

Ramón Luis Montero¹, Oswaldo Vera¹, Carolina Olivares² y Carlos Yáñez¹

¹ Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Apartado 3895, Caracas 1010-A, Venezuela. Teléfono: 58-212-6051539, Fax: 58-212-6052201. ramon.montero@ciens.ucv.ve

² PDVSA, División Oriente, Gerencia de Exploración.

Modelaje hidrogeológico y origen de las aguas de formación de los campos Silván, Silvestre, Sinco y Torunos, Cuenca de Barinas, Venezuela

ABSTRACT

This research work consisted of a hydrogeochemical study of oilfield waters (formation waters) from the O-P and A-B sands from the Escandalosa and the Gobernador formations of the Barinas Basin respectively, aimed at determining the waters type, the principal process that control the chemical composition, the origin of those waters; as like to propound a hydrogeological model. In order to achieve this objective, the content of the major ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , F^- , Br^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} and dissolved silica (SiO_2), and the trace elements Li, B, Rb, Sr, and Ba were determined. Through the simultaneous application of the water classification methods were identified two hydrogeochemical facies: $\text{Na}^+-\text{HCO}_3^-$ y Na^+-Cl^- ; and by the application of the Stiff figures, three types of formation waters were found in this area, namely: connate, meteoric and mixed waters. In this sense, the chemical composition of the hydrogeochemical facies, are controled by the water-rock interaction processes and the sea fossil water. The trends of the Stiff diagrams and the total dissolved solids content in the Sinco and the Silvestre fields, as well as the fault and fracture patterns, reveal the existence of an active recharge area to the south of the Sinco field.

Key words: formation waters, facies, hydrogeochemistry, origin, recharge

RESUMEN

En el presente trabajo fue realizado un estudio hidrogeoquímico de aguas asociadas a crudo (aguas de formación) provenientes de las arenas O-P y A-B, respectivamente pertenecientes a las formaciones Escandalosa y Gobernador, Cuenca de Barinas, con el objetivo de determinar los tipos de aguas presentes, los procesos que controlan su composición química y el origen de las mismas; así como generar un modelo hidrogeológico que permita explicar el aumento en los cortes de aguas reportados en las arenas productoras. Para alcanzar los objetivos propuestos, fue realizada la determinación de las especies iónicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , F^- , Br^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} y sílice disuelta (SiO_2); así como los elementos traza Li, B, Rb, Sr y Ba. Fueron identificadas dos facies hidrogeoquímicas: $\text{Na}^+-\text{HCO}_3^-$ y Na^+-Cl^- ; asimismo, se estableció la presencia de aguas de formación connatas, meteóricas y mezclas. La composición química de estas aguas, está controlada por la influencia de aguas fósiles marinas y por procesos de interacción agua-roca. Las tendencias de los diagramas de Stiff y de los sólidos disueltos totales en los Campos Sinco y Silvestre, así como los patrones de fallas y fracturas existentes, revelan la presencia de una zona de recarga activa al sur del Campo Sinco.

Palabras claves: agua de formación, facies, hidrogeoquímica, origen, recarga

INTRODUCCIÓN

En general, las aguas subterráneas pueden ser definidas como aquellas aguas que están contenidas y almacenadas en el subsuelo, pero cuando están asociadas a yacimientos de hidrocarburos reciben el nombre de aguas de formación (Drever, 1988). Estas aguas se encuentran a grandes profundidades, constituyendo una parte importante del ciclo hidrológico (Collins, 1975; Conti et al., 2000). De acuerdo a su tiempo de residencia pueden ser clasificadas como aguas meteóricas, cuando han sido recientemente incorporadas al yacimiento; o connatas, cuando fueron atrapadas durante la deposición de los sedimentos. El agua de formación es el componente principal de las cuencas sedimentarias, es el fluido más comúnmente recuperado durante la exploración petrolera y es generalmente de poca importancia económica (Collins, 1975; Cheng et al., 2006); sin embargo desde el punto de vista geoquímico, la aplicación sobre estos cuerpos de aguas de los diversos conceptos involucrados en esta área del conocimiento, permiten realizar interpretaciones relacionadas a la determinación del probable origen de dichas aguas, cuales son los procesos involucrados durante la interacción agua-roca, procesos de mezcla y dilución, evolución geoquímica de las mismas, así como la detección de las potenciales áreas de recarga (Conti et al., 2000; Jørgensen, 2002; Montoroi et al., 2002; Cheng et al., 2006). Así mismo, caracterizar hidrogeoquímicamente el agua asociada al crudo proveniente de un yacimiento en particular, ha sido utilizado como elemento adicional para identificar la fuente de producción de este fluido, detectar comunicación vertical entre yacimientos, identificar acuíferos y optimizar programas de reparación

de pozos, entre otros (Medina, 1981). En el mismo orden de ideas, la presencia en cantidades apreciables de aguas de formación a causa de su infiltración desde la superficie, puede conllevar a la variación composicional de los hidrocarburos por procesos como: lavado y pérdida de componentes orgánicos solubles, hasta el punto de aumentar el contenido de compuestos pesados y disminución del grado API; y biodegradación del crudo por acción bacteriana, convirtiéndolo en sustancias muy viscosas, de muy baja o ninguna movilidad, disminuyendo así la capacidad de migración del crudo (Collins, 1975).

El origen y composición química del agua de formación está controlada por procesos como interacción agua-roca, evaporación de fluidos no marinos o de agua de mar, infiltración de agua meteórica, condiciones tectono-estratigráficas bajo las cuales se encuentran los yacimientos, profundidad, dirección de flujo, composición del agua de recarga, tiempo de residencia y actividades humanas entre otros (Cheng et al., 2006).

En Venezuela existen importantes áreas productoras de hidrocarburos, destacándose en orden de importancia, las cuencas de Maracaibo, Oriental y Barinas-Apure. En cada una de ellas, el Instituto de Ciencias de la Tierra de la UCV y Petróleos de Venezuela, desde la década de los setenta, han realizado estudios geoquímicos sobre las aguas de formación contenidas en algunas de sus principales arenas productoras, donde se han implementado herramientas geoquímicas desarrolladas en las investigaciones asociadas a las actividades de exploración y explotación de este recurso natural no renovable. En ese sentido, pueden ser mencionados los estudios geoquímicos desarrollados en la Cuenca

Oriental de Venezuela (Vierma, 1979; Ungría, 1981), específicamente en el Área Mayor de Oficina, con un muestreo realizado en diez campos que permitió abarcar unos 60 Km². Las aguas de formación fueron caracterizadas a través de la determinación química de las especies Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, Br⁻, I⁻ y SO₄²⁻, cuya interpretación de los resultados permitió detectar la presencia de aguas meteóricas y connatas en las formaciones geológicas que las contienen. Posteriormente, Medina (1981) estudió geoquímicamente un conjunto de aguas de formación captadas en las áreas Mayor de Anaco, Mayor de Oficina y Temblador de la Cuenca Oriental, a través de la determinación de las especies antes indicadas, encontrando tanto aguas meteóricas como connatas; igualmente, mediante la aplicación de asociaciones entre especies mayoritarias como Ca^{2+}/Cl⁻, identificó zonas potencialmente prospectivas.}

Con propósitos similares, Vásquez (1998) realizó la caracterización geoquímica de aguas de formación asociadas al Domo Sur en el Campo Motatán de la Cuenca del Lago de Maracaibo, captadas a nivel de cabezal en 18 pozos que penetran las arenas productoras de las formaciones Paují y Misoa. Para alcanzar este objetivo, Vásquez (1998) determinó las especies iónicas mayoritarias Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻, y traza Fe²⁺, Ba²⁺, Br⁻, I⁻ y NO₃⁻. A partir de los resultados obtenidos, esta investigadora identificó la presencia de tres tipos de aguas de formación, a saber: meteóricas, connatas y mezclas.

Por otra parte, en años recientes han sido reportados incrementos significativos en la producción del agua asociada a los crudos pertenecientes a la Cuenca de Barinas, por lo que el presente trabajo consistió en se

realizar un estudio hidrogeoquímico en 18 muestras de aguas de formación captadas en pozos que atraviesan las arenas O-P y A-B, respectivamente pertenecientes a las formaciones Escandalosa y Gobernador, en los campos Silván, Silvestre, Sinco y Torunos, de la mencionada cuenca. El principal objetivo de este estudio, es conocer los tipos de aguas presentes, los principales procesos que controlan su composición química, el origen de las mismas, así como, proponer un modelo hidrodinámico que permita detectar la posible área de recarga de las aguas de formación.

ZONA DE ESTUDIO

La Cuenca de Barinas-Apure constituye una depresión ubicada en la parte suroeste de Venezuela y es la tercera en importancia en atención al volumen de sus recursos petrolíferos. Está delimitada al noroeste por la cadena montañosa de los Andes venezolanos; al norte por la Serranía del Interior Central; al este y noreste por el levantamiento de El Baúl; y al sur está separada de la Cuenca de los Llanos colombianos por un alto gravimétrico situado en los ríos Apure y Arauca (figura 1).

La Cuenca de Barinas-Apure, incluye en realidad dos subcuencas denominadas Barinas y Uribante, separadas ambas entre sí por el Arco de Santa Bárbara (González de Juana et al., 1980). La primera, ocupa la mayor extensión y en ella están ubicados los campos Silván, Silvestre, Sinco y Torunos, cuyas aguas de formación que percolan a través de arenas productoras pertenecientes a las formaciones Escandalosa y Gobernador, fueron muestreadas en este estudio. La figura 2 presenta la ubicación geográfica de los campos y pozos muestreados.

La historia geológica del subsuelo de la

Cuenca Barinas-Apure, está representada por unidades sedimentarias depositadas desde el Cretáceo hasta el Mio-Plioceno (figura 3). Nótese que durante el Albiense ocurrió la sedimentación de las formaciones Aguardiente y Maraca, de ambiente nerítico; mientras que, durante el Cenomaniano-Maestrichtiense, se produjo un avance de la invasión marina con sedimentación de las formaciones Escandalosa, La Morita, Quevedo, Burgüita, Fortuna y Esperanza (González de Juana et al., 1980; CECPV, 2008).

El intervalo "P" de la Formación Fortuna es el productor de petróleo más importante de la zona y el intervalo "O" es considerado equivalente del Miembro Guayacán de la Formación Capacho en la nomenclatura andina (González de Juana et al., 1980; CECPV, 2008).

Durante el Paleoceno y probablemente el Eocene Inferior, ocurrió la formación de anticlinales fallados en la zona de Silvestre-Sinco, así como la emergencia casi total de la cuenca. Posteriormente, ocurrieron procesos geológicos que permitieron el establecimiento de ambientes costeros al norte y fluvio-deltaicos en la zona petrolífera. Seguidamente, en el Eocene Superior ocurrió el levantamiento y reactivación de las trampas Eocenas; para que luego, en el Mioceno se verificaran las sedimentaciones de las formaciones León, Parángula y Río de Yuca, así como el levantamiento inicial de los Andes venezolanos (González de Juana et al., 1980; CECPV, 2008). De las unidades litológicas presentes en la Cuenca Barinas-Apure, las formaciones Escandalosa y Gobernador son las más importantes desde el punto de vista de la producción de crudo. Aunado a ello, en ellas se han detectados paulatinos aumentos de los

cortes de aguas. Por ello, fueron las formaciones escogidas para este estudio y son las que litológicamente se detallan a continuación.

FORMACIÓN ESCANDALOSA

Esta formación, está compuesta por areniscas macizas, cuarzosas muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas y carbonáceas. Las areniscas son de colores gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidos, micáceos y carbonáceas. En el tope de la sección se encuentra una caliza de unos cuatro metros de espesor, gris oscura masiva, cristalina y coquinoidea, con manchas de dolomita microcristalina (CECPV, 2008). La Formación Escandalosa está en contacto concordante en su parte inferior con la Formación Aguardiente; mientras que su contacto superior, también concordante, es marcado por el cambio brusco entre la Caliza Guayacán y las lutitas del Miembro La Morita de la Formación Navay (CECPV, 2008).

FORMACIÓN GOBERNADOR

Esta formación presenta un 80% de areniscas cuarzosas, a veces cuarcíticas, de friables a bien endurecidas, de color gris a pardo, con manchas de óxido de hierro cuando están meteorizadas, localmente conglomeráticas, en capas de espesor de medio a grueso con estratificación cruzada. Tiene un 20% de intercalaciones de limonitas en colores claros y laminaciones lutíticas carbonáceas de gris oscuro a claro. Esta formación descansa sobre el Cretáceo, mientras que infrayace de manera normal y transicional a las calizas del Miembro Masparrito (CECPV, 2008).

METODOLOGÍA

La metodología seguida en este estudio fue dividida en dos fases, que incluyó el trabajo de campo y de laboratorio.

El trabajo de campo consistió en la captación de 18 muestras de agua de formación a nivel de cabezal de pozo, en envases de polietileno de 1,0 y 0,5 L de capacidad herméticamente sellados e identificados, atendiendo a las especificaciones recomendadas por la APHA (2000). Las muestras fueron captadas en pozos de perforación ubicados en los campos Silván, Silvestre, Sinco y Torunos, distribuidos en un área aproximada de unos 630 Km² (figura 2).

Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio donde se procedió a separar la fase acuosa de la orgánica, siguiendo la metodología desarrollada por Connolly et al. (1990). La fase acuosa fue dividida en tres fracciones a fin de realizar las distintas determinaciones previstas en este estudio. A partir del envase de 500 mL, fue tomada una primera porción de 250 mL para realizar la medida de los parámetros pH y conductividad, y la determinación potenciométrica del HCO₃⁻, aplicando el método de Gran (Drever, 1988). Otra porción de 250 mL se empleó para la determinación de los aniones F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ y Br⁻, por cromatografía iónica; mientras que para la determinación de las especies químicas Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y Si, y los elementos traza Li, B, Rb, Sr y Ba, fue utilizada una porción de 500 mL del agua de formación del agua almacenada en el envase de 1,0 L.

Esta alícuota fue previamente filtrada a través de una membrana de 0,45 μm y acidificada con 1mL de HNO₃®, bidestilado para obtener un pH < 2. Seguidamente, se realizó la determinación química aplicando la técnica

de espectrometría de emisión con fuente de plasma acoplado inductivamente.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN

La aplicación del balance iónico sobre los resultados obtenidos para las especies catiónicas y aniónicas, permitió determinar que exceptuando a las muestras captadas en los pozos SIN-20 y SIN-69, el error en el balance de cargas estuvo por debajo del 10%. Este porcentaje es el valor límite sugerido por Hem (1985) para aguas naturales. Palandri y Reed (2001) señalan que para aguas de formación captadas a nivel de cabezal de pozo, el error límite no necesariamente tiene que ser de 10%, debido a la complejidad química de las aguas de formación, asociada a la frecuente presencia de especies iónicas orgánicas, generalmente no determinadas y a la pérdida o ganancia de CO₂.

En la tabla 1 se presentan la nomenclatura de los pozos muestreados, las arenas productoras asociadas a estos pozos, los cortes de aguas reportadas, así como los resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos medidos.

Como puede observarse, los valores de los cortes de agua son relativamente altos, lo que indudablemente indica la existencia de una actual zona de recarga de agua hacia las arenas productoras. En cuanto a los parámetros medidos, la conductividad presenta valores que están entre 370 y 9730 S/cm; sin embargo para pozos de un mismo campo, este parámetro es relativamente uniforme, con la excepción de las muestras captadas en los pozos SIN-20, SIN-81 y SSW-7. Debido a que la conductividad es directamente proporcional a la movilidad y concentración de analitos en solución, puede señalarse la

existencia de pozos con aguas de formación de alta salinidad en los campos Silván, Sinco, Silvestre y Torunos, y aguas de formación de baja salinidad en los campos Sinco y Silvestre. La presencia de aguas de formación con esta segunda característica, reafirma la probable existencia de una zona de recarga activa de agua meteórica hacia el yacimiento productor de hidrocarburo. Por su parte, los valores de pH oscilan entre 7,22 y 8,32. Aguas cuya alcalinidad está dominada por la presencia del ión bicarbonato, presentan valores de pH que se encuentran entre 4,6 y 10,3 (Drever, 1988). Aunque es importante señalar que, debido a la naturaleza de las muestras, así como a la imposibilidad de medir este parámetro en el campo, no se descarta que durante la captación de las mismas, haya ocurrido pérdida o ganancia de CO₂, debido al escape o disolución de gases (Palandri y Reed, 2001). De tal manera que se pudiesen obtener resultados no confiables.

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS DE FORMACIÓN

La tabla 2 presenta las concentraciones en mg/L de las especies catiónicas, aniónicas y sílice disuelta (SiO₂) determinadas; así como, las concentraciones en µg/L de los elementos traza B, Rb, Sr, Ba y Li. Nótese que las especies predominantes para el Campo Silván son los iones Na⁺ y Cl⁻; asimismo, en este campo fueron detectadas las mayores concentraciones de los halógenos F⁻ y Br⁻, lo que puede ser indicativo de la presencia de aguas connatas o fósiles de origen marino o de la disolución de sales evaporíticas (Conti et al., 2000; Tijani, 2004). En ese sentido, la buena correlación obtenida para la relación molar entre Br⁻ y Cl⁻ para las aguas de formación captadas en

los pozos del Campo Silván, pozo SIN-20 (Campo Sinco) y para el Campo Torunos (figura 4) permite apuntar hacia la presencia de aguas fósiles de origen marino. Conti et al. (2000) señalan que el Br⁻ junto al I⁻ son frecuentemente detectados en aguas connatas profundas de carácter marino asociadas a hidrocarburos.

Debe resaltarse además, que las aguas captadas en los pozos muestreados en este campo, presentan los más altos valores en conductividad (tabla 1), por lo que la alta salinidad también puede ser el producto de las diversas reacciones que ocurren entre el fluido y el medio poroso como consecuencia del proceso de interacción agua-roca durante largos períodos de tiempo (Tijani, 2004).

Para el Campo Sinco, las especies más importantes son los iones Na⁺ y HCO₃⁻, exceptuando a la muestra procedente del pozo SIN-20, cuyo anión predominante es el Cl⁻. Estas características pueden estar indicando la presencia de aguas meteóricas en el caso de las aguas cuya composición está dominada por los iones Na⁺ y HCO₃⁻; mientras que en el caso del agua de formación captada en el pozo SIN-20, tal como fue señalado anteriormente, puede señalarse la probable presencia de aguas de origen marino, o que están sufriendo proceso de interacción con sales evaporíticas, debido a que en ella se detectaron los halógenos F⁻ y Br⁻ (Tijani, 2004); además, en este pozo fue medido el mayor valor de conductividad para las aguas de formación muestreadas en este campo (tabla 1). La presencia de aguas de distintas características dentro de un mismo campo, permite indicar la posible existencia de procesos de compartamentalización dentro del yacimiento, como respuesta frente a las complejidades tectono-estructurales e

hidrogeológicas de la cuenca.

Por su parte, en las aguas de formación capturadas en El Campo Silvestre, también predominan los iones Na^+ y HCO_3^- , por lo que se puede señalar que se trata de aguas de similar origen y comportamiento a las aguas del Campo Sinco. Mientras que, las aguas de formación provenientes de los pozos presentes en el Campo Torunos, muestran características similares a las aguas del Campo Silvan, es decir, predominancia de los iones Na^+ y Cl^- , presencia de los halógenos F^- y Br^- y altos valores de conductividad.

En cuanto a los tipos de aguas de formación presentes en la zona de estudio, el diagrama de Piper construido para tal fin (figura 5), permitió verificar la existencia de dos facies hidrogeoquímica, a saber: tipo $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ y tipo $\text{Na}^+ \cdot \text{HCO}_3^-$. Las aguas de formación de la facies tipo $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$ identificadas en este estudio, en general están caracterizadas por presentar altas concentraciones de Ca^{2+} y Sr , indicando que podrían estar asociadas a la presencia de aguas connatas de origen marino; mientras que la del tipo $\text{Na}^+ \cdot \text{HCO}_3^-$, estarían referidas a la presencia de aguas meteóricas de reciente infiltración. Tijani (2004) señala que las aguas connatas del tipo $\text{Na}^+ \cdot \text{Cl}^-$, están frecuentemente enriquecidas en Ca y Sr , y disminuidas en Mg y SO_4^{2-} .

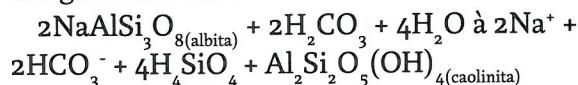
Referente a los elementos minoritarios y traza Rb y Li , sus mayores valores en concentración son observados en las aguas de formación altas en Na^+ , K^+ y Cl^- , y por consecuencia, con altos valores de conductividad. Estos elementos pueden ser enriquecidos por intercambio iónico a través de los procesos de interacción agua-roca, durante la migración y evolución geoquímica de las aguas (Collins, 1975; Sanders, 1991). El proceso de disolución

incongruente de aluminosilicatos, en algunos casos relacionados a la adición de CO_2 , es la fuente principal de Na^+ , Li^+ , B y F^- hacia las aguas de formación (Varsányi et al., 1997; Cheng et al., 2006). Por otro lado, en la tabla 2 son observadas altas concentraciones en los elementos Sr y Ba , para las aguas de formación cuyos valores de Ca^{2+} son relevantes en comparación con el conjunto de las aguas estudiadas. Estos elementos están geoquímicamente asociados, por lo que la presencia de los mismos puede estar asociada a la disolución de calizas durante el proceso de interacción agua roca. En el subsuelo de la cuenca Barinas-Apure, se ha reportado la presencia de calizas y de rocas con alto contenido de carbonatos (González de Juana et al., 1980).

Por su parte, el B muestra un comportamiento similar al observado para Br^- ; vale decir, son detectadas altas concentraciones en las aguas de formación captadas en los pozos del Campo Silván, pozo SIN-20 (Campo Sinco) y para los correspondientes al Campo Torunos. La relativamente alta concentración de esta especie, puede ser utilizada para indicar que su origen puede estar asociado a la interacción de aguas con sedimentos depositados en ambiente marino. En ese sentido, González de Juana et al. (1980) y CECPV (2008) señalan que las arenas productoras de las formaciones Escandalosa y Gobernador, fueron originadas en cuencas sedimentarias asociadas a este ambiente.

Tijani (2004) y Cheng et al. (2006) señalan que el origen de la composición química del agua de formación, puede atribuirse a una variedad de mecanismos dentro de los que destacan la presencia de aguas de origen marino o meteórico; no obstante, uno de los más importantes está referido al proceso de

interacción agua-roca. A fin de visualizar la probable influencia de este proceso, fueron construidas las relaciones iónicas molares $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ frente a Na^+ y Na^++K^+ en función de HCO_3^- , propuestas por Cheng et al. (2006). El déficit de Na^+ pudo ser comparado con la sumatoria de la concentración de $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ (figura 6), asumiendo que este déficit puede ser causado por el proceso de intercambio catiónico, representado por la línea recta, donde la reacción involucra el intercambio de 2 Na^+ por 1 Ca^{2+} , de tal manera que la relación del déficit de Na^+ y $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ debe ser 2:1; no obstante, obsérvese que las muestras se ubican hacia el exceso de Na^+ , cuyo aporte parece estar asociado a la disolución de silicatos y/o aluminosilicatos. Esto es corroborado mediante la figura 7, donde la comparación del Na^+ con respecto al HCO_3^- , indica que el Na^+ presente en las muestras de agua de formación que están alrededor de la recta que describe el exceso de Na^+ , fue generado por la disolución de aluminosilicatos como la albita, proceso que puede ser ejemplificado mediante la siguiente reacción:



Las muestras de agua de formación que caen en torno a la línea recta, corresponden a las de la facies hidrogeoquímica del tipo $\text{Na}^+-\text{HCO}_3^-$, características de aguas meteóricas, captadas en los campos Sinco y Silvestre; mientras que los puntos que se desvían, producto del exceso de Na^+ , son de la facies Na^+-Cl^- , que como fue señalado, se refieren a las muestras de los campos Silván y Torunos y al pozo SIN-20. El exceso de Na^+ permite apoyar la probable presencia de aguas connatas marinas o de aguas salinas que han sufrido procesos de evaporación (Tijani, 2004; Cheng et al., 2006).

TIPOS DE AGUAS DE FORMACIÓN

El diagrama de Stiff, es una de las herramientas hidrogeoquímicas usadas en muchos estudios de aguas de formación, con el fin de identificar el o los tipos de aguas presentes. Estos diagramas consisten en la proyección de las concentraciones en meq/L de las especies catiónicas Na^++K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} y aniónicas Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} , generando polígonos cuya forma es típica de la presencia de aguas connatas fósiles de origen meteórico o marino, así como de aguas meteóricas, marinas y/o mezclas, esto atendiendo a los procesos geológicos imperantes y a la historia geológica de la zona estudiada. En ese sentido, las figuras 8 y 9 presentan la distribución espacial de estos diagramas para las aguas de formación asociadas a las formaciones Escandalosa (arenas O y P) y Gobernador (arenas A y B).

En la figura 8 es mostrada la distribución espacial de los diagramas de Stiff para las aguas de formación captadas en pozos que atraviesan las arenas O y P de los campos Sinco, Silvestre y Silván. Se observan dos tipos de diagramas de Stiff, correspondientes a aguas meteóricas y a aguas connatas probablemente de origen marino.

La presencia de aguas de formación con características meteóricas, pueden ser entendidas como un posible proceso de recarga actual en la región sur de la zona de estudio. Desde el punto de vista estructural, esta zona está fuertemente fracturada, con fallas que cortan verticalmente a la Formación Pagüey, que suprayace a las formaciones Gobernador y Escandalosa. Estas fallas afloran en algunos lugares, como en el río Pagüey (CECPV, 2008). Esto permite señalar que la existencia de áreas falladas, pueden facilitar la recarga de aguas meteóricas hacia el subsuelo, a profundidades

tales que alcancen las arenas productoras de hidrocarburos. Esto a su vez, permite explicar el alto hidrodinamismo observado a través del paulatino aumento en el contenido de agua en los últimos años.

Por otro lado, puede existir algún grado de compartamentalización en las arenas O y P del Campo Sinco, que explica la presencia del agua de formación captada en el pozo SIN-20, cuyo diagrama de Stiff indica un origen distinto a las aguas muestreadas en ese mismo campo.

Hacia el norte de la zona de estudio, se ubican las aguas de formación cuyo diagrama de Stiff tienen características asociadas con aguas de origen connato de probable origen marino (figura 8). Estas se encuentran homogéneamente distribuidas en este sector, debido a una posible interconexión hidráulica en el subsuelo. La presencia en este sector, de espesas secciones de lutitas correspondientes al Miembro La Morita de la Formación Navay, no permiten la recarga directa de aguas meteóricas hacia estas arenas productoras, sin embargo su corte de agua, puede señalar un probable proceso actual de dilución de las aguas que percolan a través de la arenas O y P, desde la zona sur donde se infiltran, en dirección norte. Por su parte, en la figura 9 se muestra la distribución espacial de los diagramas de Stiff para las aguas de formación captadas en pozos que atraviesan las arenas A y B de los campos Sinco, Silvestre y Torunos. Las aguas de formación cuyos diagramas son similares a los obtenidos para aguas meteóricas, también están espacialmente ubicadas al sur de la zona de estudio, mientras que las de características connatas, se ubican al norte. Estos resultados coinciden con los obtenidos para las arenas O y P para el Campo Sinco.

Esto puede indicar que, tanto las arenas de la Formación Gobernador como de la Formación Escandalosa fueron afectadas por los mismos procesos tectónicos, que les confieren similares comportamientos estructurales estratigráficos e hidrodinámicos. Aunado a ello, la Formación Gobernador está en contacto con la lutitas de Pagüey, pero al sureste, entre los campos Mingo y Sinco, dichas lutitas se encuentran lateralmente desplazadas de las areniscas de Gobernador (CECPV, 2008). Por tal motivo, estas arenas pueden también ser recargadas con aguas meteóricas que percolan a través de los diversos sistemas de fallas existentes en este sector, donde el río Pagüey, a través de los sistemas de fracturas que afloran en él, probablemente juega un papel importante en este proceso.

En el mismo orden de ideas, las figuras de Stiff obtenidas en el Campo Torunos, son características de aguas que están sufriendo procesos de mezclas, como consecuencia del proceso de dilución de las aguas connatas por el avance de las aguas meteóricas infiltradas a través de los sistemas de fallas.

MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

La proyección en profundidad de las figuras de Stiff obtenidas para las aguas de formación captadas en los pozos pertenecientes a los campos Silván, Silvestre, Sinco y Torunos, en un diagrama que muestra la sección estructural y litológica de la Subcuenca de Barinas, así como la ubicación y profundidad de los pozos muestreados, permitió proponer un modelo hidrogeológico de la zona estudiada, a fin de ofrecer una mejor visualización del comportamiento de las aguas de formación estudiadas. La figura 10 muestra el modelo hidrogeológico

generado. En la antes citada figura puede observarse además, la complejidad geológica estructural sobre la cual están ubicados los campos Silván, Silvestre, Sinco y Torunos. Esta complejidad se manifiesta a través de la presencia de una serie de fallas inversas y normales distribuidas de sur a norte, que confinan los distintos campos petroleros en bloques. Muchas de estas fallas, tienen expresiones superficiales, particularmente hacia el sur de la zona de estudio, confiriéndole a esta región, características como potencial zona de recarga. Asimismo, nótese una tendencia general al norte en el buzamiento de las unidades geológicas, factor que junto a las estructuras geológicas y la gravedad, ejercen un fuerte control sobre la dirección y sentido de los fluidos.

Por su parte, la proyección de las figuras de Stiff permite reafirmar la presencia de aguas connatas de probable origen marino hacia el norte y meteóricas hacia el sur. Tal comportamiento señala que las aguas de estos campos se encuentran compartimentalizadas, a pesar de pertenecer a una misma arena. El buzamiento de las unidades, junto al tiempo de residencia, son los posibles factores que controlan la presencia de las aguas connatas hacia el norte de la zona de estudio.

La predominancia de aguas meteóricas hacia el sur de la zona de estudio, constata que el sector altamente fracturado y fallado donde se encuentran los campos Sinco y Silvestre, constituye la principal zona de recarga de las aguas de formación estudiadas; sin embargo, esta recarga va disminuyendo en intensidad en dirección al norte.

Finalmente, el modelo propuesto permite visualizar el probable grado de interconexión hidráulica vertical y lateral entre las arenas

productoras, así como el grado de compartimentalización, particularmente entre las aguas de formación asociadas a los Silvestre-Sinco con Silván-Turonos.

CONCLUSIONES

Las aguas de formación captadas en pozos de los campos Silván y Torunos son de la facies tipo Na^+ y Cl^- ; mientras que las capturadas en campos Sinco y Silvestre, son del tipo Na^+ y HCO_3^- ; sin embargo, las aguas de Torunos, muestran cierto carácter de mezcla.

La composición de las aguas de formación está controlada por la probable influencia de aguas connatas de origen marino y por procesos de interacción agua-roca que incluye la disolución de calizas y de aluminosilicatos.

Las aguas de formación captadas en el Campo Sinco, exceptuando a la capturada en el pozo SIN-20, y las del Campo Silvestre, son de origen meteórico; mientras que las aguas de formación de los campos Silván y Torunos, junto al agua de formación del pozo SIN-20, son connatas de origen marino.

La tendencia espacial de los diagramas de Stiff, tanto en planta como a profundidad, así como los patrones de fallas y fracturas, permiten señalar la existencia de una zona de recarga activa en el Campo Sinco, al sur de la zona de estudio.

La compartimentalización observada puede ser consecuencia de las condiciones tectono-estratigráficas de la cuenca, de la profundidad del pozo, de la dirección de flujo, del tiempo de residencia y de los procesos de interacción agua roca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Petróleos de Venezuela S.A., a través del

Proyecto VIPA (Visión País), cuyo financiamiento permitió alcanzar las etapas de campo y laboratorio propuestas en este estudio.

REFERENCIAS

- American Public Health Association (APHA), 2000. Standard methods for examination of water and waste water. Washington, 20th Edition, 920 p.
- Cheng, J., McIntosh J., Xie, X., and Jiao, J.J., 2006. Hydrogeochemistry of formation water wih implication to diagenetic reactions in Sanzhao depression and Qijia-gulong depression of Songliao Basin, China. Journal of Geochemical Exploration, 88, 86-90.
- Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela (CECPV, 2008). <http://www.pdv.com/lexico>, citado diciembre 2008.
- Collins, A., 1975. Geochemistry of oilfield waters. Elsevier Scientific, Amsterdam, Holand, 426 p.
- Connolly, C., Walter, L., Baadsgaard, H., and Longstaffe, F., 1990. Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada
- Sedimentary Basin. Applied Geochemistry, 5, 375-395.
- Conti, A., Sacchi, E., Chiarle, M., Martinelli, G., and Zuppi, G., 2000. Geochemistry of the Po plain (Northern Italy): on overview. Applied Geochemistry, 15, 51-65.
- Drever, J., 1988. The geochemistry of natural waters. 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA, 437 p.
- González de Juana, C., Iturralte de A., J. Ma y Picard, X., 1980. Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Ediciones Foninves, Tomos I y II, 1031 p.
- Jørgensen, N., 2002. Origin of shallow saline groundwaters on the Island of Læsø, Denmark. Chemical Geology, 184, 359-370.
- Medina, R., 1981. Geoquímica de las aguas de formación asociadas a hidrocarburos en la región sur-central de la Cuenca Oriental de Venezuela. Tesis de Maestría. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 169 p.
- Montoroi, J., Grünberger, O., and Nasri, S., 2002. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. Applied Geochemistry, 17, 1047-1067.
- Palandri, J., and Reed, M., 2001. Reconstruction of in situ composition of sedimentary formation water. Geochemica et Cosmochimica Acta, 65, 11, 1741-1767.
- Sanders, L., 1991. Geochemistry of formation waters from the Lower Silurian Clinton Formation (Albion Sandstone). The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 75, 1593-1608.
- Tijani, M.N., 2004. Evolution of saline waters and brines in the Benue-Trough, Nigeria. Applied Geochemistry, 19, 1355-1365.
- Ungría, A., 1981. Estudio geoquímico de las aguas de formación, Área Mayor de Oficina, estado Anzoátegui II. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 94 p.
- Varsányi, I., Matray, J.-M., and Ó.Kovács, L., 1997. Geochemistry of formation waters in the Pannonian Basin (southeast Hungary), Chemical Geology, 140, 89-106.
- Vásquez, Y., 1998. Caracterización geoquímica de las aguas de formación del Domo Sur, Campo Motatán, Cuenca del Lago de Maracaibo. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 125 p.
- Vierma, L., 1979. Estudio geoquímico de las aguas de formación, Área Mayor de Oficina, estado Anzoátegui. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 69 p.

Tabla 1. Arenas productoras muestreadas, porcentajes de agua y parámetros medidos en las aguas de formación captadas.

Campos	Pozos	Arena	% de agua	pH ± 0,01	Conductividad ± 1 (µS/cm)
Silvan	SNW6	P-1/2	96,31	7,53	7990
	SNW7	P-1/2	95,80	7,43	9730
	SNW22	O	79,43	7,48	6230
	SNW302	P-1/2	91,60	7,74	9550
Sinco	SIN12	A/B	95,07	7,85	708
	SIN20	P	92,22	7,59	3230
	SIN33	O	95,38	7,22	600
	SIN39	A/B	92,01	7,43	370
Silvestre	SIN40	O	97,04	7,78	590
	SIN69	A/B	82,14	7,98	412
	SIN81	O	40,15	7,74	1273
	SIN82	A/B	95,16	7,28	400
Torunos	SSW5	B	73,73	7,68	606
	SSW7	P-1	85,07	7,38	1109
	SSW31	B	97,23	8,25	521
	SSW48	B	93,24	8,28	575
Torunos	TOR3	A/B	57,34	8,32	5620
	TOR13	A/B	61,72	7,87	5020

Tabla 1. species mayoritarias, minoritarias y traza determinadas en las aguas de formación estudiadas. Las concentraciones para los aniones, cationes y sílice disuelta (SiO_2) se expresan en mg/L; mientras que los elementos traza, señalados en asteriscos, se expresan en µg/L.

Pozos	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SiO_2	Rb^+	F	Br	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	*B	*Sr	*Ba	*Li
SNW6	1170	257	41,00	615	54,7	4,160	25,20	9,15	3259,93	436,32	402	11800	29900	11500	11200
SNW7	1170	283	55,00	665	53,3	4,650	21,86	8,92	3622,43	12,31	388	12700	35600	11400	12100
SNW22	1010	198	34,20	249	48,5	2,680	20,63	7,30	2345,08	28,75	364	8870	16600	445	7880
SNW302	1330	289	51,00	691	52,6	5,740	21,71	10,98	3751,48	10,58	350	12700	382	134	12500
SIN12	211	16	0,27	10,2	51,9	0,260	< 0,27	< 0,29	< 1,26	1,83	557	1300	252	136	1660
SIN20	511	171	5,66	109	32,9	1,980	12,50	3,13	1511,74	23,67	218	2670	5730	2730	6620
SIN33	140	16	0,39	19	47,4	0,241	1,66	< 0,29	5,45	11,33	454	927	466	301	1670
SIN39	80	14	0,16	6	41,8	0,237	0,34	< 0,29	3,01	15,14	253	552	205	70	1370
SIN40	106	42	0,95	28	46,5	0,574	2,43	< 0,29	85,05	10,51	320	909	1220	1150	2290
SIN69	104	12	0,17	6	39,7	0,228	1,94	< 0,29	3,54	74,47	296	671	178	60	1320
SIN81	235	71	3,42	52	42,5	0,851	10,85	< 0,29	180,36	6,42	504	2570	2150	1510	3560
SIN82	98	12	0,16	6	42,7	0,222	1,40	< 0,29	1,81	8,78	286	654	221	65	1467
SSW5	178	14	0,29	11	37,7	0,267	1,79	< 0,29	5,88	9,85	480	1200	414	57	1500
SSW7	64	134	0,86	17	60,1	0,811	1,08	< 0,29	83,38	15,97	576	2910	174	600	2000
SSW31	153	12	0,21	11	49,0	0,262	< 0,27	< 0,29	< 1,26	1,85	429	829	321	112	1530
SSW48	153	26	0,36	9	47,6	0,274	0,94	< 0,29	33,46	11,06	434	992	418	112	1650
TOR03	1450	46	2,18	33	53,6	0,448	10,93	4,03	1910,88	101,41	1134	12000	1050	425	2810
TOR13	1330	46	2,05	26	46,8	0,437	8,44	3,43	1741,19	91,48	1047	11400	477	434	2660

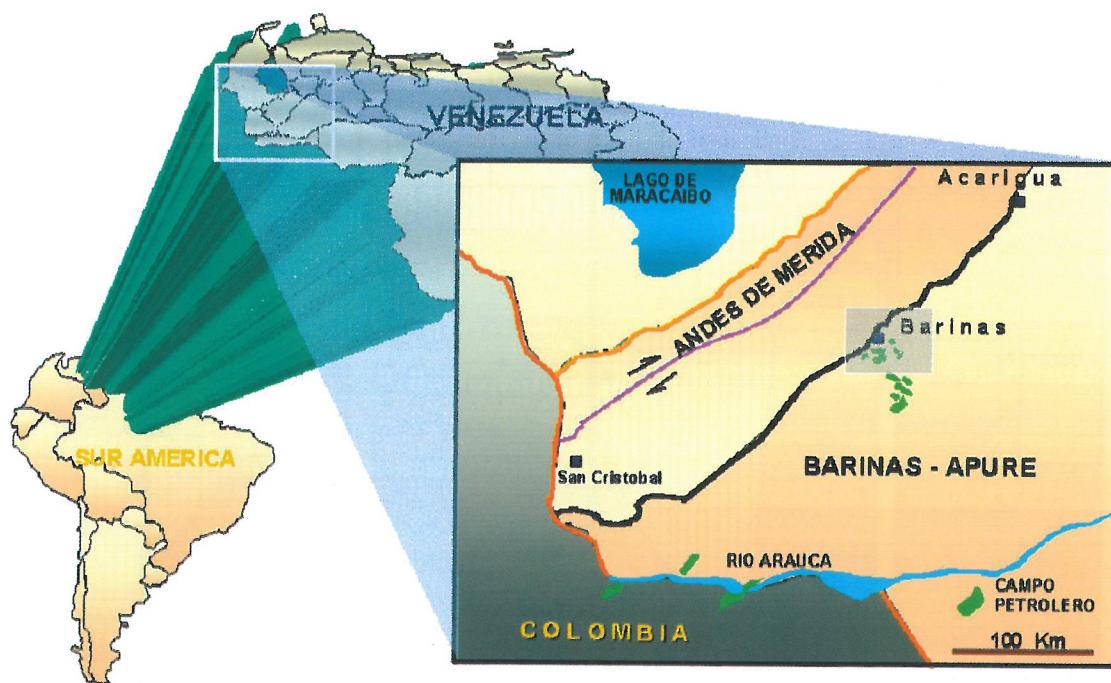
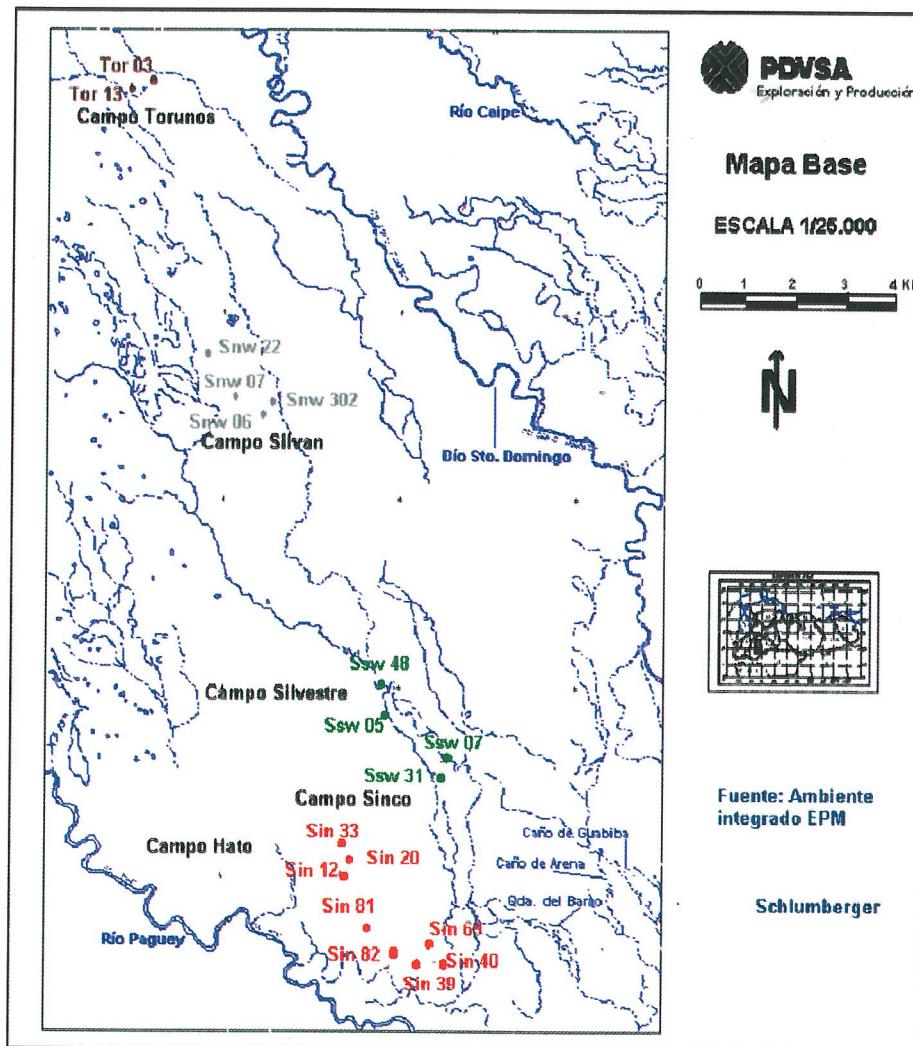


Figura 1. Ubicación geográfica de la Cuenca Barinas-Apure.

Figura 2. Ubicación de los pozos muestreados en los campos Silván, Silvestre, Sinco y Torunos, en la Subcuenca de Barinas.



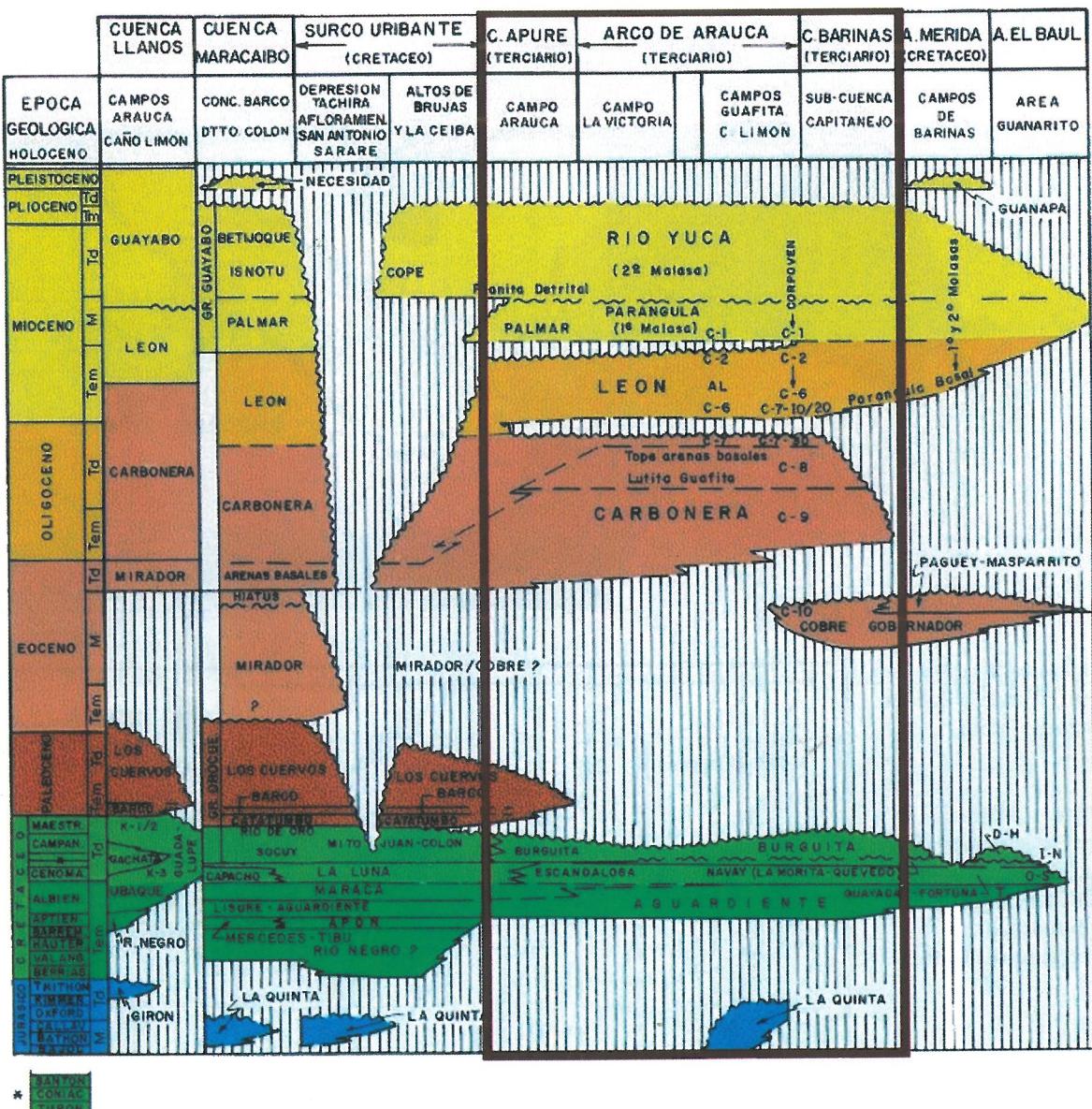
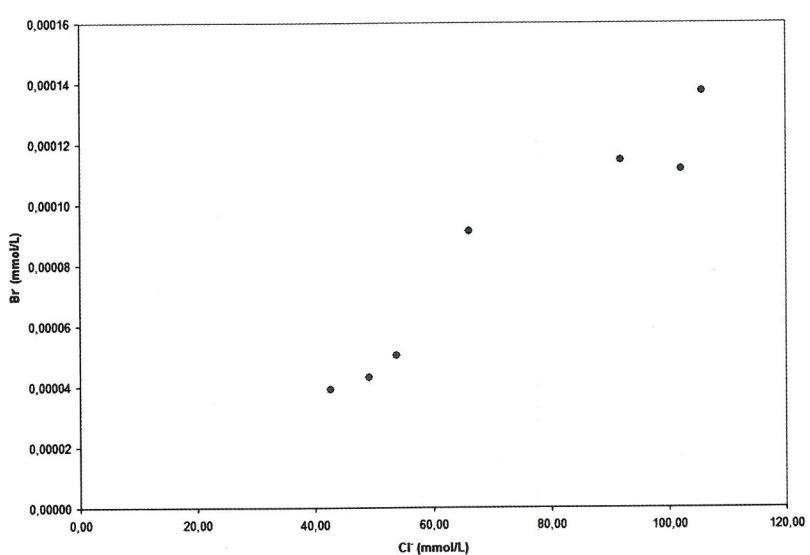


Figura 3. Marco geológico estratigráfico de la Cuenca Barinas-Apure, Venezuela (CECPV, 2008).

Figura 4. Relación molar de Br- frente al Cl- para las aguas de formación captadas en los campos Silván, Torunos y pozo SIN-20 (Sincro).



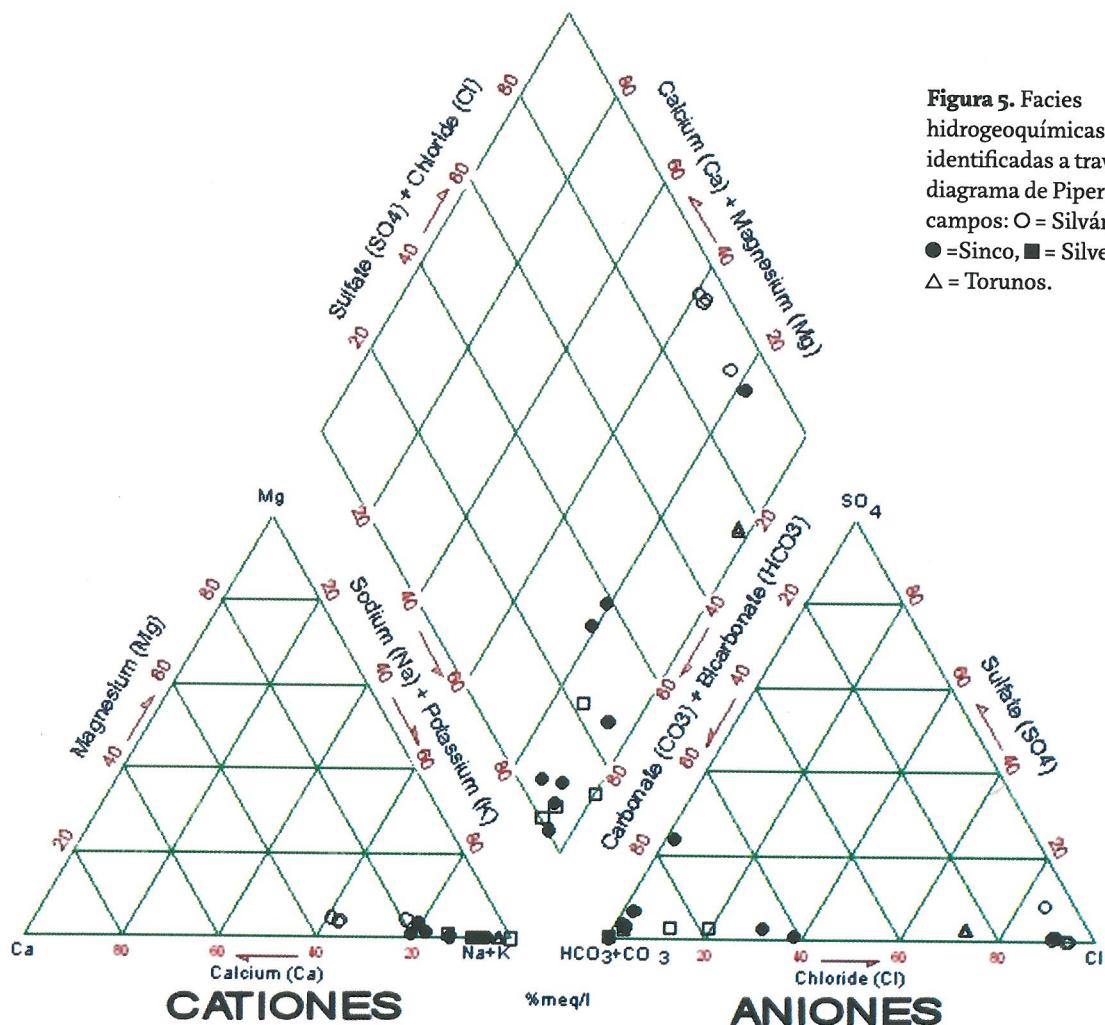


Figura 5. Facies hidrogeoquímicas identificadas a través del diagrama de Piper en los campos: O = Silván, ● = Sinco, ■ = Silvestre y △ = Torunos.

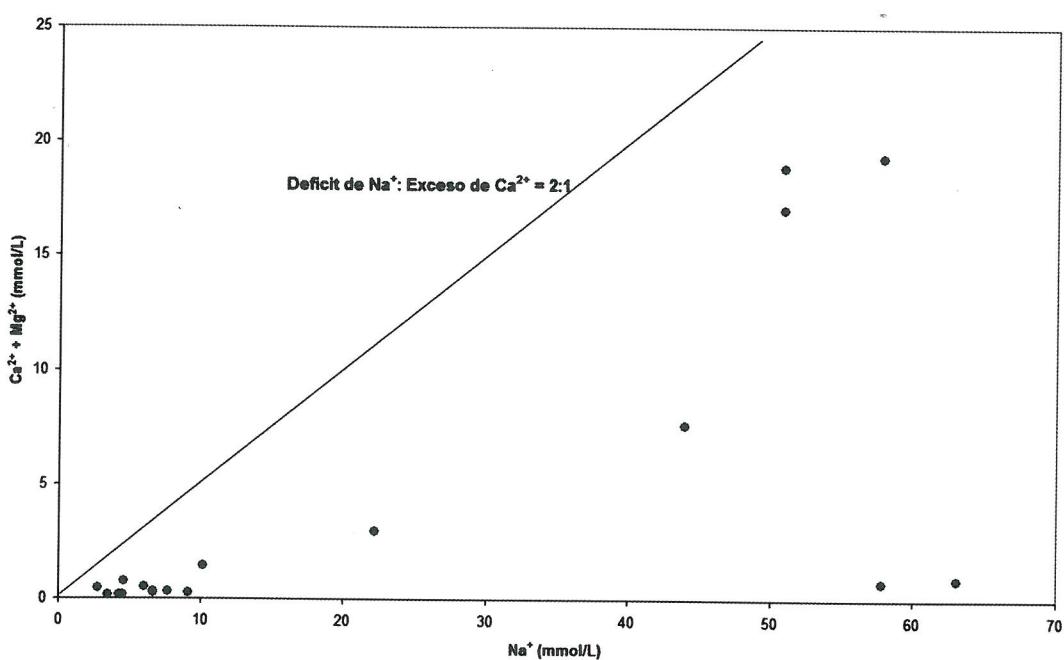


Figura 6. Relación molar de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ frente al Na^+ para las muestras de aguas de formación estudiadas.

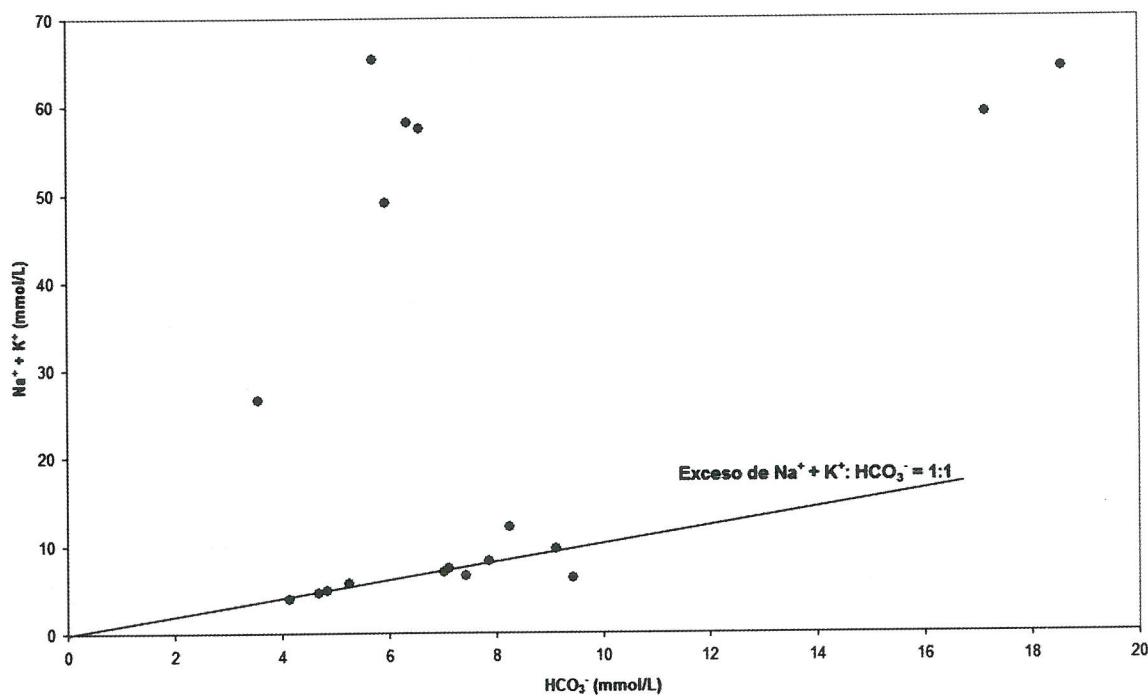
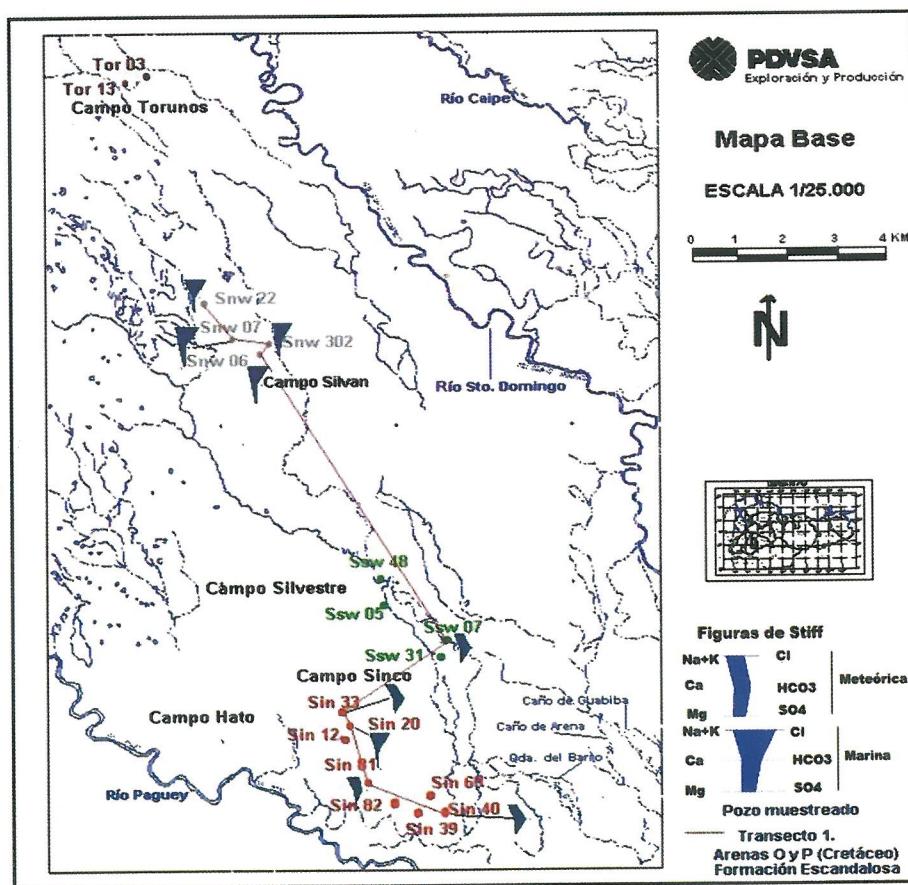


Figura 7. Relación molar de Na⁺+K⁺ en función del HCO₃⁻ para las muestras de aguas de formación estudiadas.

Figura 8. Ubicación espacial de los diagramas de Stiff pertenecientes a las arenas O y P (Formación Escandalosa) en los campos Sinco, Silvestre y Silván.



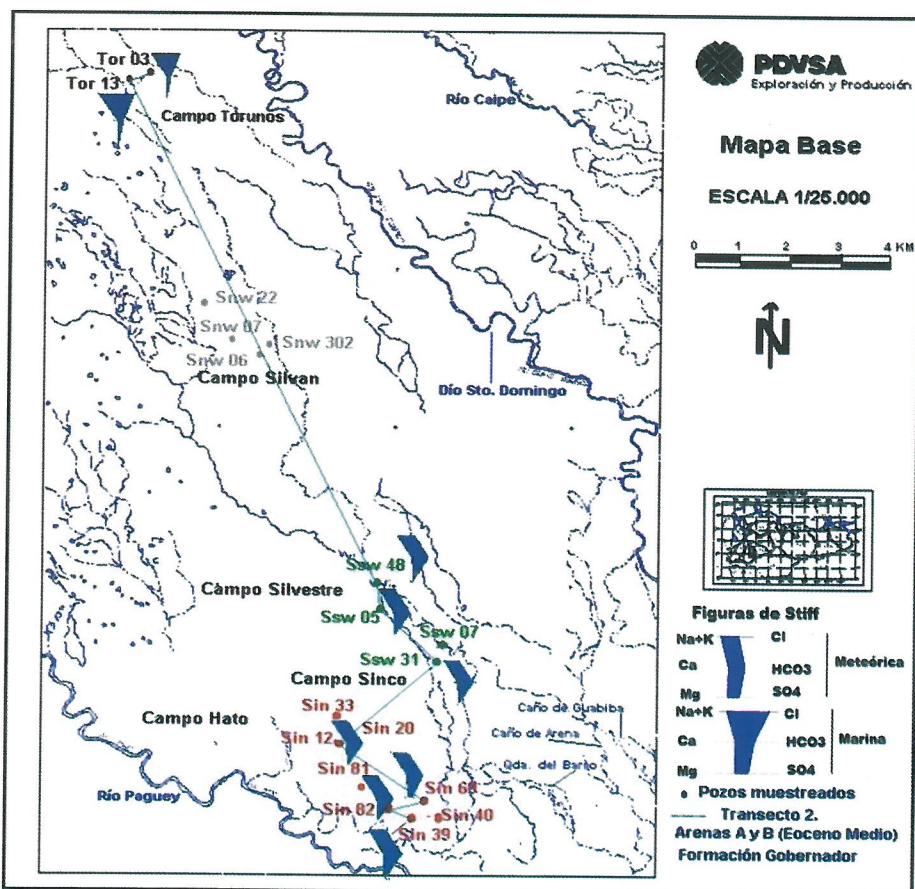


Figura 9. Ubicación espacial de los diagramas de Stiff pertenecientes a las arenas A y B (Formación Gobernador) en los campos Sinco, Silvestre y Torunos.

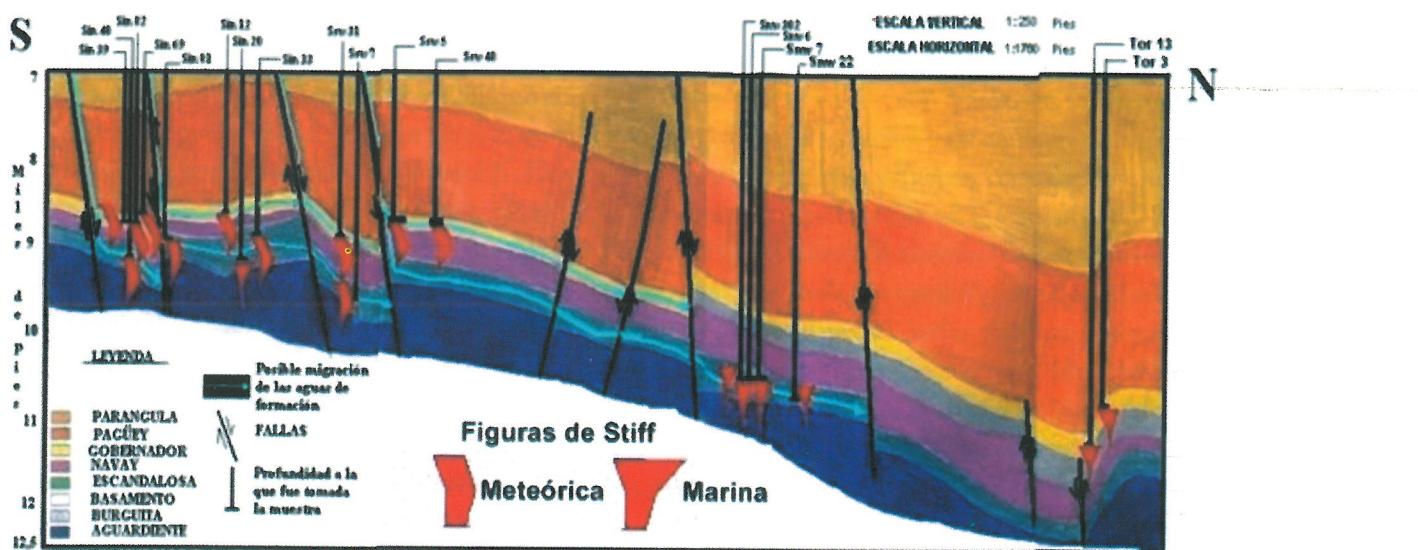


Figura 10. Modelo hidrogeológico del transecto sureste-noroeste de la Subcuenca de Barinas, donde se muestra la sección estructural, estratigráfica y litológica; así como la ubicación y profundidad de los pozos y figuras de Stiff para cada uno de ellos.