

Arenas más allá del acatamiento a las normas

Por **Victoria Florencia Peñaranda**
(Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo).
Tutor: Enrique Lanza



La arena es el agente de sostén imprescindible para realizar la estimulación hidráulica en el desarrollo de no convencionales; por el momento, la oferta en la Argentina es exigua, si bien hay numerosas investigaciones en marcha. En este trabajo, premiado por la *Society of Petroleum Engineers (SPE)* de Argentina, se plantean las especificaciones que debe cumplir la arena, los ensayos más relevantes que se realizan en el control de calidad de agentes de sostén y los límites con los cuales se trabaja, según especificaciones de la norma API 19C.



Los datos obtenidos de ensayos en laboratorio, realizados bajo normas API, son una herramienta esencial en la selección del agente de sostén. A nivel internacional, se encuentra una vasta oferta que cumple con estas especificaciones, y es normal que se constate la eficiencia de las mismas en cuanto a calidad antes de llegar al uso en los pozos petroleros. Sin embargo, los costos de los agentes de sostén del exterior resultan elevados y es necesario analizar otras opciones a nivel nacional.

Una de las problemáticas actuales a la cual se enfrentan las empresas inversoras es la estrecha oferta de los agentes de sostén en la Argentina. Hasta el momento, la oferta de estos se encuentra en el umbral, y es imprescindible que cumplan las especificaciones, que se constate y confirme la calidad para que puedan adquirir competencia y puedan ser usados masivamente en el desarrollo de yacimientos no convencionales.

Resulta necesario y apremiante que se avance en mayor grado, en cuanto a investigación y desarrollo de agentes de sostén en el país. Más aun, es importante considerar las elevadas cantidades que se requerirán para la producción de hidrocarburos en el desarrollo de Yacimientos no convencionales. Estas masas son tan elevadas que la producción nacional de agentes de sostén permitirá una reducción de costos significativa en el costo total de las inversiones en el desarrollo de estos yacimientos, y un fuerte ahorro de divisas para nuestro país al reemplazar estos insumos importados por insumos nacionales. Como consecuencia, se podrá avanzar en la consolidación de este tipo de yacimientos, considerando que Argentina se encuentra como una de las mayores reservas a nivel mundial.

Surge un cuestionamiento acerca de las especificaciones de la norma. Estas fueron diseñadas principalmente para lo que se obtenía y obtiene en yacimientos ubicados en el exterior. Este modelo a seguir requiere que las arenas que se obtengan en yacimientos ubicados en nuestro territorio tengan una semejanza normativa en todos sus aspectos. Entonces, ¿qué tan riguroso deberá ser el acatamiento a las especificaciones de la norma en cuanto a valores obtenidos en el laboratorio de muestras de origen nacional? Observando los resultados estudiados, se encontró fundamentalmente que arenas de origen nacional no cumplen con el tema de redondez, cumpliendo el resto de los parámetros analizados en forma categórica.

Se describirán a continuación los ensayos más relevantes que se realizan en el control de calidad de agentes de sostén y los límites con los cuales se trabaja, según especificaciones de la norma API 19C. Gracias a la colaboración del laboratorio LECOR, perteneciente a la UNCuyo, se realizó un análisis de distintas muestras, y así se pudo observar el comportamiento de las mismas. Con los resultados obtenidos se realizó un examen para poder trazar posibles rangos de valores para los cuales el alejamiento respecto a los valores de las normas (el cual se debe a la falta de redondez) es permisible o aceptable, teniendo en cuenta valores alcanzables y a la vez razonables para el uso de agentes de sostén nacionales, considerando la absoluta razón de costo beneficio, que indudablemente será menor que en arenas del exterior.

Introducción

Agentes de sostén: consideraciones

Los agentes de sostén tienen una importancia crítica en el éxito de un tratamiento de fractura, y la efectividad del mismo determina la productividad del pozo tratado.

La elección inadecuada del agente de sostén puede conducir al fracaso de la operación, o en muchos casos los resultados no satisfacen las expectativas, conduciendo a una pérdida de producción que puede llegar a ser muy importante. Para seleccionar adecuadamente un agente de sostén, hay que conocer sus propiedades físicas y su composición. Deben efectuarse, para ello, controles previos de laboratorio, siguiendo las especificaciones de la norma Práctica Recomendada ANSI/API API 19 C, o su idéntica, la ISO 135032/2, y complementariamente se encuentran los estudios de conductividad de fractura que se pueden realizar siguiendo la norma API RP 61 (corto plazo), o la Práctica Recomendada ANSI/API 19D (largo plazo), o su idéntica ISO 13503/5.

Se deben analizar cuáles son los requerimientos del pozo y, una vez que estos estén definidos, decidir cuál es el tipo de agente de sostén que se adecúa a lo solicitado considerando además el balance técnico económico. Esto significa evaluar el precio del mismo y su calidad; ambos parámetros siempre deben considerarse a la par en el momento de la selección.

Las propiedades requeridas de los agentes de sostén para fracturación hidráulica consistirían en cumplir con consignas solicitadas por norma en cuanto a tamizado, densidad, solubilidad, turbidez, redondez y esfericidad y resistencia a la compresión.

Tipos de agentes de sostén

El agente de sostén más convencional, pionero y de mayor uso en la industria del petróleo, es la arena. Actualmente, se están desarrollando productos más resistentes que sean capaces de adaptarse a las necesidades del pozo. Los productos más comunes son:

- Arena.
- Arenas recubiertas en resina (curado completo).
- Cerámicos.
- Bauxitas.

Es importante distinguir las características propias de cada agente de sostén. La arena, por su lado, es la más económica y generalmente provee suficiente conductividad de fractura para presiones de cierre menores a 8.000 psi, según sea la malla designada para la fractura hidráulica. Su gravedad específica es cerca de 2,65.

Las arenas recubiertas en resina de curado completo pretenden cubrir el espacio entre la arena común y los agentes de sostén de alta resistencia, y se las suele designar como de "Resistencia intermedia". Tienen una conductividad similar a la de la arena convencional y pueden aumentar entre 1.000 psi a 2.000 psi la resistencia de la arena inicial.

La bauxita y los cerámicos son de alta resistencia y se usan en pozos profundos en general. Presentan el inconveniente de su costo elevado comparado con la arena y otros agentes de sostén. Otro de sus inconvenientes es su alta densidad (3,6 g/cm³ para la bauxita y 2,9 g/cm³ para los cerámicos aproximadamente). Esto implica fluidos de fracturación de mayor capacidad de acarreo, incrementando las necesidades de potencia, caudal y presión; puede resultar difícil operativamente teniendo en cuenta el tiempo de sedimentación de las partículas, ocasionando fuertes incrementos de costos.

Función del análisis de propiedades

El análisis de las propiedades de los agentes de sostén está basado en las normas, y estos procedimientos han sido desarrollados para evaluar la calidad del agente de sostén usados en la fracturación hidráulica.

Estos análisis permiten comparar las características físicas de varios agentes de sostén ensayados bajo condiciones determinadas, y hacer en consecuencia una selección adecuada acorde a las necesidades requeridas.

Herramientas de análisis usadas

Las Normas API (*American Petroleum Institute*) determinan los estándares de calidad que deben cumplir los agentes de sostén para ser aptos para el uso en fracturas hidráulicas. Estas son:

1. Práctica Recomendada ANSI/API 19C, Primera edición, mayo 2008. Medición de propiedades de agentes de sostén usados en operaciones de Fracturación



Hidráulica y *Gravel-Packing* (empaquetamiento con grava) (ISO 13503-2:2006 (Práctica recomendada, industria del petróleo y del gas-fluidos y materiales de terminación de pozos).

Esta norma provee procedimientos estándares de ensayo y determina qué parámetros físicos y químicos deben cumplir los agentes de sostén (arenas, arenas resinadas, cerámicos o bauxitas) para ser usados en fracturas hidráulicas.

Esta nueva norma reemplaza a las siguientes normas: NORMA API RP 56 – Práctica recomendada para el ensayo de arena usada en operaciones de Fracturación hidráulica; NORMA API RP 58 – Práctica recomendada para el ensayo de arena usada en operaciones de *Gravel Packing*; NORMA API RP 60 – Práctica recomendada para el ensayo de agentes de sostén de alta resistencia usada en operaciones de fracturación.

Las especificaciones de propiedades que deben cumplir los agentes de sostén se mencionan en la siguiente norma:

2. Práctica recomendada ANSI/API 19C - Primera edición, mayo 2008. Medición de propiedades de agentes de sostén usados en operaciones de fracturación y *Gravel-packing* (ISO 13503-2:2006), Práctica recomendada para la industria del petróleo y del gas natural: Fluidos y materiales para terminación de pozos) Enmienda 1: Agregado al Anexo 3: especificación para agentes de sostén.

También se pueden completar los estudios de la calidad de estos agentes de sostén evaluando la conductividad de fractura creada bajo condiciones de presión de confinamiento. Este análisis está basado en la siguiente norma:

3. NORMA API RP 61. Prácticas recomendadas para evaluar la conductividad del empaquetado con agentes de sostén de corto plazo.

Esta norma evalúa la conductividad de un agente de sostén sometido a carga en tiempos cortos de ensayo y, actualmente, en base a nuevos estudios de conductividad, la inclinación es hacia la norma ISO 13503/5, o su idéntica, la norma Práctica recomendada API 19D. Medición de la conductividad de agentes de sostén para largo plazo.

En el Laboratorio de Estudios sobre Coronas, LECOR, de la Facultad de Ingeniería de la UNCuyo, se realizan diversos trabajos a empresas del medio, relacionados con la compra o venta de agentes de sostén. El mismo trabajo certificado bajo normas de calidad ISO 9001/2008 desde el año 2000, y realiza el control de calidad de agentes de sostén bajo normas vigentes desde el año 2003.

Metodología experimental

Procedimiento de muestreo

Es fundamental una adecuada metodología de muestreo; esta asegurará la obtención de muestras homogéneas y la consecuencia radica en resultados de ensayos de control de calidad representativos.

El muestreo está destinado a minimizar los efectos de la segregación de las partículas por el tamaño. Las partículas naturalmente encuentran el camino de menor resistencia cuando se mueven o cuando se aplica una fuerza. Durante el traslado o movimiento, las partículas de diferente tamaño y masa naturalmente se separan o segregan.



En cuanto al número de muestras, en la norma se especifica una muestra por cada 9.000 kg (20.000 lb), o fracción menor de la misma. Se obtendrá un máximo de 10 muestras por contenedor a granel, las cuales serán combinadas y ensayadas.

Los principales muestreos de agentes de sostén (API RP 19 C), se realizan sobre vagones de tren o camiones, sobre bolsas (98 lb) o bolsones (3.300 lb), y además hay otro para realizar directamente durante la operación de fractura.

Todas las muestras serán obtenidas de una corriente de circulación, de agente de sostén, con un muestreador automático o manual, y se exige que los muestreos se realicen en forma dinámica (nunca en forma estática). El dispositivo de muestreo será utilizado con su longitud perpendicular a la corriente de circulación del agente de sostén. Este será pasado a una velocidad uniforme de lado a lado a través de todo el ancho de corriente del agente de sostén en movimiento, lo cual será realizado cuando el material se esté moviendo hacia o desde una cinta transportadora a un blender, camión, vagón o contenedor a granel.

Muestreo en depósitos

Actualmente, LECOR tiene 2 tipos de muestreadores, uno bajo Normas API: Muestreador para bolsas de 100 lb y otro Muestreador tipo caño cerrado, aceptado por las compañías petroleras nacionales para muestreo en bolsones. Todas las muestras que se obtengan se deben mezclar, cuartear y ser usadas como una única muestra.

Muestreo durante la fractura

Consiste en un muestreador bajo normas API para fractura, que se utiliza directamente a la salida del contenedor de arena y la tolva de entrada al blender. A partir de las dos toneladas métricas de iniciado el flujo de arena se deben tomar muestras a intervalos semejantes que aseguren la representatividad del muestreo realizado.

Análisis de tamizado

Se efectúa con el fin de verificar si la granulometría del agente de sostén es adecuada para la malla indicada y también para conocer la distribución granulométrica. Esto es importante ya que dos arenas con la misma malla y diferente distribución granulométrica, pueden tener diferente resistencia. La permeabilidad y la capacidad de flujo de la fractura dependen en gran medida de la granulometría.

Para el control de granulometría existen tamices estandarizados, cuya calidad debe cumplir con la norma ASTM E-11-81. Para cada granulometría se deben usar diversos tamices, cuya estandarización responde a lo indicado en la tabla 1.

Sieve-opening sizes											
µm											
	3 350/ 1 700	2 360/ 1 180	1 700/ 1 000	1 700/ 850	1 180/ 850	1 180/ 600	850/ 425	600/ 300	425/ 250	425/ 212	212/ 106
Typical proppant/gravel-pack size designations											
	6/12	8/16	12/18	12/20	16/20	16/30	20/40	30/50	40/60	40/70	70/140
Stack of ASTM sieves ^b											
First primary sieve in bold type	4	6	8	8	12	12	16	20	30	30	50
	6	8	12	12	16	16	20	30	40	40	70
	8	10	14	14	18	18	25	35	45	45	80
Second primary sieve in bold type	10	12	16	16	20	20	30	40	50	50	100
	12	14	18	18	25	25	35	45	60	60	120
	14	16	20	20	30	30	40	50	70	70	140
	16	20	30	30	40	40	50	70	100	100	200
	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan	pan

^a Sieve series as defined in ASTM E 11.
^b Sieves stacked in order from top to bottom.

Tabla 1. Tamaño de tamices usados para el control de agentes de sostén.

Instrumental y especificaciones

El conjunto de equipos utilizados consiste en un tamizador (Rotap), un juego de tamices, pinceles y una balanza. El tamizador proporciona la acción simultánea de rotación y de golpes suaves transversales. Debe estar calibrado con



Figura 1. Tamizador Rotap y conjunto de tamices.

las siguientes especificaciones: 290 rpm, 156 golpes/min, altura del golpeador 33,4 mm y cronómetro con precisión de +/- 5 seg. En la figura 1 se observa el tamizador junto con el juego de tamices. Por otra parte, los pinceles (necesarios para limpiar los tamices al terminar de pesar la muestra), pueden ser de nylon o similar, y la balanza debe tener una precisión de 0,1g o mejor. En la figura 2 se muestran las balanzas utilizadas en el laboratorio.



Figura 2. Balanzas.

El procedimiento operativo del ensayo es el siguiente:

- 1-Se arma la serie de tamices a utilizar según norma. Apilar un mínimo de siete tamices, controlados con un conjunto patrón (ver tabla 1) más un depósito y tapa, teniendo los tamaños de los orificios de tamiz decrecientes desde arriba a abajo. Ejemplo: para una Malla 20/40: armar el juego de tamices con los siguientes tamices: 16 – 20 – 25 – 30 – 35 – 40 – 50 – Fondo.
- 2-Se cuartea la muestra hasta reducirla a la cantidad a utilizar.
- 3-Se pesa el total de la muestra cuarteada (entre 100 y 120 gr).
- 4-Se pesa cada tamiz y se registra su masa.
- 5-Se vierte la muestra cuarteada sobre el tamiz superior, se coloca la pila de tamices además del fondo y la tapa, en el tamizador. Se tamiza durante 10 minutos.
- 6-Se retiran tamices del Rotap y se pesa individualmente el contenido de cada tamiz y el depósito de fondo.
- 7-Se calculan los porcentajes individuales de cada tamiz de acuerdo al peso obtenido anteriormente.

$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{\text{Peso Total del Tamiz}}{\text{Peso Total de la muestra}} \times 100$$

- 8- Se calcula la pérdida operativa: sumar todos los pesos individuales, restar al peso total de la muestra inicial, calcular porcentaje de pérdida (no debe superar el 0,2%).

La norma especifica que un mínimo del 90% de la muestra ensayada debe pasar el tamiz más grueso y debe ser retenido hasta el tamiz más fino de la malla especificada. Para el caso de una muestra con malla 20/40, por ejemplo, será: un mínimo del 90% debe pasar el tamiz 20 y debe quedar retenido antes del tamiz 40. También detalla que no puede quedar retenido en el tamiz superior, el más grueso, más del 0,1% del total de la muestra ensayada, y que los finos retenidos en el fondo, que corresponden a tamaños menores que el último tamiz, no superen el 1%.

Ensayo de solubilidad al ácido

La solubilidad al ácido es usada para determinar la concentración de elementos solubles en ácido que contaminan al agente de sostén, generalmente más blandos, y que al recibir el esfuerzo del cierre de la fractura se rompen y migran dentro del sistema poral artificial creado, originando pérdidas de conductividad. La norma especifica que el ensayo consiste en usar una solución 12:3 HCl:HF (12% de masa de HCl y el 3% de masa de HF).

Equipamiento y valores dentro de especificaciones

Para el ensayo se utiliza: una balanza, con una precisión de 0,001g; vaso de precipitados, entre 150 ml y 200 ml de capacidad, de polietileno o polipropileno; probeta graduada o matraz aforado, de 1.000 ml del mismo tipo de material anterior; horno (105 °C); baño de agua (66 °C); equipo analítico de filtración, resistente al ácido utilizando una técnica de filtrado al vacío y papel de filtro en forma de círculos a base de celulosa, resistente al ácido. En la figura 3 se muestran los aparatos e instrumentos que se usan en el ensayo.



Figura 3. Elementos de laboratorio utilizados en el ensayo de solubilidad.

Los valores de solubilidad de un agente de sostén son importantes desde el punto de vista de la calidad del mismo. En la tabla 2 se observan los valores admisibles de solubilidad para arenas y cerámicas.

Tamaño del agente de sostén, malla.	Solubilidad máxima, % en masa.
Arenas, arenas resinadas	
-Mayor o igual a 30/50.	2.0
-Menor a 30/50.	3.0
Bauxitas y Cerámicas	7.0

Tabla 2. Límites de solubilidad al ácido para agentes de sostén.

Ensayo de turbidez

El propósito es determinar la cantidad de partículas en suspensión u otras partículas finamente divididas que contaminan la muestra. En otras palabras, este ensayo indica los elementos blandos que posee el agente de sostén que en presencia de agua pueden crear finos en suspensión y taponar el sistema poral de la fractura.

Se realizan mediciones de la propiedad óptica de una suspensión, que resulta de la dispersión y absorción de luz por las partículas suspendidas en el líquido humectante. Cuanto mayor sea el número de turbidez, más partículas en suspensión estarán presentes. Los resultados se expresan en FTU (*Formazin Turbidity Unit* / Unidades de Turbidez de Formazina) y/o NTU (*Nephelometric Turbidity Unit* / Unidades Nefelométricas de Turbidez).



Figura 4. Agitador orbital.



Figura 5. Turbidímetro.

En la figura 4 se observa el agitador orbital utilizado para este ensayo, y en la figura 5 se muestra el turbidímetro.

La turbidez de los agentes de sostén para fracturación no deberán exceder los 250 FTU (NTU).

Determinación de la densidad bulk, Densidad aparente y Densidad absoluta del agente de sostén

La densidad bulk se refiere a la masa del agente de sostén que llena un volumen unitario e incluye al agente de sostén y a su porosidad. Se utiliza para determinar la masa del agente de sostén necesaria para llenar una fractura o un silo de almacenamiento. El procedimiento para la determinación de la densidad bulk está basado en la norma ANSI B74.4. En la figura 6 se detallan las partes del equipo utilizado (estas aparecen señaladas en negro).

La densidad aparente es medida con un fluido de baja viscosidad que moja las partículas e incluye el espacio poral. El líquido de prueba utilizado para el ensayo puede ser kerosene o petróleo parafínico y se utilizan aproximada-



Figura 6. Equipamiento para la determinación de densidad bulk y densidad aparente. En negro se tiene el equipo necesario para la densidad bulk y, en azul, para la densidad aparente. En este último, se advierte el aspecto de un picnómetro con kerosene, conteniendo la muestra ensayada en el fondo.

mente 10 g de muestra. Se observa en la figura 6 un conjunto de picnómetros utilizados en el laboratorio (indicado en azul).



Figura 7. Porosímetro al gas.



Figura 8. Vista general de la prensa de carga hidráulica. Consta de un sistema hidráulico y platos paralelos, entre los cuales se monta la celda con la muestra.



Figura 9. Celdas para el ensayo de resistencia a la rotura, en estas se carga la muestra a ensayar.

Clasificación al 10% de rotura	Presión	
	MPa	psi
1K	6,9	1.000
2K	13,8	2.000
3K	20,7	3.000
4K	27,6	4.000
5K	34,5	5.000
6K	41,4	6.000
7K	48,3	7.000
8K	55,2	8.000
9K	62,1	9.000
10K	68,9	10.000
11K	75,8	11.000
12K	82,7	12.000
13K	89,6	13.000
14K	96,5	14.000
15K	103,4	15.000

Tabla 3. Clasificación al 10% de rotura.

dos en azul). Esta densidad se utiliza para la calibración de los densitómetros usados durante la fractura y también para el tiempo de sedimentación de las partículas.

La densidad absoluta es la densidad del grano de agente de sostén. Da una estimación para la comparación entre distintos agentes de sostén en cuanto a la calidad del mismo. Es una medición directa del volumen real que ocupan los granos sin tomar en cuenta la porosidad del sistema, es decir, excluye poros que pueden estar en la arena como así también los espacios vacíos. Se utiliza el porosímetro al gas (figura 7) para su medición, el cual está basado en la Ley de Boyle.

Ensayo de resistencia a la rotura

En este ensayo se determina la calidad del agente de sostén evaluando la cantidad porcentual que se rompe cuando es sometido a una presión de confinamiento. La muestra tamizada es colocada dentro de un pistón y se la somete a diferentes cargas, midiéndose los porcentajes de rotura que pasan por el tamiz más fino de la malla seleccionada.

Cuando una arena es sometida a altos esfuerzos de compresión, se produce la rotura de parte de los granos, generando partículas de menor tamaño y de forma indefinida. Este efecto es indeseable. El grado de rotura depende del esfuerzo aplicado, de la geometría de la arena, de la superficie de contacto y de la granulometría.

Este ensayo es útil para determinar y comparar la resistencia a la rotura de distintos agentes de sostén. El análisis de los resultados obtenidos proporciona indicaciones sobre el esfuerzo máximo que puede absorber o soportar un agente de sostén cuando este se encuentre confinado en la fractura del pozo.

Equipo y especificaciones

El conjunto de herramientas consiste en una prensa hidráulica (capaz de aplicar la carga necesaria para ciertos niveles de presión; figura 8) y una celda (cuyo material co-

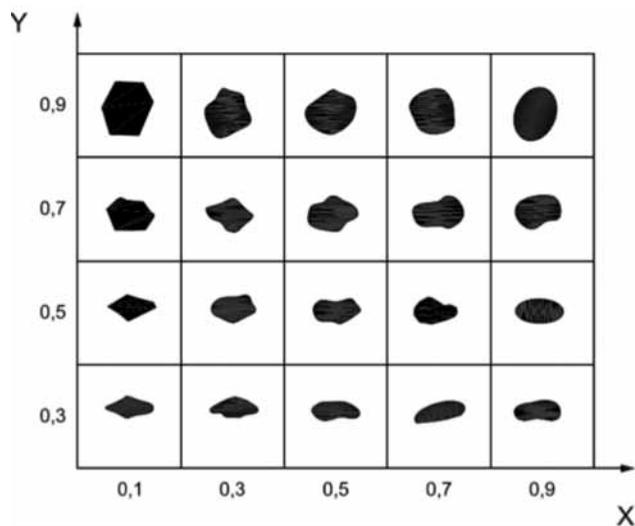


Figura 10. **Tabla de comparación visual de redondez y esfericidad.**
Referencias: X: Redondez; Y: Esfericidad

responde a un acero aleado 4340 con determinados valores de dureza; figura 9). Los otros materiales incluyen un divisor de muestras, tamices, tamizadora, balanza y temporizador.

Las normas en vigencia determinan que se debe informar la presión a la cual el agente de sostén no supera el 10% de rotura una vez ensayado, según la tabla 3.

Esfericidad y redondez del agente de sostén

En este procedimiento, se evalúa e informan las formas del agente de sostén. Se utiliza una tabla patrón (Krumbein, W.C. y Sloss, L.L.) para estimar valores de la esfericidad y redondez (figura 10).

Este sistema comparativo es visual y depende de la observación subjetiva del personal que la realiza, y puede variar para observadores diferentes.

La esfericidad determina el grado de acercamiento de la forma de la partícula examinada respecto de una esfera. La redondez, en cambio, es una medida de la rugosidad relativa de la partícula o la curvatura superficial, considerando las esquinas que pueda presentar respecto de una superficie totalmente lisa.

Estos parámetros son importantes ya que determinan

la calidad y resistencia a la compresión de los agentes de sostén; además influyen en la capacidad de flujo de la fractura. También es importante considerar el efecto que tienen estos parámetros en la capacidad de incrustamiento sobre las caras de la fractura creada; el menor incrustamiento se logra con granos que tiendan a esferas perfectas.

Es en este aparatado donde surge la necesidad de estudio y análisis de los parámetros establecidos dentro de las especificaciones de la norma. A continuación, se describe el procedimiento utilizado para determinar los valores de redondez y esfericidad y, al final de dicha descripción, se citan los valores que tendrían que tener las arenas y cerámicos según lo establecido por la norma.

Materiales y procedimientos

La comparación visual es subjetiva y debe efectuarse con binocular de 10 a 40 X, comparando la muestra analizada con las formas indicadas en el gráfico patrón de la figura 10. La balanza analítica debe tener una precisión de 0,001g.

Procedimiento:

- 1-Mezclar la muestra con el cuarteador hasta obtener una muestra reducida, 1 g o 2 g.
- 2-Seleccionar un mínimo de 25 granos al azar; se enumeran y se fotografían.
- 3-La redondez y esfericidad se determina por comparación con tabla visual(*) dando los valores sugeridos por la misma.
- 4-Se informa el valor de esfericidad y redondez de la muestra calculando la media aritmética de dichas mediciones individuales.

(*) "Carta para la estimulación visual de la esfericidad y redondez en la estratigrafía y la sedimentación", Segunda edición Krumbein, W.C. y Sloss, L.L.

Límites y especificaciones

La norma proporciona ciertos rangos de valores admisibles para la redondez y esfericidad. Para los cerámicos y bauxitas, estos deben tener una esfericidad y redondez promedio de 0,7 o mayor en ambos casos. Para las arenas se especifica una esfericidad y redondez promedio de 0,6 o mayor en ambos casos.

Cuando los agentes de sostén son evaluados, se les da un valor de redondez y esfericidad promedio por compa-

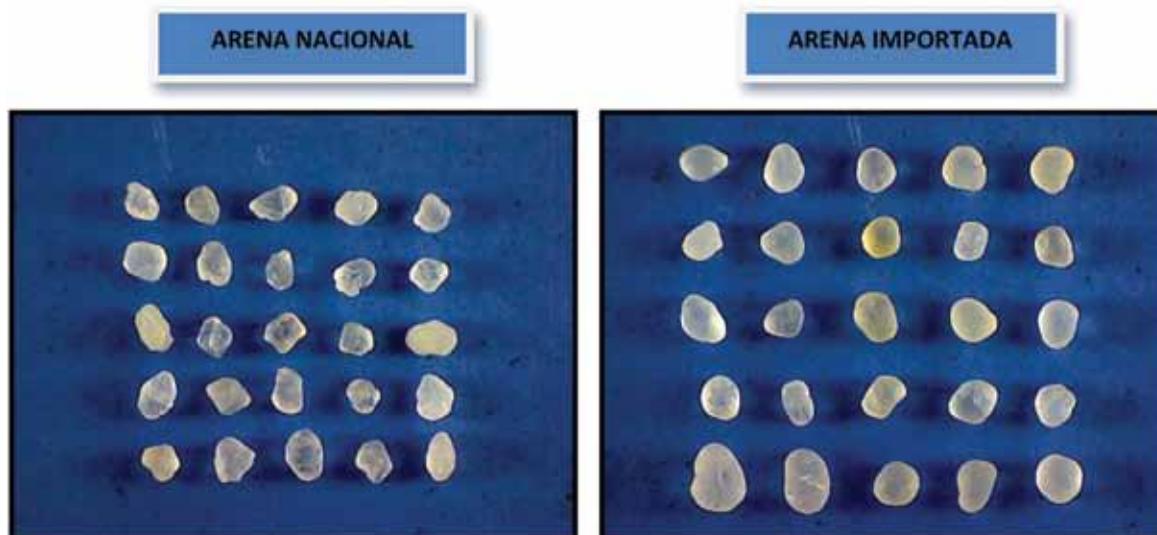


Figura 11. **Comparación entre una arena nacional y una importada.**

ración con la tabla. Si estos cumplen con los valores mencionados en el párrafo anterior, se dice que el agente de sostén ensayado está dentro de las especificaciones de la norma, o que cumple con las especificaciones de redondez y esfericidad.

Análisis y resultados

Debido a la necesidad de grandes cantidades de agentes de sostén involucradas en fracturas hidráulicas de yacimientos no convencionales a desarrollar en la Argentina, se evalúa actualmente la producción de agentes de sostén naturales dentro del país.

Primeramente, es preciso aclarar la peculiaridad de la carta de comparación utilizada como herramienta para determinar la redondez. Observando la figura 10 (tabla de comparación visual de redondez y esfericidad de Krumbein, W.C. y Sloss, L.L.), se puede notar que los granos patrón de la tabla consisten en una figura bidimensional, cuyos bordes periféricos no muestran la superficie total de los granos a evaluar.

En el momento de hacer un análisis comparativo para determinar la redondez de cada grano analizado, resulta vacilante o subjetivo asignarle un valor, pues en la partícula se pueden percibir angulosidades que presenta en todo su volumen, mientras que en la carta de comparación solo se ve un plano de la misma. Si observamos las muestras según su perfil (según tabla), daría una redondez quizás superior a la verdadera, para la cual debe considerarse la rugosidad del grano en su totalidad y no únicamente la superficie perimetral. Se puede acotar que este tipo de tabla funciona muy bien con agentes de sostén importados, los cuales generalmente tienen una redondez y esfericidad muy buena, que cumplen holgadamente con los límites solicitados por norma. En la figura 11 se puede percibir la notoria diferencia en cuanto a la geometría y forma del agente de sostén de una arena nacional y una importada.

Al realizar los estudios de parámetros de arenas nacionales se encontró que, en general, los resultados de la mayoría de los ensayos realizados a estos agentes están dentro de la normativa internacional actualmente en uso.

Al analizar la redondez de las arenas nacionales, evaluándolas de modo tal de considerar la totalidad de la superficie de las muestras (no solo su perímetro planar), e

intentando mantenerse lo más ajustado posible a la tabla presentada por las normas en vigencia, se pecaría como resultado que la redondez de las arenas nacionales quedaría fuera de especificación, ya que no llegan al 0,6 de promedio solicitado.

Si se descartara la posibilidad de usar agentes de sostén nacionales, por no cumplir con la redondez necesaria, se podría estar perdiendo la posibilidad de lograr una fuerte reducción de costos en las fracturas hidráulicas y también un gran ahorro de divisas, ya que no se estarían comprando insumos importados. Además, se debe considerar que el consumo de este material va a crecer exponencialmente en el desarrollo de los yacimientos no convencionales.

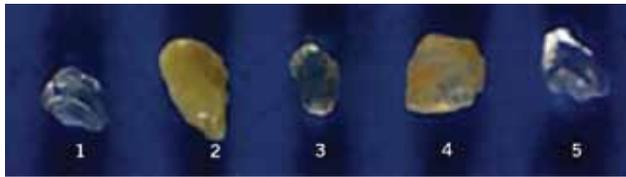
La re-evaluación de la redondez de arenas nacionales se presenta entonces como una alternativa para poder comenzar a usarlas masivamente en los yacimientos, aunque no cumplan con la norma en este ítem. Esto es siempre y cuando se demuestre fehacientemente que los otros parámetros en juego cumplan perfectamente con valores solicitados por norma. Lo antedicho podría influir en gran medida en el desarrollo de campos nacionales.

Entonces, se piensa que no se debería excluir a aquellos agentes de sostén que presenten valores de redondez menores que los especificados por norma. Eventualmente se podría, a nivel nacional, bajar los requerimientos de redondez solicitados por la norma. En el siguiente apartado se amplía este tema, recurriendo a ensayos realizados en el Laboratorio de Estudios sobre Coronas LECOR.

Estudio de agentes de sostén nacionales

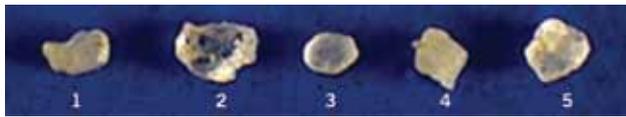
Se estudiaron distintas muestras de arenas nacionales, analizando parámetros de redondez, esfericidad, resistencia a la rotura y porcentaje de finos. El análisis de la redondez subjetivo usado, se basó en la evaluación del grano en su totalidad considerando su superficie; no se consideró un análisis estrictamente perimetral.

En cada una de las figuras siguientes, se observan 5 granos de arenas con distintos valores de redondez y resistencia a la rotura. La malla de todas las muestras es la misma y por practicidad solo se muestran 5 granos en lugar de los 25. Los valores de redondez y esfericidad de estos 5 granos al examinarlos resultaron ser representativos del valor promedio de redondez y esfericidad obtenido para los 25 granos.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,3	0,7
2	0,3	0,5
3	0,7	0,7
4	0,3	0,9
5	0,1	0,5
Promedio	0,34	0,66
Presión (psi)	4.000	
Finos (%)	7	
Clasificación al 10% de rotura	4K	

Figura 12. Resumen de propiedades, muestra 1.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,3	0,7
2	0,3	0,3
3	0,9	0,7
4	0,1	0,5
5	0,5	0,5
Promedio	0,42	0,54
Presión (psi)	5.000	
Finos (%)	37,3	
Clasificación al 10% de rotura	-	

Figura 13. Resumen de propiedades, muestra 3.

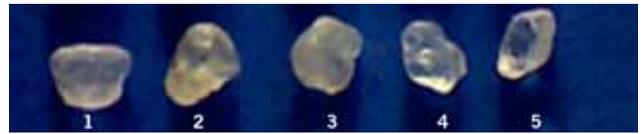
En las figuras 12 y 13 se observan muestras con valores de resistencia no tan aceptables. La primera muestra se clasificó como 4K y se nota el bajo valor de redondez obtenido. En la figura 13 la redondez mejora, pero cuando se la ensayó a 5000 psi, la cantidad de finos que se extrajeron del tamiz fueron mayores al 10%, lo cual deja a la muestra fuera de especificaciones.

En las próximas muestras ensayadas, los valores de redondez y de resistencia a la rotura mejoran y, en lo que respecta al porcentaje de finos, este está dentro de los límites de la norma.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,9	0,7
2	0,5	0,5
3	0,5	0,7
4	0,7	0,7
5	0,3	0,3
Promedio	0,58	0,58
Presión (psi)	5.000	
Finos (%)	8,9	
Clasificación al 10% de rotura	5K	

Figura 14. Resumen de propiedades, muestra 4.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,7	0,9
2	0,5	0,5
3	0,5	0,7
4	0,3	0,5
5	0,3	0,5
Promedio	0,46	0,62
Presión (psi)	6.000	
Finos (%)	9	
Clasificación al 10% de rotura	6K	

Figura 15. Resumen de propiedades, muestra 2.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,3	0,7
2	0,5	0,7
3	0,1	0,3
4	0,7	0,7
5	0,5	0,5
Promedio	0,42	0,58
Presión (psi)	6.000	
Finos (%)	5	
Clasificación al 10% de rotura	6K	

Figura 16. Resumen de propiedades, muestra 7.

En las muestras que se presentan a continuación, se puede percatar la mejora en cuanto a resistencia, mientras que la redondez comprende valores del orden de 0,4.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,5	0,7
2	0,3	0,5
3	0,5	0,7
4	0,7	0,9
5	0,3	0,7
Promedio	0,46	0,7
Presión (psi)	7.000	
Finos (%)	6,3	
Clasificación al 10% de rotura	7K	

Figura 17. Resumen de propiedades, muestra 5.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,3	0,7
2	0,7	0,9
3	0,3	0,3
4	0,5	0,7

5	0,3	0,7
Promedio	0,42	0,66
Presión (psi)	7.000	
Finos (%)	10	
Clasificación al 10% de rotura	7K	

Figura 18. Resumen de propiedades, muestra 6.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,3	0,3
2	0,5	0,7
3	0,7	0,7
4	0,1	0,7
5	0,5	0,5
Promedio	0,42	0,58
Presión (psi)	7.000	
Finos (%)	9,5	
Clasificación al 10% de rotura	7K	

Figura 19. Resumen de propiedades, muestra 8.

En ninguna de las muestras analizadas la redondez supera el 0,6 exigido por la norma. Sin embargo, los valores de resistencia a la rotura resultan ser alentadores a la hora de seleccionar el agente de sostén. Una clasificación al 10% de rotura de 7K es bastante satisfactoria, considerando además que el porcentaje de finos se encuentra dentro de las especificaciones.

Con los resultados obtenidos, se percibe entonces que no necesariamente para una buena resistencia a la rotura se debe tener una redondez superior o igual a 0,6. En los ejemplos analizados, se observa que basta una redondez del orden de 0,4 aproximadamente (esto es considerando la rugosidad superficial de la arena).

El análisis anterior tiene una secuela muy importante. Con una redondez del orden de 0,4, el agente de sostén no debe ser excluido de la carta de selección, sino que se debe proceder a analizar su resistencia y recién ahí juzgar la calidad del mismo.

Comparación de redondez con arenas del exterior

Como se mencionó en la introducción del apartado de Análisis y resultados, los valores de redondez y esfericidad especificados por norma se adaptan muy bien a las arenas importadas. En la figura 20 se presenta una fotografía para el análisis de redondez y esfericidad de una arena importada.



Nº	Redondez	Esfericidad
1	0,7	0,5
2	0,5	0,7
3	0,7	0,9
4	0,7	0,7
5	0,9	0,9
Promedio	0,7	0,74

Figura 20. Análisis de redondez y esfericidad de una arena importada.

Es muy evidente a simple vista la diferencia en cuanto a la forma del grano al compararla con una arena nacional. La superficie volumétrica de la arena importada presenta muy pocas irregularidades, es menos angulosa y más lisa que una arena del país.

En este caso, los valores obtenidos de redondez y esfericidad sí cumplen con lo especificado por la norma; cuando se ensayó la misma para el análisis de resistencia la rotura no redundó ser, en gran medida, superior a la nacional, sino que alcanzó valores similares y en algunos casos la arena nacional superó a esta.

Consideraciones acerca de la conductividad de fractura

Algunas empresas internacionales de primer nivel están desarrollando nuevas configuraciones de agentes de sostén, cuyo diseño se aleja de las convencionales esferas. Uno de estos modelos consiste en cerámicos con forma de varillas columnares, que actúan como pequeños cilindros dejando canales altamente conductores a lo largo de la fractura. Esto produce un notable aumento de la conductividad para el paso del fluido.

Un modelo en desarrollo por parte de la empresa Baker Hughes se puede observar en la figura 21, donde se puede apreciar la irregularidad de los granos. Uno de los objetivos buscados con esta geometría fue mejorar la conductividad de fractura.



Figura 21. Muestra de agente de sostén con características distintivas en cuanto a su forma.

En el reporte donde aparece la figura 21, se menciona la aplicación eficiente en el campo de este agente, mostrando datos obtenidos en dos pozos; en uno de ellos se usaron agentes de sostén tradicionales y, en el otro, los diseñados. El pozo tratado con el agente de sostén en prueba resultó tener mayor producción, recuperó el fluido bombeado al pozo en menos tiempo que el tratado con el agente de sostén convencional.

Estos desarrollos estarían sugiriendo que no se precisa una redondez perfecta para obtener buenos resultados en cuanto a sus propiedades. Resulta más relevante enfocarse en otras propiedades, como por ejemplo resistencia a la

Conductividad mDft (miliDarcy pie)

Presión psi	Datos *	Datos LECOR
	Arena internacional K*h	promedios K*h
1000	2993	3087
2000	2686	2730
4000	2081	2104
6000	1158	1457
8000	429	941
10000	202	640
12000	94	456

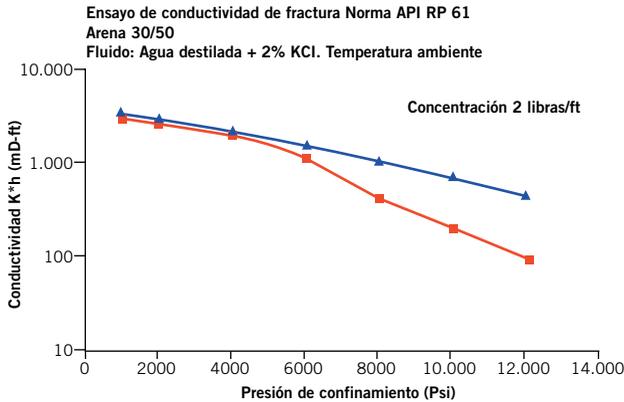


Figura 22. Ensayo de conductividad de fractura, *short term*. Promedio Arenas Nacionales (azul); Arena importada (rojo). *Datos difundidos en sitio web.

rotura, conductividad de fractura, y demás parámetros especificados en las normas.

Si bien se requieren numerosos ensayos para concluir que la conductividad de arenas nacionales en general es buena, se presenta en la figura 22 una comparación gráfica de conductividad $K \cdot h$ entre un promedio de algunas arenas nacionales y una arena importada. Este ensayo podría considerarse representativo para poder comparar conductividades de arenas del país con arenas del exterior.

En la figura 23 se puede observar el promedio de permeabilidad obtenido para arenas nacionales, y también la permeabilidad de arenas importadas.

Permeabilidad D (Darcy)

Presión psi	Datos *	Datos LECOR
	Arena internacional Darcy	promedios Darcy
1000	158	163
2000	142	149
4000	119	120
6000	67	88
8000	25	60
10000	12	43
12000	6	32

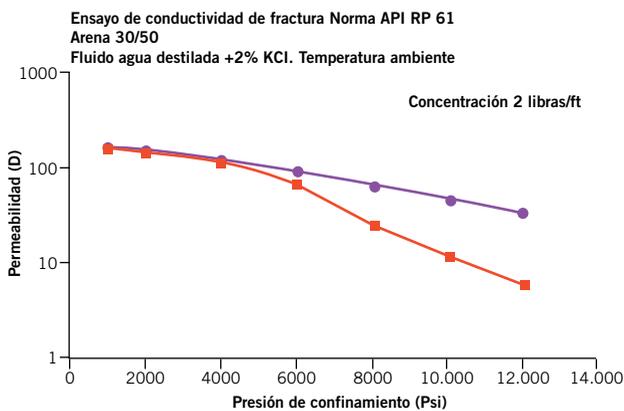


Figura 23. Ensayo de conductividad de fractura, *short term*. Promedio Arenas Nacionales (violeta); Arena importada (rojo). *Datos difundidos en sitio web.

Costos estimativos

Los valores de costos presentados en la tabla 4 son aproximados y pueden diferir de los verdaderos, por tanto deben tomarse como una noción de los mismos. Estos se deberán corroborar y ratificar con las fuentes correspondientes.

Arenas puestas en yacimiento (USD/ton)	
Nacionales	Importadas(USA)
230	550

Tabla 4. Comparación de costos Arenas nacionales vs. Arenas del exterior.

Para cerámicos:

- Brasil 1300 USD/ton
- USA 1200 USD/ton
- China 900 USD/ton

Conclusión

En la Argentina, existe un gran potencial en los yacimientos no convencionales, cuyo desarrollo tendrá como consecuencia la independencia energética. En la actualidad, la transferencia de divisas al exterior por la falta de combustible y la compra de estos en el mercado internacional (GNL) merma las posibilidades de desarrollo industrial del país por la fuerte erogación de divisas.

El tema de las arenas comienza a ser valioso en lo que respecta a la disminución de costos de las fracturas hidráulicas (considerando la fuerte demanda que tendrá el uso de estos agentes de sostén en los campos no convencionales) y también como fuente de trabajo y distribución de riquezas por el desarrollo de la minería asociada a la producción de arenas en el país.

Actualmente, para las fracturas hidráulicas se están usando toneladas y toneladas de arenas del exterior y, en este hecho, sería más conveniente o provechoso utilizar el producto nacional, pues cumple con las especificaciones de la norma utilizada internacionalmente a excepción de la redondez.

Se analizó el efecto de la redondez en la resistencia a la rotura, valores de redondez del orden de 0,4 y más fueron los que se ensayaron y resultaron tener valores de resistencia aceptables. Los valores especificados por norma en cuanto a redondez, según el criterio usado en el presente trabajo, dejarían fuera de especificación a la mayoría de las arenas nacionales. Sin embargo, según los resultados obtenidos en los estudios realizados, se tendría como conclusión que este ítem no sería determinativo a la hora de descartar el uso de agentes de sostén nacionales, ya que cumplen el resto de parámetros solicitados por norma.

Se sugiere que no necesariamente debiera haber un acatamiento riguroso a valores límites fijados bajo especificación para la redondez, siempre y cuando los parámetros restantes demuestren buenas propiedades y resultados enfocados principalmente en la resistencia a la compresión (nuestros yacimientos no convencionales son bastante profundos) y parámetros de conductividad.

Si bien el trabajo necesario para la puesta en marcha de plantas de producción de arenas recién está empezando y resultará laborioso, es alentador el hecho de que arenas nacionales estén dando muy buenos resultados en sus propiedades. Esto garantiza la calidad de las mismas a la hora de utilizarlas en el desarrollo de yacimientos no convencionales.

El recurso estaría disponible en el país y, por tanto, también estarían presentes las posibilidades de abaratar los costos, aumentar la rentabilidad de la producción de hidrocarburos y un fuerte ahorro de divisas, creando fuentes de trabajo sustentables. Con esto, habría una disminución de la dependencia rigurosa y costosa de arenas para fracturas hidráulicas importadas, y permitiría el desarrollo de industrias nacionales con una fuerte expansión de la economía en nuestro país.

Finalmente, pensamos que aunque los valores de redondez de las arenas nacionales no estén dentro de especificación, evaluadas según el criterio descrito en el presente trabajo, no debería ser un impedimento para ser usadas como agentes de sostén de yacimientos no convencionales, o quizás se deberían reevaluar los límites sugeridos por las normas de nivel internacional, para adecuarlas a los posibles agentes de sostén de origen nacional.

Referencias bibliográficas

- ANSI/API RP 19C (2008), *Measurement of Properties of Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-packing Operations*.
- ANSI/API RP 19C (2008), *Part 2: Measurement of Properties of Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-packing Operations; AMENDMENT 1: Addition of Annex B: Proppand specification*.
- API RP 61 (1989) *Recommended Practices for Evaluating Short Term Proppant Pack Conductivity*.
- Baker Hughes, División de Hughes Service Company (1986), *Fracturación Hidráulica*.
- Economides, M. y Nolte K. (2000). *Reservoir Stimulation*. West Sussex: Editorial John Wiley & Sons, Ltd.
- Gidley, J. [et al.] (1989). *Recent Advances in Hydraulic Fracturing*. En Monograph Volume 12; SPE Henry L. Doherty Series.
- <http://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/baker-hughes-liteprop-brochure>; [14 de noviembre de 2013]
- <http://www.propzone.com/unifrac-fracturing-sands.cfm>; [19 de noviembre de 2013]
- Lanza, Enrique (2012). *Guía de Control de calidad de Agentes de sostén*.
- Rassenfoss, S. (2013). *In search of Bigger, Stronger and Lighter, Ways to open paths for oil production*. En *Journal of Petroleum Technology*, volumen 65, nº 4, pp 35-46.

Agradecimientos

Se agradece a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización del trabajo: Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería, Dirección de Estudios Tecnológicos e Investigaciones (DETI), Dirección



general de la Carrera de Ingeniería de Petróleos, Instituto del Petróleo y Reservorios Naturales (IPERA), y particularmente, al Laboratorio de Estudios Sobre Coronas (LECOR).

Respecto a la elaboración de esta monografía se agradece en especial al Profesor y Jefe de laboratorio Enrique Lanza, por sus correcciones y sugerencias, por el apoyo recibido y por la predisposición, quien guió durante todo este proceso ofreciendo su amplia experiencia, conocimientos y su tiempo.

Enrique Domingo Lanza, tutor de la monografía "Más allá del acatamiento a las normas en el control de calidad de agentes de sostén", premiada por la SPE Argentina, es técnico químico y en petróleo por la Escuela técnico industrial "Emilio Civit". Desde 1988 es Jefe de Trabajos Prácticos en la Cátedra Geología del Petróleo y dicta clases para las Cátedras de Reservorios I, Reservorios II, Exploración Petrolera de la carrera de Ing. de Petróleos y la cátedra de Mecánica de fluidos de la carrera de Ingeniería Industrial e Ing. Mecatrónica en la Universidad Nacional de Cuyo. También es jefe de laboratorio - Diseño y construcción de Equipamiento y de Laboratorio Petrofísico (Lecor - Laboratorio de Estudios sobre Coronas) perteneciente al IPERN (Instituto del Petróleo y Reservorios Naturales), DETI (Dirección de Estudios Tecnológicos e Investigaciones) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo. Se ha desempeñado como Supervisor de terminación y Reparación de Pozos (Yacimientos de Mendoza al servicio de YPF S.A.) y Operador Autónomo del Laboratorio Petrofísico y de estimulación (LAE - Laboratorio de Análisis especiales) - UPSTREAM - Diseño y Construcción de Laboratorio Móvil para Control de Calidad de Aguas de Recuperación Secundaria - YPF S.A., así como Supervisor de terminación y Reparación de Pozos. Diseño y Construcción de equipos Especiales. Cuencas Cuyana (Mendoza Norte), Neuquina (Malargüe - Mza), Rincón de los Sauces (Neuquen), del Golfo de San Jorge (Santa Cruz Norte) - YPF S.A. entre otros cargos de responsabilidad.

Finalmente, se agradece al personal del laboratorio LECOR, quienes brindaron activamente su tiempo y experiencia en cuanto a ensayos. ■