

HIDRODINÁMICA E HIDROGEOQUÍMICA DEL PIEDEMONTA LLANERO COLOMBIANO: HIPÓTESIS DE RUTAS DE MIGRACIÓN A PARTIR DE TÉCNICAS HIDROGEOLOGICAS

González Uribe, G. A¹; García Bautista, D. F²; Mantilla Figueroa, L. C³; Rodríguez Rincón, J. A⁴

RESUMEN

La nueva información de presión de formación, fisicoquímica e isotopía ambiental, permitieron la elaboración de hipótesis preelminares sobre el origen y movimiento del agua de formación asociada a hidrocarburos en Piedemonte y parte central de los Llanos Orientales. En Piedemonte, se sugiere la presencia de sistemas hidráulicos individuales sobrepresionados, asociados a cada estilo estructural; encontrándose un sistema levemente subpresionado al sur de Cupiagua. El origen de las aguas de formación es confuso, encontrándose aguas connatas con bajas salinidades, aguas empobrecidas isotópicamente con altas salinidades y aguas con desviaciones en las trayectorias isotópicas, sugiriendo la acción de procesos de mezcla y/o interacción roca-fluido. Se determinó flujo SW, con una anomalía de flujo W-SW (Cusiana), favorecida por canales permeables originados por la yuxtaposición de litologías permeables.

En Llanos, se sugieren sistemas hidráulicos levemente sobrepresionados (menos que en Piedemonte), con zonas de subpresión para campos paralelos y adyacentes al frente de deformación. La isotopía sugiere la acción de procesos de mezcla y/o interacción roca fluido. Anomalías de presión y fisicoquímica, sugieren mezcla de fluidos en forma ascendente, con plumas dispuestas paralelamente y adyacentemente al frente de deformación. El flujo es N-NW desde el SE, hacia zonas subpresionadas al centro de la cuenca.

Palabras Claves: Hidrodinámica, Hidrogeoquímica, Migración, Piedemonte, Llanos Orientales

FOOTHILL COLOMBIAN PLAIN, HYDRODYNAMIC AND HYDROGEOCHEMICAL PATHWAY HYPOTHESIS, HYDROGEOLOGIC METHODS.

ABSTRACT

New information of formation pressure, groundwater physicochemical and environmental isotopes, allowed to carry out hypothesis on the origin and movement of formation water associated to hydrocarbons in Foothill and central part of the Llanos Orientales basin. In Piedemonte, overpressured individual hydraulic systems are suggested, associated to each structural style; founding a slightly subpressured system to the south of Cupiagua. The formation water origin is not clear, founding cognate waters with low salinities, waters with isotopic impoverishment and high salinities, and waters with deviations in the isotopic trajectories, that suggest action of mixture processes and/or interaction rock-fluid. It has been established a SW flow, with a W-SW anomaly (Cusiana), which is favoured by permeable channels originated by juxtaposition of permeable lithologies.

In Llanos, slightly overpressured hydraulic systems are suggested (less than in Piedemonte), with subpressured zones for field parallel and adjacent to the deformation front. Isotopic analysis suggests the action of mixture processes and/or interaction fluid-rock. Pressure and physicochemical anomalies, suggest mixture of fluid in ascending form, with plumes parallel and adjacent to the deformation front. The flow is N-NW from SE, towards subpressured zones in the basin.

Key words: Hydrodynamic, Hidrogeochemical, Migration, Piedemonte, Llanos Orientales

¹ Grupo de Investigación MINPETGEO-UIS geogagu@yahoo.com.ar, 300-2785068

² ECOPETROL-ICP diego.garcia@ecopetrol.com.co

³ Universidad Industrial de Santander UIS lmantil@uis.edu.co

⁴ ECOPETROL jesus.rodriguez@ecopetrol.com.co

INTRODUCCION

La cuenca de los Llanos Orientales y el Piedemonte llanero constituyen un área que ha sido de interés exploratorio por más de 3 décadas. Durante este periodo han sido tomadas diferentes medidas de presión y análisis fisicoquímicos del agua de formación, con el fin de caracterizar la naturaleza y dinámica de los hidrocarburos presentes. La interpretación de estas medidas de presión en términos de potencial de fluido y cabeza hidráulica ha permitido la interpretación de diferentes y complejos sistemas hidrodinámicos de flujo. El conocer el origen, dinámica y procesos geoquímicos sufridos por el agua asociada a las acumulaciones recientes de hidrocarburos, permite delinear la existencia de posibles rutas de flujo, predecir procesos diagenéticos en los reservorios, solucionar problemas asociados a producción como el movimiento de fluidos detrás del casing, el ascenso de las tablas

de agua en el yacimiento y la identificación de mezclas de fluidos incompatibles en las formaciones. La base para la realización de este estudio, corresponde a la información proveniente de análisis fisicoquímicos e isotópicos recopilados de las aguas de formación tomadas durante las pruebas de producción realizadas en la etapa de completamiento de pozos exploratorios, muestreos durante la producción, realizados por las diferentes operadoras del área y muestras recolectadas durante una campaña de muestreo realizada en 2003. La información de presiones corresponde a medidas DST, registros continuos de presión RFT y MDT. Las diferentes unidades hidroestratigráficas previamente descritas por Bachu et al (1995) han sido objeto de análisis. A continuación se discuten los resultados de la integración del análisis de los mapas de superficies potenciométricas realizados, los perfiles de presión elevación y los análisis fisicoquímicos de aguas de formación y su relación con el sistema de flujo regional.

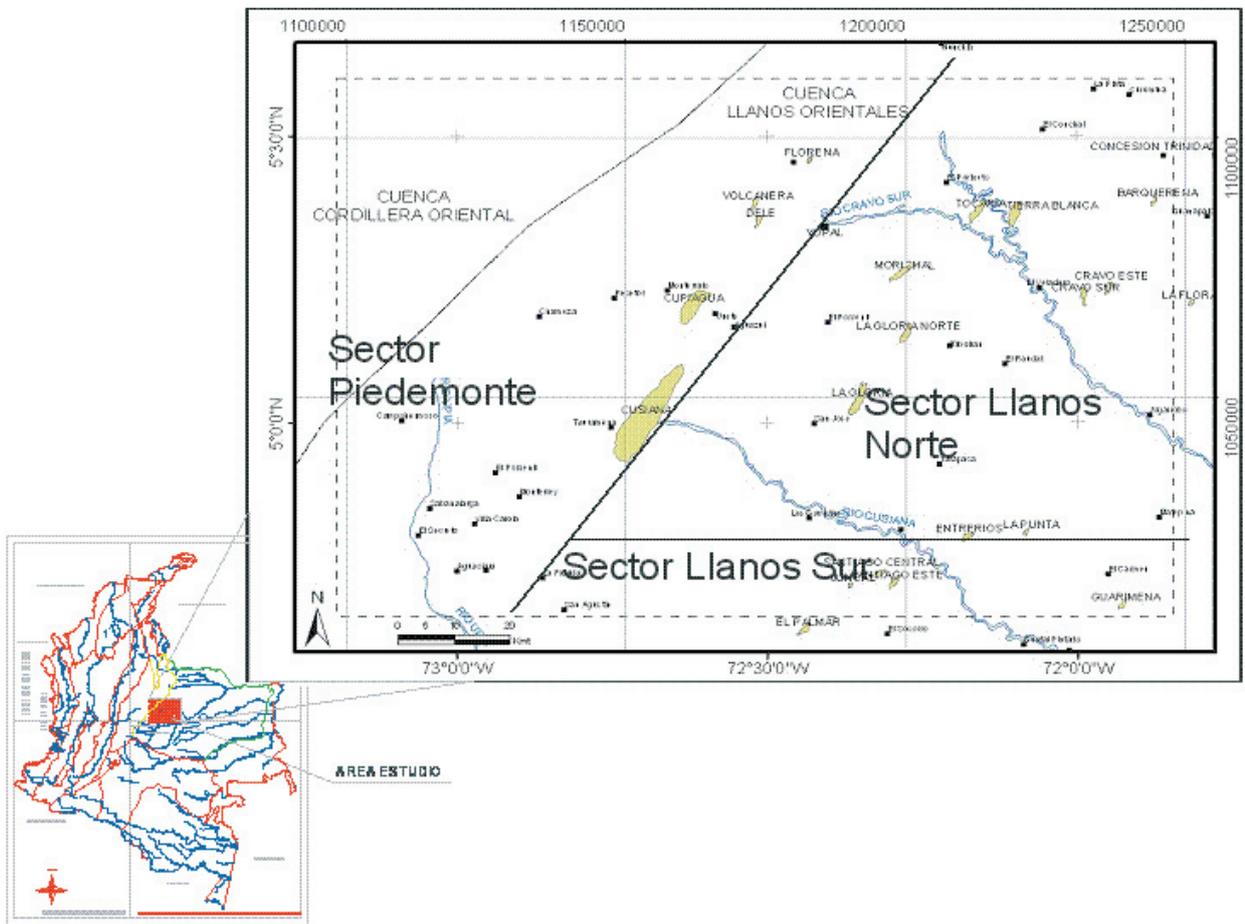


FIGURA 1. Localización Área de Estudio.

AREA DE ESTUDIO

La cuenca Llanos Orientales es una cuenca sedimentaria subandina *foreland* (Bachu et al, 1995) localizada en Colombia entre la Cordillera Oriental y el Escudo precámbrico de Guyana. El Piedemonte Llanero Central está localizado en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental Colombiana (FIGURA 1), el cual corresponde a una zona de cabalgamiento frontal. Se orienta en dirección SO-NE extendiéndose unos 100 kilómetros al norte y sur del pueblo de Yopal. Esta provincia está limitada hacia el oeste por el sistema de fallas de Guaicaramo y al este por el sistema de fallas de Yopal – Borde Llanero (Martínez, J.A, 2003).

Por su parte, el sector llanos es el resultado de una compleja evolución tectonoestratigráfica que va desde el Jurásico hasta el Mioceno donde como resultado del rápido levantamiento tectónico de la Cordillera Oriental resulta en la formación de una cuenca tipo *foreland* con grandes espacios de acomodación (Cooper et al, 1995; Pindell et al, 1997; Villamil, 1999).

FLUJO Y CABEZA HIDRAULICA

El flujo de fluidos en una cuenca es controlado por el gradiente de cabeza hidráulica, ocurriendo este de zonas con alto potencial a zonas de bajo potencial (Dahlberg, 1995). El potencial del fluido es la energía mecánica por unidad de masa, el cual es función de la presión del fluido y su densidad respecto a un datum como es descrito por la ley de Darcy (De Marsily, 1986; Dahlberg, 1995).

La cabeza hidráulica se define como la altura que puede ascender un fluido con respecto a un nivel de referencia o datum (generalmente nivel del mar), debido al trabajo ejercido por el potencial del mismo, en contra de la gravedad y en virtud a la presión que tiene a una profundidad Z medida desde el datum. La cabeza hidráulica es la suma algebraica de la cabeza de presión y la cabeza de elevación.

$$H = \frac{P}{\rho_w g} + Z \quad (1)$$

Donde H = Cabeza Hidráulica (m), g = aceleración debida a la gravedad (m/s^2), Z = Profundidad de la

formación relativa al datum (elevación registrada en TVDSS), P = Presión de Formación (kPa) y ρ = Densidad del fluido (kg/m^3). Para los cálculos de cabeza hidráulica de debe determinar un gradiente hidrostático regional a partir de las medidas de presión. En la práctica es común usar un gradiente de densidad constante (e.g. Agua fresca) para el cálculo de las cabezas hidráulicas. El uso del gradiente constante permite una base de comparación para los datos disponibles. Sin embargo, variaciones laterales y verticales en la densidad introduce errores en los cálculos de cabeza hidráulica resultando en interpretaciones erróneas de las tendencias de flujo (Bachu, 1995; Davies, 1987). Las variaciones en salinidad indican el grado de continuidad de los fluidos por lo tanto, deben ser monitoreados junto con las presiones para poder cuantificar el error inducido por el uso de densidades constantes.

METODOLOGÍA

Según Dahlberg (1995), la realización del análisis Hidrodinámico se basa en la integración de perfiles de presión-elevación (PE) y mapas de cabeza hidráulica, construidos a partir de las presiones de formación. Las medidas de presión deben ser asignadas a una unidad hidroestratigráfica. Los perfiles PE agrupan información en las unidades hidroestratigráficas definiendo secuencias con similares propiedades hidráulicas. Las cabezas hidráulicas son mapeadas para cada unidad hidroestratigráfica. La información de análisis fisico-químicos de agua de formación fue corregida mediante error de balance iónico y conductividad eléctrica. Con las especies iónicas recalculadas se midieron los sólidos totales disueltos (TDS mg/L) para clasificar el agua según su contenido de TDS. Muestras cuya salinidad es expresada en función de Sodio y Cloro fueron recalculadas en TDS mediante el uso de la ecuación (2) (González & Arenas, 2003). Las diferencias entre salinidades medidas en unidades de NaCl y TDS no representa una diferencia mayor al 10% (Villegas et al. 1995). Adicional al análisis de salinidad en función de los sólidos totales disueltos, se emplearon las concentraciones de los trazadores para la caracterización de facies Hidrogeoquímicas y la clasificación de aguas de formación según lo propuesto por Piper (1944) y Sulín (1946).

$$NaCl [mg/l] = 0,8805 * TDS [mg/l] + 159,24 \quad (2)$$

HIDROESTRATIGRAFIA

Un sistema acuífero puede ser definido como intervalo estratigráfico compuesto por una o más unidades similarmente hidráulicas con la presencia de acuitardos, que a nivel local pueden ser significativas barreras de flujo, pero a nivel regional no. Hidroestratigráficamente la cobertura sedimentaria de interés está representada por una intercalación de rocas siliciclásticas de edades Cretácico y Terciario compuesta principalmente de arenas de grano fino a grueso y shales. En el área están presentes dos sistemas principales con diferentes propiedades hidráulicas y fisicoquímicas. El primero en el Piedemonte con los acuíferos Mirador, Barco y Guadalupe y un segundo sistema que cubre el bloque subandino y la zona Llanos con 5 acuíferos que para fines prácticos serán evaluados independientemente: Sistemas Mirador, Barco, Guadalupe, Gachetá y Une. Bachu et al (1995), presenta una descripción más detallada de las características sedimentológicas de cada unidad hidroestratigráfica. Pese a que las unidades de flujo previamente nombradas se presentan en gran parte de la cuenca, su comportamiento hidráulico varía geográficamente y está íntimamente relacionado al estilo estructural local. Es así, como en la zona Piedemonte el comportamiento de estas unidades es variable en dirección NE-SO generándose sistemas compuestos donde los acuíferos que son independientes en un campo forman una sola unidad de flujo en los campos contiguos, esta variabilidad sugiere la evaluación cuidadosa de los mapas potenciométricos y la realización de perfiles detallados PE.

SISTEMAS DE PRESIÓN

El perfil PE regional muestra dos claras tendencias. Un primer sistema de valores sobrepresionados compuesto por los sistemas de presión en el Piedemonte, y un segundo grupo generalmente hidrostático con algunos valores anómalos levemente subpresionados (menor a la presión debida al gradiente hidrostático) correspondiente a mediciones en los acuíferos Cretácicos del sector llanos centro.

Sector Piedemonte (SP) Este grupo de estructuras se caracteriza por la compartimentalización desde el NE de la zona de estudio, en las estructuras Floreña, Dele, Pauto y Volcanera y más al sur por

Cupiagua y Cusiana. Las estructuras del norte (Zona del tren de estructuras cabalgantes según Martínez, 2002) se caracterizan por la presencia de escamas de cabalgamiento que condicionan la aparición de diferentes yacimientos en la vertical, además de la generación de compartimientos al interior de cada escama, lo cual es evidente por trenes sobrepresionados (FIGURA 2). La zona de transición de estructuras aisladas correspondiente al sector del campo Cupiagua se caracteriza por contener un solo "Pay" productor, que agrupa a las Fms. Mirador, Barco y Guadalupe en un único acuífero en donde la Fm. Cuervos no actúa como barrera de flujo vertical. Debido a esto, es de esperarse una mezcla de fluidos (tanto para agua y aceite). En la extensión sur del campo Cupiagua (Cupiagua Sur) la Fm. Los Cuervos actúa como barrera separando nuevamente los sistemas acuíferos Mirador y Barco-Guadalupe, convirtiéndose este sector en una zona de transición entre un sistema hidráulico de comunicación vertical a uno que presenta ausencia de conectividad. La reducción de cloruros en tiempo junto con el incremento de los cortes de agua sugieren una recarga activa del sistema. El flujo hidrodinámico en el campo Cusiana está condicionado por la falla de back thrust que atraviesa el campo en sentido NE-SW, esta, actúa como barrera para el flujo horizontal en algunos sectores dentro del acuífero Mirador, mientras que para el sistema acuífero más profundo (Barco-Guadalupe) actúa como un canal, comunicando hidráulicamente los dos flancos de la estructura debido a la yuxtaposición de facies transmisivas. El perfil de PE muestra una transición de gradientes composicionales y dos sistemas de presión en dirección W-E (flancos Este y Oeste del campo). Un primer análisis de la distribución en la vertical de la concentración de cloruros analizada en una línea de rumbo NE-SW revela un incremento en dirección sur y en profundidad. Las transiciones se disponen para la Fm. Mirador entre 0 y 5000 mg/L de Cl, para Barco entre 1000 y 10000 mg/L y para Guadalupe entre 8000 y 17000 mg/L de Cl.

Sector Llanos Centro (SLLC) Presión Este sector presenta un comportamiento de acuerdo al estilo estructural de sus reservorios (estructuras anticlinales suaves, limitadas al este por fallas antitéticas que presentan un salto en las formaciones someras). Las condiciones de presión varían por formación

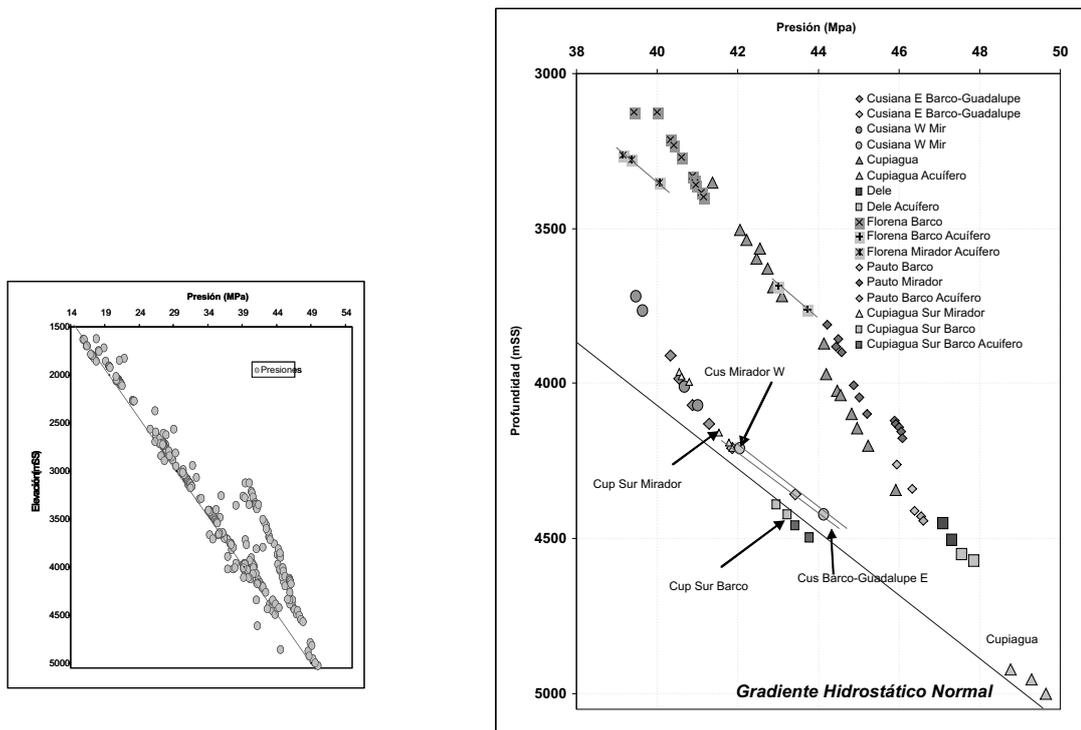


FIGURA 2. Perfil PE. Sistemas de Presión Cuenca Llanos y Piedemonte

encontrándose para la Fm Carbonera sistemas levemente subpresionados a sobrepresionados comportándose al este como un sistema de fluidos independiente en los niveles arenosos con barreras verticales. Las condiciones de presión en el acuífero Mirador varían en general entre 16,9-45,6 MPa a profundidades entre 1783 – 4614 mSS, encontrándose sistemas sobrepresionados (como en los campos La Gloria, Tocaria con una capa de gas y API entre 25 a 31°, Santiago y Santiago Este con el OWC inclinado hacia el NE y API entre 17 y 28°), sistemas de presión normal (La Gloria Norte donde el OWC está inclinado hacia el SW y Trompillos) y subpresionados relacionados a compartimientos verticales (Morichal Up con API de 21° levemente sobrepresionado y API de 38,5° hidrostático levemente subpresionado Low). Igualmente para las otras unidades sobrepresiones para Une en el palmar, subpresiones para Une en La Gloria y Tocaria; para Gachetá en La Gloria Norte y normalmente presionado para Barco en Tocaria y Guadalupe en Santiago con compartimientos en Gachetá en el campo Tocaria, similar al Mirador en Morichal. Los pozos exploratorios secos y con

manifestaciones no comerciales de la región de Casanare presentan presiones entre 15,8 – 35,4 MPa (2297 y 5135 psia) en profundidades que van desde los 1627-3616 mSS incluyendo los pozos Guarilaque-2, Upia-1, Chaparrito Norte-1, Surimena Norte-1, Upia-1 y Pomarroso-1. Los valores de presión muestran un gradiente continuo y sobrepresionado aproximadamente de 0,4 psia/ft.

HIDROGEOQUÍMICA DEL AREA

Se contó con muestras provenientes de cuatro aljibes que corresponden a aguas frescas tipo Cálculo-Cloruradas y Calcico-Sódicas-Cloruradas. El proceso químico dominante es el intercambio de Ca por Na. La composición isotópica sugiere la posibilidad de diferentes recargas (O^{18} entre -5.56 y -7.52 ; H^2 entre -34.36 y -52.82). El acuífero Carbonera contiene aguas tipo Na-HCO₃; Na-HCO₃-Cl; Na-Cl; y Mg-Cl revelando la existencia de aguas meteóricas desde el sur en dirección norte en el extremo este de la cuenca. Las aguas del acuífero Mirador son generalmente frescas y salobres en el Sector Piedemonte y anomalías salinas al N-NE y SW en SLLC. Las aguas presentes

son Clorada-Calcica a Sulfatada-Sódica, altamente hidrodinámicas al este y sur de la cuenca con procesos de *freshening* desde el sur en SLLC y en el SP al interior del campo Cupiagua y procesos de *mixing* en Cupiagua y Santiago. Los isótopos estables de δO^{18} y δH^2 muestran una gran variedad en el origen de las aguas (FIGURA 3). Comportamientos de naturaleza connata en Cusiana, y algunos pozos en Cupiagua (al sur), La Gloria Norte y Morichal. Por el contrario, aguas meteóricas se presentan en Cupiagua. Los valores mas empobrecidos δO^{18} están al sur-este con valores ≈ -8.5 SMOW y valores intermedios ≈ -5 y -8.5 δO^{18} SMOW en Cupiagua a lo largo de un tren dispuesto en dirección NE-SW desde La Gloria Norte hasta Fortaleza-1. Es clara la acción de mezcla para aguas en los campos la Gloria, Gloria Norte, Morichal y al sur en El Palmar. Las aguas del acuífero Barco son salobres (al este en SP) y salinas (en SLLC a lo largo de un tren dispuesto NE-SW). Aguas tipo Ca-Na-Cl sugieren procesos de salinización relacionados a procesos de disolución o lixiviado de sales más solubles durante el proceso de recarga, o a la posible mezcla de aguas congénitas desde otros estratos y/o a la hiperfiltración desde los acuitardos de origen marino producto del bombeo en la zona. El acuífero Guadalupe presenta aguas tipo fresca al E y NE. Aguas salinas se presentan en un aumento progresivo desde el centro de la cuenca Llanos en dirección W y SW en patrones radiales. Pueden encontrarse aguas connatas tipo Cl-Ca y Cl-Mg al NW en el piedemonte y al SE en Santiago. Las aguas meteóricas tipo HCO_3 se disponen al este en SLLC y al SW en el SP, llegando a ser SO_4 -Na. Isotópicamente, las muestras del campo Cusiana sugieren mezclas. El acuífero Gacheté con aguas frescas al SE y salobres en dirección NE-SW y aguas tipo salinas al NW. El acuífero Une contiene aguas frescas al SE.

TEMPERATURAS

Fueron evaluados perfiles de Temperatura Vs. Profundidad (FIGURA 4) para identificar zonas de baja temperatura que pueden ser la respuesta a un posible frente hidrodinámico activo. En el SP una trayectoria de aumento hasta una profundidad de 3.9 KmSS, una posterior disminución/estabilización en los valores de temperatura hasta los 4.1 KmSS y a partir de esta profundidad una nueva tendencia de incremento. Esta zona de transición entre los 3.8–4.1 KmSS genera una gran dispersión de datos anómalos fríos que caen

bajo la línea de gradiente normal. Igualmente estos valores se presentan al norte del SP. En SLLC ocurren gradientes geotérmicos altos desde La Maria, La Cabaña, Morichal y Tocaria a La Gloria y Gloria Norte hasta llegar zonas intermedias en los campos Santiago, Trompillos y El Palmar. Se observa una dispersión de aproximadamente $4^\circ C$, relacionado a procesos de recarga.

EVALUACIÓN DE LA CONTINUIDAD LATERAL Y VERTICAL DE LOS ACUÍFEROS

La continuidad lateral y vertical en los diferentes acuíferos fue evaluada mediante el análisis de los perfiles PE, comparación de cabezas hidráulicas y con la proyección gráfica de concentraciones en miliequivalentes de los iones del agua. Aquí se presenta, solo la interpretación en el acuífero Mirador debido a que esta unidad provee la mayor densidad de datos. Arealmente se identifican tres tendencias. Un patrón NE-SW en el piedemonte, otro en la misma dirección adyacente y paralelo al frente de deformación en la parte intermedia y el último dispuesto de la misma forma en la parte más este de la cuenca. El primer grupo está compuesto por los campos del SP y es característico por la baja concentración de TDS al N y E, e incrementos al centro y SE. Los perfiles PE, corroboran la presencia de diferentes sistemas de presión que sugieren una tendencia de flujo en dirección SW. El segundo gran grupo evidencia altas concentraciones (aguas salobre - salina). Según estos patrones se puede inferir una conectividad entre los acuíferos productores de la región central del área de estudio con algunas variaciones al norte (Morichal) y al sur (Fortaleza y Teques) hasta condiciones frescas en Upia-1. El tercer grupo compuesto por aguas de carácter fresco. Desde el sur se observan manifestaciones intercaladas de aguas salobres seguida de la aparición de aguas frescas. Los perfiles PE sugieren compartimientos asociados a fallas antitéticas que condicionan la aparición de hidrocarburos soportando la presencia de zonas compartimentalizadas en el sector foreland. La información isotópica confirma la presencia de dos sistemas de agua de formación en el piedemonte (Cusiana y Cupiagua) además de las diferencias entre el centro y el este de la cuenca caracterizado por valores isotópicos muy empobrecidos. Las composiciones químicas de las diferentes aguas de formación en la vertical muestra similitudes para

Hidrodinámica e hidrogeoquímica del Piedemonte Llanero Colombiano: Hipótesis de rutas de migración a partir de técnicas hidrogeológicas

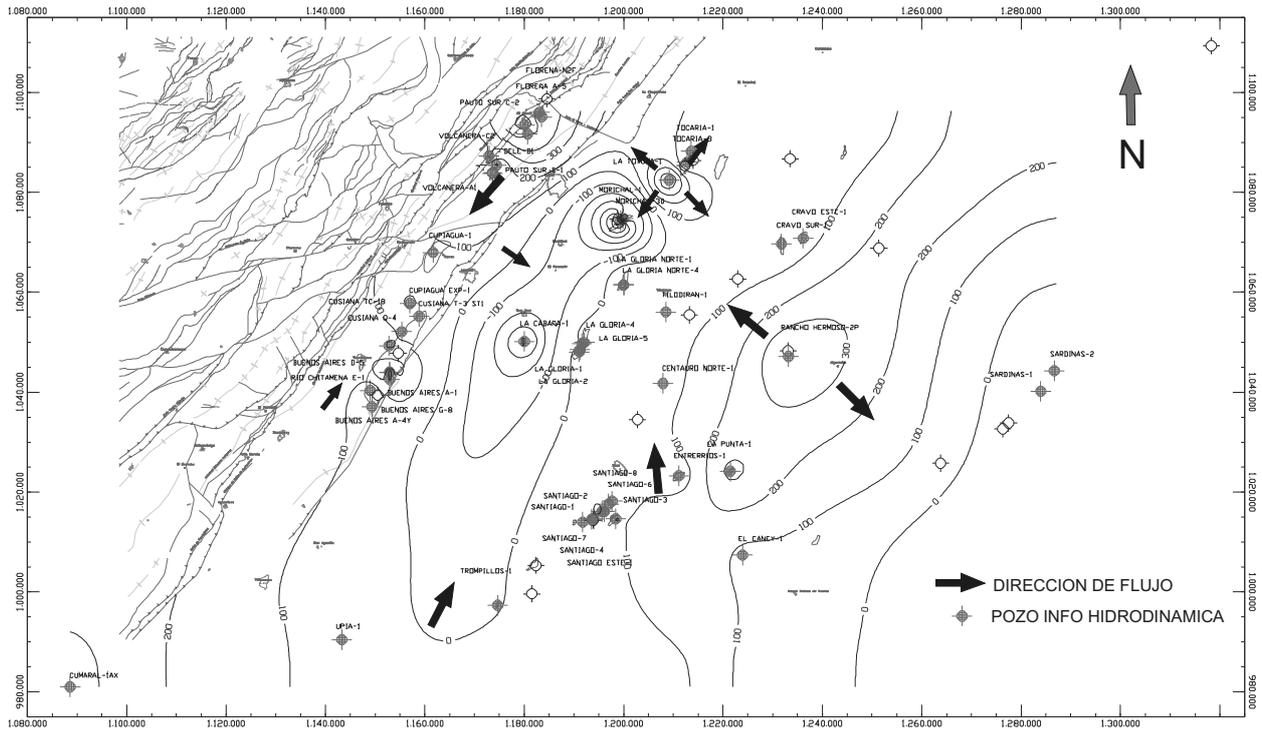


FIGURA 5. Mapa cabezas Hidráulicas Acuífero Mirador.

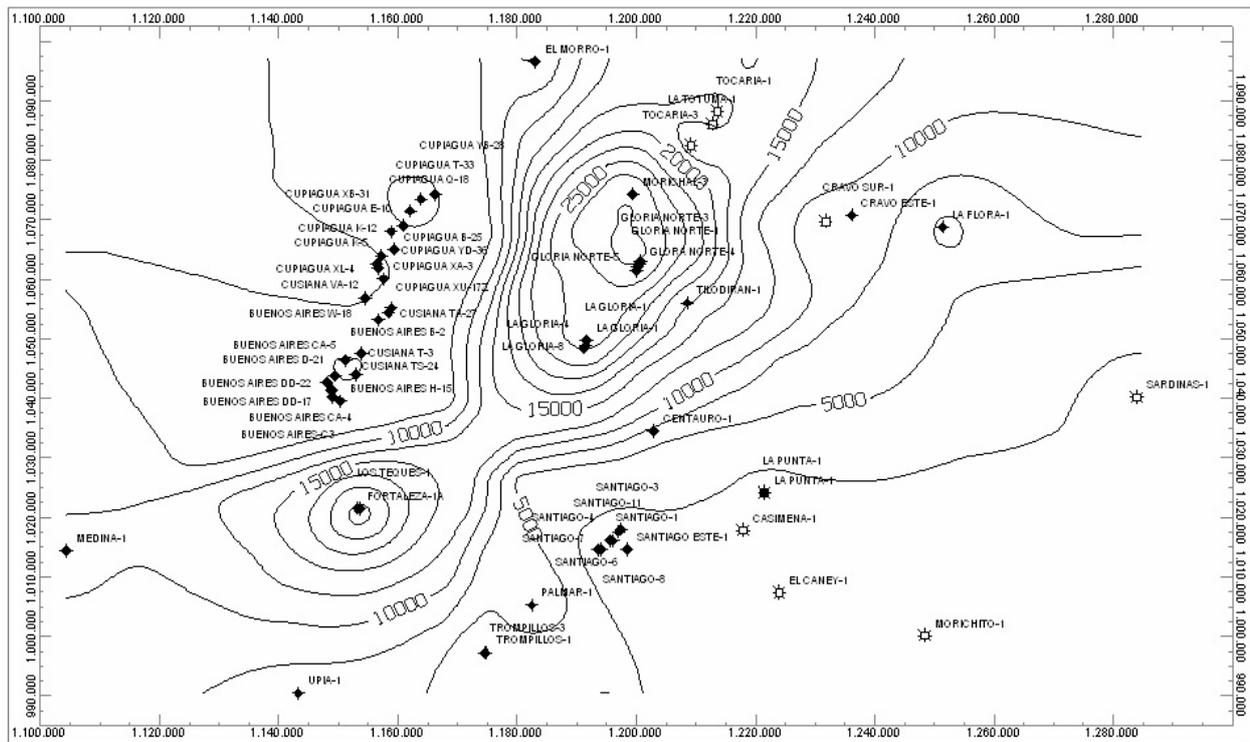


FIGURA 6. Mapa distribución salinidad TDS [mg/L] Acuífero Mirador.

las muestras de las Fms. Barco y Guadalupe, siendo la primera algo más salino al S-SW del SP con aportes de Ca en los acuíferos Cretácicos. El sector central del Piedemonte muestra un aumento en concentraciones hacia el sur. En el sector llanos, las diferencias entre la Fm. Mirador y el nivel Gachetá sugieren la presencia de una barrera vertical posiblemente a la altura de la Fm. Los Cuervos. Hacia el E-SE se presenta una clara diferencia entre los niveles acuíferos Une, Guadalupe y Barco. Los perfiles PE en SLLC al sur, sugieren comunicación hidráulica vertical entre los diferentes sistemas en dirección este. Aun cuando se observan diferencias marcadas, similitudes localizadas entre la química de los diferentes reservorios, evidencian la ausencia de una barrera hidráulica vertical al interior de las formaciones Cretácicas y Terciarias. Un aislamiento entre los niveles profundos del Cretácico y los someros del Terciario, parece afectar la secuencia en la mayor parte del foreland, suponiendo un aislamiento efectivo de la Fm. Los Cuervos.

DISCUSION: MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO ACUÍFEROS PIEDEMONTE LLANERO Y CUENCA LLANOS

El modelo hidrogeológico preliminar sugerido presenta una zona de captación a elevaciones entre 1000 y 2600 msnm (según información isotópica). Estudios anteriores proponen como área de recarga la Serranía de la Macarena al sur, generando un

flujo en dirección N-NE (ELF-Aquitane, 1984; PETROCANADA y ECOPEPETROL, 1989; Villegas et al, 1994 y ECOPEPETROL y BEICIP-FRANLAB y ECOPEPETROL, 1995). Rasgos topográficos locales y la paleotopografía del basamento controlan la dinámica de los fluidos en el área mediante la generación de barreras de flujo (e.g. paleoalto de Vorágine). A escala local es compleja la dinámica de los fluidos en los campos. Se encuentran direcciones opuestas de flujo (FIGURA 5 y 6). La región oeste del SLLC se caracteriza por ser una zona sobrepresionada de aguas frescas y zonas salinas sub presionadas. Los niveles terciarios sugieren un flujo en dirección sur desde La Gloria Norte hacia La Gloria (sur) y en dirección norte desde el mismo punto (Gloria Norte) en dirección de Morichal y Tocaria evidenciando un flujo radial. El sector central muestra patrones similares que los descritos anteriormente, al sur para la Fm. Mirador en los campos Trompillos, Santiago con cambios locales de dirección al norte. Direcciones de flujo desde el este (Rancho Hermoso) hacia el W-NW en la región de La Gloria y La Gloria Norte. Igualmente desde el NE en Tocaria con dirección de flujo al SW en la región de subpresión en La Cabaña-1. Se observan tendencias de flujo similares en el acuífero Barco-Los Cuervos. El nivel cretácico Gachetá presenta una tendencia de flujo desde el E-SE en dirección W-NW. El acuífero Gachetá solo presenta flujo al NE, en la zona de los campos La Gloria Norte, Morichal, Tocaria y Cravo con una tendencia desde el sur hacia el N-NE. Finalmente, el acuífero Une muestra una

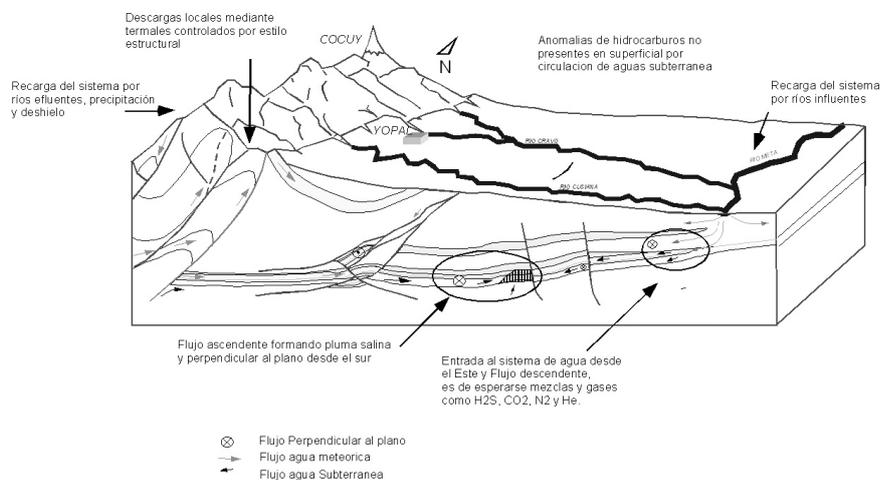


FIGURA 7. Modelo conceptual hidrodinámico Cuenca Llanos y piedemonte Llanero

tendencia de flujo desde el NE (campos Cravo) hacia el W-SW (campos Tocaria y la Gloria) y un suave alto hidráulico al sur (en Entrerrios-1) sugiriendo un leve flujo desde el SE hacia el NW. A la altura de los campos La Gloria, La Gloria Norte, Morichal y Tocaria, los patrones radiales observados sugieren la presencia de plumas de flujo ascendentes similar a lo propuesto por Rostron & Tóth (1996) para la cuenca de Alberta. La presencia de plumas en este sector pueden estar ligadas a: 1) escape de agua salada e hidrocarburos desde los estratos bajos en las crestas de las estructuras donde los miembros arcillosos de las formaciones Guadalupe superior, Gachetá y Los Cuervos son muy delgadas o están ausentes, además, el empuje hidrodinámico que transporta los fluidos hasta el spill point de la estructura favorece la migración vertical llevando los fluidos hasta fallas que actúan como canales verticales de flujo; 2) la naturaleza ascendente de los fluidos en búsqueda de zonas de menor potencial desde la Fm. Gachetá y los posibles niveles generadores en Une (?) y Los Cuervos contribuye al goteo vertical y 3) la naturaleza de los sub afloramientos de las formaciones arenosas y arcillosas, por lo cual en diferentes áreas de la cuenca se sobreponen litologías arenosas con cuerpos de iguales propiedades petrofísicas generando un medio favorable de flujo vertical. Teniendo presente la naturaleza ascendente de los fluidos en busca de zonas de menor potencial y la geometría de la cuenca, sería igualmente esperado un flujo en dirección ascendente hacia el este. Los mecanismos de recarga propuestos para la zona del forelan, flujo por topografía desde el sur con bypass en los paleo altos y ríos influentes al este, seguramente aportan volúmenes de agua que generan empujes hidráulicos ascendentes desde capas profundas y flujos contra pendiente desde el este hacia las zonas profundas subpresionadas paralelas al frente de deformación discutidas en otros estudios (ELF-Aquitane, 1984; Villegas et al, 1994; González & Arenas, 2003).

REFERENCIAS

Bachu, S., Ramon, J.C., Villegas, M.E., and Underschultz J R. (1995). Geothermal Regime and Thermal History of the Llanos Basin, Colombia, AAPG Bulletin. Vol 79, N° 1, pp.116-129

BEICIP-FRANLAB y ECOPEPETROL. (1995). Cuenca de los Llanos Orientales, Estudio Geológico Regional. Vol.1. Texto, Santa Fe de Bogotá, 202p.

Cooper, M.A., F. T. Addison., R. Alvarez., M. Coral., R. H. Graham., A. B. Hayward., S. Howe., J. Martinez., J. Naar., R. Peñas., A. J. Pulham and A. Tabora. (1995). Basin development and tectonic history of the llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, AAPG Vol 79/10, pp.1421

Dahlberg, E.C. (1995). Applied hydrodynamics in petroleum exploration, Springer Verlag, New York, 2nd ed.

Davis J, C. (1986). Statistics and data analysis in geology, 2nd ed. Wiley, New York.

De Marsily, G. (1986). Quantitative hydrogeology. Academic Press, San Diego, 440 p.

ELF-Aquitane. (1984). Estudio Hidrogeológico De La Cuenca De Los Llanos Orientales. Informe para ECOPEPETROL, 40p.

González, G. A y Arenas, C. A. (2003). Informe Hidrodinámica e Hidrogeoquímica. Consultoría para el desarrollo de proyectos que contribuyan a reducir el riesgo exploratorio en el piedemonte llanero. Informe Interno ECOPEPETROL-ICP, Contrato OFC 074-2003.

Martinez, J.A. (2003). Modelamiento Estructural 3D y Aplicaciones en la Exploración y Explotación de Hidrocarburos en el Cinturón de Cabalgamiento del Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental, Colombia. VIII Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas. ACGGP, pp.106-117

PETROCANADA-ECOPEPETROL. (1989). The Petroleum Geology of the Llanos Basin, Colombia. Confidential Report for ECOPEPETROL, Bogotá-Calgary, 26 p.

Pindell, J.L., George, Jr., R. P., Cristancho, J., and Higgs, R. (1997). Clarification of the Late Cretaceous-Paleogene Evolution of Colombia, VI Simposio Bolivariano, Cartagena, Transactions, Tomo I, pp.129-132.

Piper, A. M. A. (1944). Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans AM Geophysics Union 255, pp. 914-923.

Rostron, B.J and Tóth, J. (1996). Ascending Fluid Plumes Above Devonian Pinnacle Reefs: Numerical Modelling and Field Example from West-Central Alberta, Canada. AAPG, Memoir 66, pp.185-201.

Sulin, N.A. (1946). Waters of oil reservoirs in the system of natural waters. Moscow, Gastptekhizdat, pp 35-96.

Villamil, T. (1999). Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Volume 153, Issues 1-4, pp. 239-275.

Villegas, M. E., Bachu S., J.C. Ramon., and J. R. Underschultz. (1994). Flow of Formation Waters in the Cretaceous-Miocene Succession of the Llanos Basin, Colombia, AAPG Bulletin, Vol. 78. No 12, pp.1843-1862.

Trabajo recibido: febrero 15 de 2007

Trabajo aceptado: mayo 15 de 2007