

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EN MEZCLAS DE BIOPOLÍMEROS EN SOLUCIÓN Y MEJORAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE SÓLIDOS DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL DE SIMULACIÓN DE FLUJO EN CONDUCTOS VERTICALES DE SECCIÓN ANULAR

MARIO ROJAS¹, OSWALDO ANDARA¹, ALEJANDRO MÜLLER¹, SILVIA SIQUIER², NELSON RAMÍREZ², EDUARDO SÁEZ³

¹Universidad Simón Bolívar, Departamento de Ciencia de los Materiales, Grupo de Polímeros, Caracas 1080A, Venezuela. e-mail: amuller@usb.ve

²Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

³Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA. e-mail: esaez@enr.arizona.edu

Recibido: enero de 2008

Recibido en forma final revisado: mayo de 2008

RESUMEN

Este artículo presenta la comparación de los resultados obtenidos en la suspensión y transporte de sólidos de dos aparatos de simulación experimental de flujo en conductos verticales de sección anular vertical. Para ambos casos se utilizaron soluciones no-newtonianas de biopolímeros como fase líquida. Los biopolímeros empleados fueron goma xantano y goma guar, y la fase sólida consistió en arena de sílice con un diámetro promedio de partícula de 250 μm . Uno de los equipos consiste en un sistema de tubos concéntricos de 3 m de altura y con un diámetro hidráulico de 0,15 m. El segundo equipo tiene una altura de 6 m y diámetros hidráulicos de 0,10 m. Ambas unidades simulan el proceso de perforación de pozos a temperatura ambiente, sin el efecto de la rotación de la mecha. Las variables más importantes estudiadas fueron la velocidad de suspensión en la sección anular y la concentración de polímero. Se obtuvieron mejoras significativas en el transporte de sólidos al modificar el patrón de distribución de sólidos en el sistema y las características geométricas de la sección anular. Por otra parte, se encontró que las mezclas de goma xantano y goma guar, que poseen una mayor proporción del primer polímero, tienen una capacidad de transporte de sólidos superior a la que se obtiene con soluciones de los polímeros puros, lográndose un efecto sinérgico importante desde el punto de vista de la aplicación de estos polímeros como aditivos viscosificantes para formulaciones de lodos de perforación.

Palabras clave: Fluido no-newtoniano, Flujo líquido-sólido, Flujo anular, Goma guar, Goma xantano.

TRANSPORT OF SOLIDS IN SOLUTIONS OF BIOPOLYMER MIXTURES AND IMPROVEMENTS TO THEIR DISTRIBUTION IN A FLOW SIMULATOR IN VERTICAL CONDUITS WITH ANNULAR CROSS SECTION

ABSTRACT

This paper compares the results on suspension and transport of solids in two experimental flow simulators in vertical ducts with annular cross section. In both cases, non-Newtonian biopolymer solutions were used as the liquid phase. The biopolymers used were xanthan gum and guar gum, and the solid phase was silica sand with an average particle size of 250 μm . The first experimental system used was based on a 3-m height concentric pipe with a 0.15 m hydraulic diameter. The second equipment was built by changing the dimensions of the first system to a height of 6 m and a 0.10 m hydraulic diameter. These changes were made so that the solid phase would distribute better throughout the whole system. Both units simulate a well drilling process at room temperature and without the effect of drill bit rotation. The most important variables studied were annular velocity and polymer concentration. Significant improvements were obtained in solids transport when changing the solids distribution pattern in the system and the geometrical characteristics of the annulus. Furthermore, the xanthan-guar gum mixture solutions with a higher proportion of guar gum have a higher solids transport capacity than pure polymer solutions; there is an important synergistic effect from the point of view of the use of these polymers as viscosifying additives for drilling fluids.

Keywords: Non-Newtonian fluid, Liquid-solid flow, Guar gum, Xanthan gum.

INTRODUCCIÓN

La limpieza de hoyos es una de las operaciones más importantes dentro de los procesos de perforación de pozos en la industria petrolera y en el estudio de yacimientos y formaciones geológicas. Dicha operación, además de brindar la posibilidad de seguir perforando eficientemente y de manera continua, permite lubricar la mecha de perforación y dejar el espacio anular generado listo para operaciones posteriores como la cementación, la completación y la explotación del pozo. El interés en estos procesos ha permitido que el estudio del comportamiento de fluidos newtonianos y no-newtonianos en conductos verticales de sección anular tenga una creciente atención desde hace más de 50 años, debido a la necesidad de mejorar el proceso industrial en sí mismo, disminuir los costos asociados a la perforación y, más recientemente, mejorar la calidad de los fluidos utilizados para lograr el menor impacto ambiental posible, con la mayor eficiencia en transporte de sólidos.

Existen diversos trabajos en la literatura especializada en los que se han estudiado diferentes factores concernientes al flujo en conductos de sección anular, como la excentricidad de la región anular (Sifferman *et al.* 1974; Waker & Li, 2000), la rotación del tubo interno (Sifferman *et al.* 1974; Thomas *et al.* 1982), las propiedades reológicas del fluido (Waker & Li, 2000; Thomas *et al.* 1982; Hussaini & Azar, 1983), la presencia y distribución de la fase sólida a suspender (Hussaini & Azar, 1983; Iyoho *et al.* 1988), la velocidad anular y el régimen de flujo (Luo & Bern, 1992). También se ha estudiado el efecto de la inclinación de la tubería (Gavinet & Sobey, 1989; Kenny *et al.* 1996; Zeidler, 1972; Larsen *et al.* 1997) y en el caso específico de la adición de polímeros, como agentes viscosificantes, se ha estudiado el efecto de la concentración de los mismos, la relación entre las estructuras químicas de los polímeros y su capacidad de suspensión y arrastre así como la influencia de la adición del polímero en el daño a la formación y la invasión en el medio poroso formado por la roca (Pérez *et al.* 2004; Rojas *et al.* 2006; Powell *et al.* 1991).

Existen modelos matemáticos para describir el comportamiento hidrodinámico del flujo en conductos de sección anular, tanto en dirección horizontal como vertical, y modelos que permiten determinar y predecir la capacidad de transporte del fluido en base a sus propiedades reológicas y las características de tamaño y forma de las partículas a suspender, así como la velocidad del fluido (Sifferman *et al.* 1974; Chien, 1994; Waltker & Mayes, 1975; Clark & Bickham, 1994). Todas estas variables fueron importantes para describir la capacidad de transporte de una determinada

formulación de fluidos de perforación y, por lo tanto, modificando dichas variables fue que se pudo optimizar el proceso de transporte de sólidos y limpieza del hoyo.

En trabajos anteriores (Pérez *et al.* 2004; Rojas *et al.* 2006), se ha mostrado como el transporte de sólidos a través de un conducto vertical de sección anular se puede mejorar considerablemente al agregar biopolímeros solubles en agua como goma guar, goma guar entrecruzada y goma xantano. También se reportó en estos estudios la dependencia de la capacidad de transporte de sólidos con la distribución de los mismos dentro del equipo experimental, demostrando que la utilización del modelo de Sifferman *et al.* (1974) de transporte de sólidos en combinación al modelo de Chien (1994), para el cálculo de velocidades de sedimentación en flujos bifásicos (líquido-sólido), permitieron analizar el transporte de sólidos de una manera adecuada. Los antecedentes mencionados muestran que la aplicación de estos modelos semi-empíricos se ajustó bastante bien a los resultados experimentales de capacidad de transporte, siendo posible determinar el comportamiento de los fluidos estudiados conociendo sus propiedades reológicas y las condiciones de flujo experimentadas.

Tomando en cuenta la interdependencia de los resultados obtenidos (Pérez *et al.* 2004; Rojas *et al.* 2006), para el transporte de sólidos en conductos verticales de sección anular, con la distribución de sólidos en dicho sistema, en este trabajo se trataron de mejorar las capacidades de transporte de sólidos con fluidos estudiados anteriormente (soluciones de goma guar y goma xantano), modificando la geometría del equipo de simulación y mejorando las condiciones de flujo dentro de éste, a fin de lograr una mejor distribución de la fase sólida en las zonas previas al ánulo. La idea era obtener capacidades de suspensión y transporte cada vez menos dependientes de los efectos geométricos y poder comparar de una manera adecuada diferentes fluidos para ser aplicados en operaciones de limpieza de hoyos. También se presentaron nuevos resultados de la capacidad de suspensión y transporte de soluciones basadas en mezclas de los biopolímeros antes mencionados, mostrándose efectos sinérgicos con respecto a las soluciones puras, lo cual representó un mejor aprovechamiento de las propiedades viscosificantes de dichos polímeros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizaron polímeros grado alimenticio comerciales, goma xantano, con un $\bar{M}_w = 4-12 \times 10^6$ g/mol (RHODIGEL) y goma guar, con un $\bar{M}_w = 2 \times 10^6$ g/mol (HIGHGUM). La fase sólida es

arena de sílice con un tamaño promedio de partícula de 250 μm (40-100 mesh).

Las concentraciones de polímero estudiadas estuvieron en un rango entre 500 y 2500 ppm. Se utilizó una concentración fija de sólidos de carga de 18% p/v.

Las velocidades de flujo experimentadas estaban en el rango entre 2,6 a 15,7 cm/s para el conducto de sección anular de 3 m, y de 7,2 a 21,2 cm/s en el conducto de sección anular de 6 m de altura. Todas las medidas reportadas fueron efectuadas en estado estacionario, después de 60 minutos de aplicada la velocidad de flujo experimental.

Equipos experimentales

El primer equipo utilizado para hacer los ensayos de suspensión y transporte de sólidos en conducto vertical de sección anular consistió en una columna conformada por dos tubos concéntricos con relación de diámetros interno a externo, D_i/D_e , de 0,5 y una altura de 3 m (figura 1); el tubo interno tenía un diámetro nominal de 15 cm, mientras que el externo, un espesor de 0,25 cm y un diámetro nominal de 30 cm. El conducto de sección anular estaba conectado a un circuito de tuberías de alimentación y descarga. Las tuberías de alimentación estaban conectadas a su vez a una bomba de desplazamiento positivo (Netzsch) con una capacidad máxima de bombeo de 37,5 m^3/h , equipada con un variador de frecuencia que permitía controlar el caudal de trabajo o la velocidad de flujo.

La descarga del sistema desembocaba en un tanque de recirculación de 600 L que servía de alimentación a la bomba y cerraba el circuito. El tanque estaba provisto de un agitador neumático que permitía mantener la homogeneidad de la suspensión antes de reingresar a la bomba. La columna poseía trece toma-muestras en el tubo externo a lo largo de toda la altura de la tubería, lo que permitía tomar alícuotas del fluido que circulaba por el sistema para cuantificar la concentración de sólidos a lo largo del conducto de sección anular.

Se propuso aumentar la altura de la columna vertical a 6 m, cambiando asimismo la relación de diámetros de las tuberías para disminuir la sección anular en un 33,3%. El nuevo sistema tiene una tubería interna de 20 cm de diámetro nominal y la externa de plexiglás de 30 cm. El tanque de recirculación se cambió de posición, eliminando tramos de tubería que conectan el tanque a la bomba. Se mantuvo la cantidad de toma-muestras constantes aumentando el espaciado entre ellos. Los cambios generales del equipo experimental y la conformación de ambos sistemas se pueden apreciar en la figura 1.

Para determinar el comportamiento reológico de las soluciones estudiadas, se utilizó un reómetro marca Rheometrics Scientific, modelo Ares 902-300004, de tipo deformación controlada; una geometría doble pared tipo Couette y una temperatura de 25°C, requiriéndose muestras de 10 mL de solución para cada ensayo.

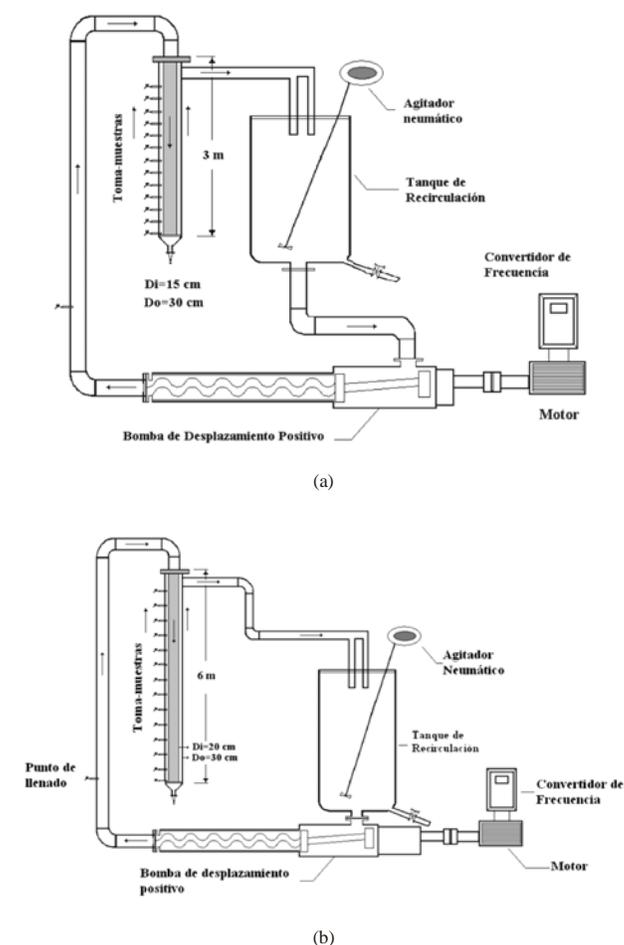


Figura 1. Equipo experimental.
(a) Sistema de 3 m; (b) Sistema de 6 m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Reología de las soluciones poliméricas

En trabajos previos (Pérez *et al.* 2004; Rojas *et al.* 2006) se ha presentado el comportamiento reológico bajo corte simple de las diferentes soluciones de polímeros puros utilizadas. En la figura 2, se puede observar un resumen de dicho comportamiento. Las soluciones de goma xantano muestran una pseudoplasticidad muy marcada y viscosidades superiores a las soluciones de goma guar a concentraciones similares. Las interacciones intermoleculares, producto de los grupos polares presentes en la estructura de la goma xantano, le permiten tener este comportamiento en solución

(Milas *et al.* 1990), típico de un polímero semi-rígido, que además tiene un peso molecular promedio apreciablemente mayor al de la goma guar.

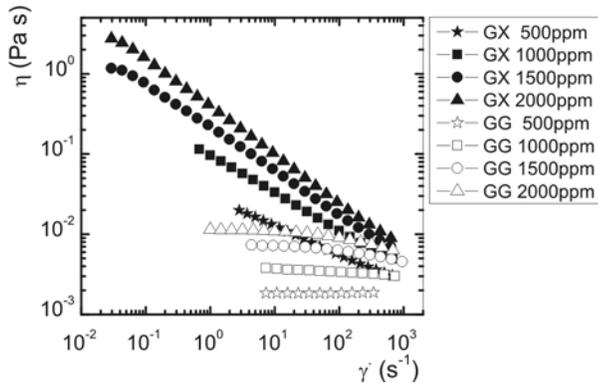


Figura 2. Viscosidad de corte de soluciones de goma guar (GG) y goma xantano (GX).

El comportamiento reológico de las soluciones está íntimamente relacionado con la capacidad de transporte de las mismas. Altas viscosidades a bajas tasas de corte, implican bajas velocidades de sedimentación de las partículas, lo que en términos prácticos involucra una mejor suspensión de la fase sólida cuando el fluido no fluye o las velocidades de flujo son muy bajas. Por otra parte, es necesario que el fluido presente menores viscosidades a altas tasas de corte, equivalentes a altas velocidades de flujo, para hacer más fácil y económico su bombeo durante el proceso de perforación. Por lo tanto, existe un compromiso entre las fuerzas viscosas del fluido y la contribución cinética que da la velocidad de flujo y es este compromiso el que regula el proceso de transporte de sólidos en el conducto de sección anular.

Como se indicó previamente, se espera que las soluciones con mayor viscosidad presenten mayor capacidad de suspensión y transporte de sólidos. Sin embargo, no basta con asegurar una alta concentración de polímero y, por lo tanto, una alta viscosidad para analizar el comportamiento del fluido ante la fase sólida. Viscosidades extremadamente altas tienden a producir un efecto de disminución del número de Reynolds, que puede llevar a una depresión en la capacidad de suspensión del fluido, ya que para mantener un adecuado transporte de sólidos se requiere que el flujo sea turbulento (Rojas *et al.* 2006; Walker & Mayes, 1975) con predominio de la contribución cinética del flujo.

En el caso de las mezclas de los biopolímeros anteriormente utilizados, se tiene que existe una sinergia en la viscosidad del fluido resultante, cuando la proporción de goma guar es superior a 50%. En la figura 3 se observa un comportamiento reológico típico de las mezclas para soluciones de goma

xantano 500 ppm y goma guar 1500 ppm. Se puede apreciar que la mezcla presenta una viscosidad con un orden de magnitud mayor a la de goma xantano pura y casi dos órdenes de magnitud mayor a la solución de goma guar pura. Este comportamiento es ampliamente conocido y se debe a la capacidad de la goma xantano de formar interacciones moleculares con otras moléculas de cadena larga, en especial polisacáridos, gracias a su estructura rígida y ampliamente expandida en la solución. Estas mezclas pueden llegar a formar incluso geles elásticos termo-reversibles (Casas *et al.* 2000).

La sinergia observada puede ser aprovechada desde el punto de vista del uso de estos biopolímeros como agentes viscosificantes en lodos de perforación, lográndose establecer una relación entre el comportamiento reológico del fluido utilizado y la capacidad de suspensión y transporte de sólidos del mismo.

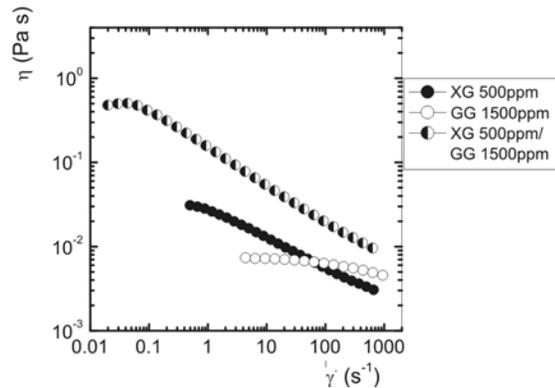


Figura 3. Comparación de la viscosidad de corte de soluciones de goma guar, goma xantano y su mezcla.

SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS

En la figura 4 se pueden observar los perfiles de concentración de sólidos para los dos conductos verticales de sección anular utilizados, empleando soluciones de goma guar 1000 ppm como fluido de suspensión. Dado que la carga de sólidos es la misma en los dos sistemas, se puede observar que, a la misma velocidad promedio de suspensión (v_a), la capacidad de suspensión en el conducto de sección anular de 3m es en todos los casos menor a la presentada por el sistema optimizado de 6 m. Las diferencias en concentración de sólidos observadas en la figura 5 se hacen menos notorias a medida que la velocidad de flujo aumenta, siendo a altas velocidades de flujo la capacidad de suspensión muy similar. Esto significa que llega un momento en el cual es difícil suspender más sólidos aun cuando se aumente la velocidad de flujo, porque el fluido no es capaz de transportar más sólidos de las diversas zonas del sistema al conducto de sección anular.

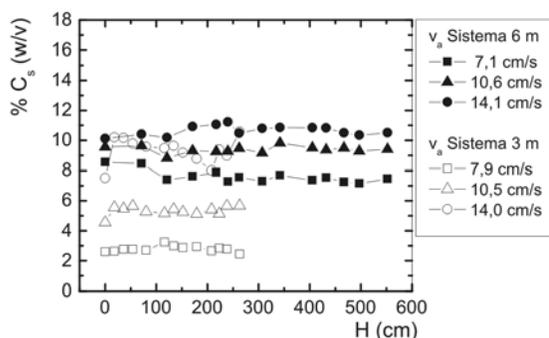


Figura 4. Perfiles de concentración de sólidos en el espacio anular para ambos sistemas experimentales y soluciones de goma guar de 1000 ppm. La concentración de carga de sólidos es de 18%.

En la figura 5 se muestran los perfiles de concentración para soluciones de goma xantano 1000 ppm. Se puede apreciar nuevamente que la suspensión es mejor para el conducto de sección anular de 6 m a velocidades similares en comparación al sistema de 3 m. En este caso, la suspensión es un poco mayor a la que se logra con la goma guar, debido a las propiedades reológicas particulares de cada fluido, siendo la goma xantano un polímero que permite lograr mayores capacidades de transporte y suspensión comparado con la goma guar (Rojas *et al.* 2006).

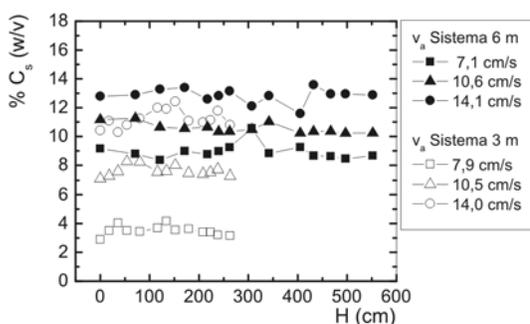


Figura 5. Perfiles de concentración de sólidos en el espacio anular para ambos sistemas experimentales y soluciones de goma xantano de 1000 ppm. La concentración de carga de sólidos es de 18%.

La ventaja de mejorar la distribución de sólidos en el sistema experimental es que las medidas de suspensión tomadas son menos dependientes de los efectos de acumulación y recirculación que existen de por sí debido al carácter bifásico del flujo. Sin embargo, la forma más adecuada de cuantificar la capacidad de transporte sigue siendo el cálculo de la relación de transporte de Sifferman, la cual aporta una información más precisa, ideal para comparar las distintas soluciones de polímeros empleadas.

La figura 6 muestra los perfiles de concentración de sólidos para soluciones de goma xantano y goma guar puras y mezcladas a una proporción de 25/75 (GX/GG), a dos velocidades de flujo en el conducto vertical de sección anular de 6 m. Puede apreciarse que existe una sinergia en la capacidad de suspensión de sólidos al mezclar ambos polímeros en solución. Se mezclan en este caso utilizando una mayor proporción de goma xantano, debido a que este polímero provee una viscosidad alta en un amplio rango de velocidades de deformación. La adición de una pequeña porción de goma guar ayuda a aumentar la viscosidad, especialmente en aquel rango de deformaciones altas donde la viscosidad de goma xantano disminuye ampliamente por su marcada pseudoplasticidad, encontrándose un balance en las fuerzas viscosas que proveen estos polímeros en el amplio rango de deformaciones. Como se explicó antes, al mostrar la reología de corte de estas soluciones, la viscosidad de la mezcla es superior debido a las interacciones que existen entre ambos polímeros, en especial cuando la proporción de goma guar es mayor en la mezcla. Como es de esperar, al aumentar la velocidad de flujo, el incremento de la capacidad de suspensión obtenido con la mezcla es menor con respecto a las soluciones puras, ya que las viscosidades a altas tasas de deformación se asemejan más y, por lo tanto, las concentraciones de sólidos obtenidas son más cercanas entre sí.

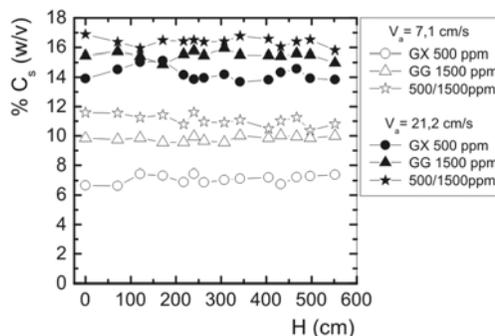


Figura 6. Perfiles de concentración de sólidos en el espacio anular para el sistema de 6 m usando goma xantano, goma guar y sus mezclas. La concentración de carga de sólidos es de 18%.

El uso de mezclas no sólo permite obtener mejores resultados en suspensión de sólidos sino también aprovechar las propiedades de ambos polímeros en mejorar todo el proceso de limpieza y remoción de sólidos del conducto de sección anular. Es necesario, sin embargo, hacer un estudio exhaustivo de estas mezclas para encontrar la proporción ideal en la que se obtienen los mejores resultados tanto de suspensión como de transporte de sólidos.

Al comparar la capacidad de suspensión de ambos sistemas en función de la concentración de polímero, manteniendo

velocidades de flujo equivalentes, se observa diferencias cualitativas y cuantitativas. La figura 7 muestra la dependencia de la capacidad de suspensión de sólidos con la concentración de goma xantano en ambos sistemas. Puede observarse que para altas velocidades de flujo los valores de suspensión son similares aún cuando la forma de los perfiles de suspensión es diferente.

Para el sistema de 3 m, en un trabajo anterior (Rojas *et al.* 2006) se reportó que existía un máximo en la capacidad de suspensión de sólidos con variaciones en la concentración de goma xantano, el cual se atribuyó a los problemas de distribución de sólidos en el sistema. El hecho de que existan zonas donde se acumulen cantidades importantes de sólidos permite que la capacidad de suspensión se sature y no pueda aumentar aun al incrementarse la concentración de polímero, e incluso que dicha capacidad disminuya pues al existir una mayor viscosidad en las zonas de estancamiento, es más difícil mover el sólido acumulado en ellas y, por lo tanto, la capacidad de suspensión se ve afectada.

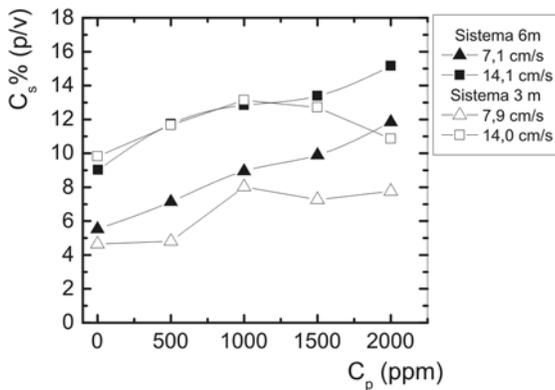


Figura 7. Perfiles de concentración de sólidos en ambos sistemas como función de la concentración de goma xantano.

La concentración de carga de sólidos es de 18%.

En el caso del sistema de 6 m, se puede constatar que la capacidad de suspensión se incrementa siempre con la concentración de polímero en todo el rango estudiado. Se concluye entonces que las modificaciones hechas mejoran la distribución de sólidos dentro del sistema, favoreciendo que la arena sea transportada al conducto de sección anular y no permanezca estancada en las zonas de menor velocidad de flujo del equipo.

Para bajas velocidades de flujo, los perfiles de concentración en los dos sistemas se asemejan más, pero se puede observar que existe una marcada diferencia cuantitativa en la capacidad de suspensión, siendo mayor para el sistema de 6 m, especialmente cuando la concentración de polímero es lo suficientemente alta. Esto se debe al hecho ya conocido

de que aumentar la viscosidad efectiva del fluido mejora la suspensión, especialmente para bajas velocidades de flujo, donde la componente viscosa juega un papel predominante. A altas velocidades no se observa esto, debido a que la diferencia de viscosidad en las soluciones por el aumento en la concentración de polímero es menor, dada las altas tasas de deformación y el carácter pseudoplástico de las soluciones.

En la figura 8 se muestra la dependencia de la capacidad de suspensión con la velocidad de flujo, en este caso para soluciones de goma xantano en ambos sistemas. Se observa que la dependencia es similar, aumentando la capacidad de suspensión con la velocidad de flujo en todo el rango estudiado.

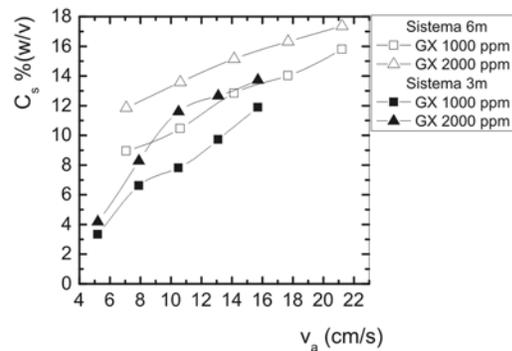


Figura 8. Perfiles de concentración de sólidos en ambos sistemas como función de la velocidad en promedio en el espacio anular para soluciones de goma xantano. La concentración de carga de sólidos es de 18%.

TRANSPORTE DE SÓLIDOS

Como se ha expuesto antes, la idea de estos estudios de flujo en conductos de sección anular de suspensiones de arena en soluciones acuosas de polímeros era evaluar la eficiencia de los polímeros como agentes viscosificantes. Esto tenía como principal objetivo lograr comparar los polímeros para su aplicación como aditivos en lodos de perforación y limpieza de hoyos. No obstante, la información presentada hasta ahora es representativa, es deseable aplicar modelos que sean independientes de los fenómenos de acumulación y recirculación (mala distribución de sólidos) que ocurren en dichos sistemas. En este caso, los modelos utilizados han sido probados y esgrimidos antes en la literatura (Pérez *et al.* 2004; Rojas *et al.* 2006).

Un parámetro que permite cuantificar la efectividad para el transporte de sólidos de una suspensión es la relación de transporte (t_r) (Sifferman *et al.* 1974) definida por:

$$t_r = \frac{v_a - v_s}{v_a} \quad (1)$$

donde:

v_a y v_s son las velocidades promedio en la sección anular y de sedimentación de las partículas, respectivamente. Un balance de masa de sólidos en el sistema indica que:

$$v_a C_f = (v_a - v_s) C_s \quad (2)$$

donde:

C_f es la concentración de sólidos en la entrada del sistema y C_s la concentración en la sección anular. Combinando las ecuaciones (1) y (2) resulta en:

$$t_r = \frac{C_f}{C_s} \quad (3)$$

El uso de una correlación que permita evaluar la velocidad de sedimentación del sólido en términos de la reología del fluido permite predecir la relación de transporte usando la ecuación (1). Esta predicción puede ser comparada con el valor calculado por medio de la ecuación (3) usando datos experimentales de concentraciones de sólido. En este trabajo, la velocidad de sedimentación fue calculada por el modelo de Chien (Rojas *et al.* 2006; Chien, 1994).

En las figuras 9 y 10 se presenta la comparación de la relación de transporte teórica y experimental para agua y soluciones de goma guar y goma xantano en ambos sistemas. Pudo destacarse la similitud encontrada en las capacidades de transporte usando agua como fluido base en ambos conductos de sección anular. Prácticamente no existe diferencia entre la utilización de un sistema u otro, lo que sugiere que utilizando estos modelos no se observó el efecto adverso de la mala distribución de sólidos dentro del sistema, ya que se obtuvo resultados similares utilizando un sistema con una distribución pobre de sólidos y un sistema con una buena distribución de sólidos. Nótese que la capacidad de transporte de sólidos del agua es tan baja que aun aunque haya mucha cantidad de sólidos acumulados en diferentes regiones del sistema de bombeo y recirculación del sistema anular, la cantidad de sólidos que realmente se pueden suspender y transportar dentro del conducto de sección anular va a ser siempre la misma para una velocidad de flujo dada.

Cuando se tiene polímero en el sistema, la relación de transporte es menos sensible a la velocidad de flujo, ya que la capacidad de transporte aumenta considerablemente para bajas velocidades de flujo (figuras 9 y 10). Esto se hace más pronunciado cuando las concentraciones de polímero son altas. Si se comparan los valores obtenidos para goma guar 1000 y 2000 ppm (figura 9), puede verse que en el segundo caso la eficiencia en el transporte de sólidos es mucho mayor

debido a la mayor viscosidad de la solución. Las diferencias en relación de transporte a altas velocidades de flujo para los distintos fluidos estudiados, se hacen cada vez más pequeñas debido a la pseudoplasticidad de las soluciones, lo cual permite que las viscosidades de las mismas se asemejen entre sí a altas tasas de deformación y predomine la contribución cinética del flujo y no la contribución viscosa del fluido.

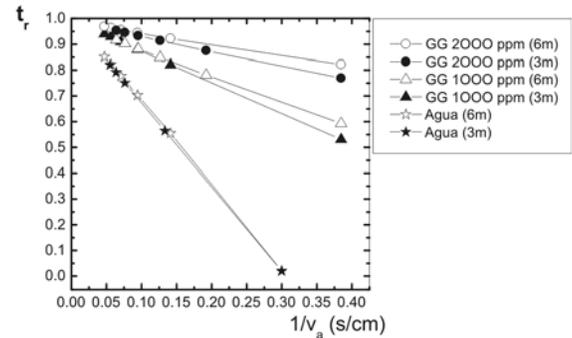


Figura 9. Relaciones de transporte experimental (puntos) y teórica (líneas) como función del inverso de la velocidad promedio en el espacio anular para agua y soluciones de goma guar. La concentración de carga de sólidos es de 18%.

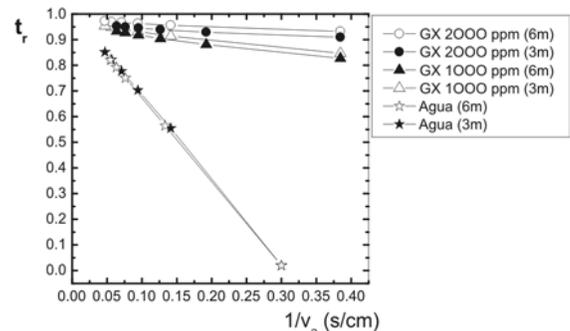


Figura 10. Relaciones de transporte experimental (puntos) y teórica (líneas) como función del inverso de la velocidad promedio en el espacio anular para agua y soluciones de goma xantano. La concentración de carga de sólidos es de 18%.

Otra observación importante es el hecho de que exista un aumento de la capacidad de transporte a bajas velocidades de flujo para el sistema de 6 m comparado al de 3 m. Al mejorar la distribución de sólidos en presencia de polímero se incrementa el transporte de sólidos, debido a que el polímero tiene la capacidad de arrastrar más arena a la región anular y mantenerla suspendida, afectando de manera positiva el balance de masas dentro del ánulo. En el caso del agua esto no ocurre debido a que a una velocidad de flujo dada, la cantidad de sólidos que el fluido transporta es la misma, ya que no hay forma de que este fluido arrastre mayor

cantidad de arena al conducto de sección anular, aun cuando la distribución de sólidos mejore.

Si se comparan los resultados obtenidos con goma guar (figura 9) y goma xantano (figura 10), se puede ver que la goma xantano provee una capacidad de transporte mayor en el rango de velocidades estudiados para una misma concentración de polímero.

Es importante resaltar que el modelo utilizado proporciona una excelente representación de los datos experimentales. Esta metodología permite hacer un estudio cuantitativo de la eficiencia con la que se está llevando a cabo el proceso de limpieza y remoción de cortes, sin importar las características del sistema de bombeo y recirculación del lodo. Además, estudiar las formulaciones de lodos y el efecto de distintos aditivos (incluso diferentes polímeros) agregados al lodo, en pruebas a escala de laboratorio, antes de llevarlas a escala industrial o de aplicación directa. Un ejemplo de lo dicho anteriormente se puede ver en la figura 11, donde se muestran los valores de relación de transporte de diferentes mezclas de goma xantano/goma guar a diferentes proporciones, manteniendo una concentración total de polímero de 2000 ppm en el sistema de 6 m. En primer lugar hay que acotar que el rango de este gráfico es diferente al de los anteriores porque se querían mostrar las pequeñas diferencias que existen entre los comportamientos de las diferentes mezclas utilizadas. Puede notarse que, igual que en el caso de los polímeros puros, existe una gran diferencia entre la capacidad de transporte de las soluciones poliméricas y la del agua, especialmente a bajas velocidades de flujo.

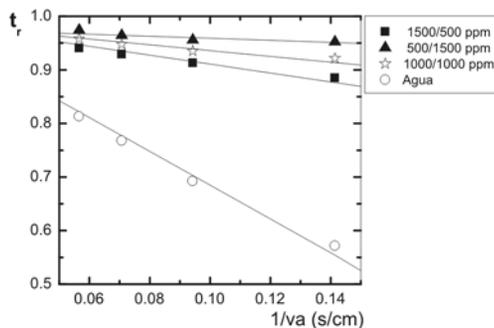


Figura 11. Relaciones de transporte experimental (puntos) y teórica (líneas) como función del inverso de la velocidad promedio en el espacio anular para agua y soluciones de mezclas GX/GG. La concentración de carga de sólidos es de 18%.

La mezcla con mejor desempeño en capacidad de transporte fue precisamente la que mejores resultados mostró en reometría de corte: GX/GG (500/1500ppm). Como puede verse en los resultados, a pesar de que las soluciones puras de

goma xantano presentan mayores viscosidades que las de goma guar a iguales concentraciones (figura 3), en mezclas es mejor tener una mayor proporción de goma guar, ya que se obtiene una mayor viscosidad y, por lo tanto, un mejor transporte de sólidos a bajas velocidades de flujo.

Aun cuando las diferencias entre las tres mezclas estudiadas son pequeñas, puede verse que es posible evaluar diferentes composiciones, de diferentes polímeros y así encontrar la que genere mejor capacidad de transporte y, por lo tanto, la posibilidad de aprovechar al máximo las propiedades viscosificantes que proveen los polímeros utilizados. En efecto, la sinergia entre la goma xantano y la goma guar a las proporciones evaluadas es tal que prácticamente la eficiencia en transporte de sólidos que se logra utilizando estas mezclas es relativamente alta, lo cual muestra la aplicación que puede tener el uso de estas soluciones biodegradables en las operaciones de perforación de hoyos para la industria petrolera.

CONCLUSIONES

El uso de biopolímeros, como la goma xantano y la goma guar en solución acuosa, mejora la suspensión y arrastre de sólidos en comparación al agua para flujo en conductos de sección anular. La presencia de polímeros permite disminuir la velocidad de sedimentación de las partículas y homogeneizar los perfiles de concentración axial de sólidos. La utilización de mezclas de goma xantano y goma guar, en especial cuando la proporción del primer polímero es menor, muestra una sinergia importante en viscosidad de corte, así como en capacidad de transporte de sólidos. Esto representa un mejor aprovechamiento de las capacidades viscosificantes de estos polímeros y, por lo tanto, una mayor aplicabilidad de estos aditivos como viscosificantes en lodos de perforación.

REFERENCIAS

- CASAS, J.A., MOHEDANO, A.F., GARCÍA-OCHOA, J. (2000). *Viscosity of guar gum and xanthan/guar gum mixture solutions*. Journal of the Science of Food and Agriculture. 80, 1722-727.
- CHIEN, S.F. (1994). *Settling Velocity of Irregularly Shaped Particles*. SPE Drilling & Completion. 281-289.
- CLARK, R.K. & BICKHAM, K.L. (1994). *A Mechanistic Model for Cuttings Transport*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September, New Orleans, Louisiana.

- GAVINET, A.A.; SOBEY, I.J. (1989). *Model Aids Cuttings Transport Prediction*. *Journal of Petroleum Technology*. 41, 916-921.
- HUSSAINI, S.M., AZAR, J.J. (1983). *EXPERIMENTAL Study of Drilled Cuttings Transport Using Common Drilling Muds*. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 23, 11-20.
- IYOHO, A. W., HORETH, J.M., VEENKAT, R. L. (1988). *A computer model for Hole-Cleaning Analysis*. *Journal of Petroleum Technology*. 40, 1183-1192.
- KENNY, P., SUNDE, E., HEMPHILL, T. (1996). *Hole Cleaning Model: What Does the Fluid-flow Index Have to Do with It?* *Journal of Petroleum Technology*. 1055-1057.
- LARSEN, T.I., PILEHVARI, A.A., AZAR, J.J. (1997). *Development of a New Cutting Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells*. SPE 25872.
- LUO, Y., BERN, P.A. (1992). *Flow-Rate Prediction for Cleaning Deviated Wells*. SPE 23884, 367-376.
- MILAS, M., RINAUDO, M. (1990) *Flow and viscoelastic properties of xanthan gum solutions*. *Macromolecules*, 23, 2506-2511.
- PÉREZ, R.M., SIQUIER, S., RAMÍREZ, N., MÜLLER, A. J., SÁEZ, A.E. (2004), *Non-Newtonian annular vertical flow of sand suspensions in aqueous solutions of Guar Gum*. *Journal Petrol. Sci. Eng.*, 44, 317.
- POWELL, J.W., PARKS, C.F., SEHEULT, J.M. (1991). *Xanthan and Welan: The Effects of Critical Polymer Concentration on Rheology and Fluid Performance*. SPE International Arctic Technology Conference, 29-31 May, Anchorage, Alaska.
- ROJAS, M. R., MENDOZA, C. E., SIQUIER, S., RAMÍREZ, N., MÜLLER, A. J., SÁEZ A.E. (2006). *Transporte de Sólidos en Flujo Anular Vertical No-Newtoniano de Soluciones de biopolímeros*. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*, 21, 57-69.
- SIFFERMAN, T.R., MYERS, G.M., HADEN, E.L., WAHL, H.A. (1974). *Drill-Cutting Transport in Full-Scale Vertical Annuli*. *Journal of Petroleum Technology*. 1295-1302.
- THOMAS, R.P., AZAR, J.J., BECKER, T.E. (1982). *Drillpipe Eccentricity Effect on Drilled Cuttings Behavior in Vertical Wellbores*. *Journal of Petroleum Technology*. 34, 1929-1937.
- WAKER, S., LI, J. (2000). *The Effect of Particle Size, Fluid Rheology, and Pipe Eccentricity on Cutting Transport*. SPE 60755, presented at the 2000 SPE / ICOTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, 5-6 April.
- WALKER, R.E., MAYES, T.M. (1975). *Design of Muds for Carrying Capacity*. *Journal of Petroleum Technology*. 27, 893-900.
- ZEIDLER, H.U. (1972). *An Experimental Analysis of the Transport of Drilling Particles*. *Society of Petroleum Engineers Journal*. *Transactions of AIME*. 253, 39-48.