plataforma Yacimiento en miniatura para Estudios de EOR mediante Nanofluidos Inteligentes en Campos Maduros y No Convencionales de México" por el apoyo para llevar a cabo alguno de los análisis del agua trabajados en la clase de Temas Selectos de Ingeniería Petrolera. APGF agradece el apoyo a PEMEX PEP para proporcionar información de campo relevante para que los alumnos de Ingeniería Petrolera hicieran el ejercicio 2. Los autores agradecen a María Isabel Vidal Reyes y Martín Carlos Velázquez Franco por sus valiosos comentarios para mejorar y enriquecer este trabajo.

REFERENCIAS

- Aldana, G., Chourio, A., Zambrano, O. (2015) Hydro geochemical data on oil field water statistic validation. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 38 (3) 257-265.
- Cather, M.E., Lee, R., Gundiler I., Sung A, Davidson N., Reddy A. K., Wei, M. (2003) NM WAIDS: A Produced Water Quality and Infrastructure GIS Database for New Mexico Oil Producers. Technical Report, Contract No. FC26-02NT15134, U.S. DOE, Washington, DC. <https://doi.org/10.2172/823003>.
- Carrera-Villacrés, D., Hidalgo, A., Guevara-García, P., Vivero, M. T., Delgado-Rodríguez, V. (2016). Hydrogeochemical analysis of volcanic and geothermal fluids in the Andes from Ecuador using hydrochemical plots (Stiff, Piper and Schoeller-Berkaloff diagrams). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 39, 012062, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/39/1/012062>
- Dahm, K. (2014) Guidance for the Evaluation of Water Management Strategies to Provide Regional Water Supplies for the Oil and Gas Industry, Final Report OMB No. 0704-0188. Denver, CO: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation
- U.S. EPA, (2018). Detailed Study of the Centralized Waste Treatment Point Source Category for Facilities Managing Oil and Gas Extraction Wastes. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 821-R-18-004.
- U.S. EPA, (2020). Summary of Input on Oil and Gas Extraction Wastewater Management Practices Under the Clean Water Act, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 821-S19-001.
- Guerra K., Dahm K. y Dunford S, (2011). Science and Technology Program Report 157. Oil and Gas Produced Water Management and Beneficial Use in the Western United States. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- Kenneth E. (2007). AMEC Paragon Inc. Petroleum Engineering Handbook, Vol. III Facilities and Construction Engineering, Chapter 4 Water-Treating Facilities in Oil and Gas Operations, III-123 – III-182.
- Martínez Mateo, B. R. (2019). Análisis y Perspectiva de la Implementación de la Reforma Energética en México. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales-Hernández J. (2017). Estudio de la formación y estabilidad de incrustaciones de carbonato de calcio en campos naturalmente fracturados desde condiciones de yacimiento hasta superficie. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ritchie, H. 2017. Renewable Energy. Our World in Data <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- Stiff, H.A. (1951). The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *J Pet Technol* 3 15–3.
- Takeuchi H. y Tanaka H. (2020). Water reuses and recycling in Japan – History, current situation, and future perspectives – *Water Cycle*, 1 – 12.
- van Rossum T. (2020). Water reuses and recycling in Canada – History, current situation, and future perspectives – *Water Cycle*, 1, 98 – 103. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.001>
- Warner Jr., H. R. (2007). SPE Warner Consulting Services. Petroleum Engineering Handbook, Vol. V Reservoir Engineering and Petrophysics, Chapter 11 Waterflooding, V-1037 – V-1102.
- Yael, R., y Dunel, L. (2018) Caracterización hidroquímica de la cuenca inferior del río Colorado. INTA Ediciones. Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi. Argentina.

Manuscrito recibido: 1 de octubre de 2022

Manuscrito corregido-recibido: 22 de noviembre de 2022

Manuscrito aceptado: 6 de diciembre de 2022