

EL USO DE VARILLAS DE BOMBEO AISI 4320 EN ENTORNOS CORROSIVOS COMO EXPERIENCIA DE CAMPO

Marisa Poli, Guillermo Ramírez, Fabián Salas
Repsol YPF

Diego E. Olmos, Alejandro Ameglio
Siderca Varillas de Bombeo

Rodolfo Tapia
Siderca

Abstract

Este trabajo tiene por objeto describir la experiencia con el uso de varillas de bombeo de acero AISI 4320 en los entornos corrosivos de la Unidad Económica Rincón de los Sauces (Neuquén – Argentina) de Repsol-YPF y mostrar los resultados obtenidos hasta el momento.

Estos pozos poseen un alto contenido de CO₂ en gas. Además, la contaminación bacteriana del reservorio durante la recuperación secundaria produjo un aumento en la concentración de SH₂ en el gas. La presencia de estos ácidos convierte a estos pozos en muy corrosivos.

En el año 2000, previa selección de pozos candidatos, se comenzaron a utilizar varillas de bombeo de acero AISI 4320 en once pozos, todos con alto índice de pescas, con la finalidad de evaluar su performance. Este acero tiene las mismas propiedades mecánicas que una varilla API Grado D pero su composición química es semejante a la varilla API Grado K.

El nuevo material ofreció una mejor performance que el material de uso estándar (AISI 4142), especialmente en medios con alto contenido de gas CO₂. Con el uso de estas varillas el número de intervenciones se redujo notablemente.

Introducción

La Unidad Económica Rincón de los Sauces (Neuquén – Argentina) de Repsol-YPF posee pozos productores de petróleo con fluidos de elevada corrosividad, en los yacimientos Chihuídos de la Sierra Negra y Lomitas.

Los pozos que están utilizando este tipo de varillas, tienen profundidades entre 1000-1200 m, producciones brutas entre 100-150 m³/d y porcentajes de agua entre 70-80 %.

El sistema de extracción utilizado es, en su mayoría, el bombeo mecánico.

El nivel de cargas y sollicitaciones que tiene estos pozos hacen prácticamente imposible el uso de varillas tipo API Grado K.

Por otra parte, las instalaciones de producción cuentan con tuberías de diámetro 2 7/8" que ante los altos caudales de producción, dificultan la acción de los inhibidores de corrosión (alta velocidad de flujo)

Estos fluidos poseen un alto contenido de CO₂ en gas (50 - 70 % molar), con presiones de trabajo que oscilan entre 70 - 100 psi (482,63 - 689,47 kPa), originando presiones parciales de CO₂ superiores a 30 psi (206,84 kPa).

De acuerdo al criterio NACE y a lo observado en la práctica, estos pozos son muy corrosivos desde el punto de vista de la corrosión carbónica.

Estos yacimientos han tenido, además, en los últimos años una gran influencia de la recuperación secundaria, lo que ocasionó un incremento en la concentración de SH₂ en gas, producido principalmente por la contaminación bacteriana del reservorio.

La presencia del gas agrio cataliza el proceso corrosivo, por lo que es prioritario el uso de materiales con mayor resistencia a la corrosión para prolongar su vida útil.

En el año 1998 se realizaron ensayos con varillas de bombeo revestidas con bronce-aluminio.

Dicha experiencia duró 2 años y tuvo muy buenos resultados, pero la solución apuntaba principalmente a un grupo pequeño de pozos de alto caudal de petróleo y alto índice de pescas que justificaban la ecuación económica de la solución. Aún así, hoy existen sartas de este material que acumulan más de 4 años de uso.

Para lograr una solución general fue necesario buscar una alternativa distinta a los aceros utilizados hasta el momento y es así como a partir del año 2000 se inicia la utilización de varillas de bombeo de acero AISI 4320 con la finalidad de evaluar su performance.

Desarrollo

1 - Características del acero

La varilla de bombeo de acero AISI 4320 tiene las propiedades mecánicas de una varilla API Grado D y composición química semejante a la varilla API Grado K.

La microestructura que posee, luego del tratamiento térmico de normalizado y revenido, es bainítica.

Sus propiedades mecánicas son las siguientes:

- Tensión de Fluencia (Ksi): 85 mínimo (586,05 MPa)
- Tensión de rotura (Ksi): 115/140 (792,89/965,26 MPa)

En estos yacimientos se utilizan habitualmente las varillas de bombeo Grado D (Acero AISI 4142). La tabla 1 muestra la diferencia entre las composiciones químicas de ambos aceros:

Tabla 1- Composición química de los aceros AISI 4142 y AISI 4320

Elemento	AISI 4142	AISI 4320
C	0,40 - 0,45	0,18 - 0,24
Mn	0,75 - 1,00	0,80 - 1,00
S	0,025 Máximo	0,025 Máximo
P	0,025 Máximo	0,025 Máximo
Si	0,15 - 0,35	0,15 - 0,35
Ni	0,25 Máximo	1,15 - 1,50
Cr	0,80 - 1,10	0,70 - 0,90
Mo	0,15 - 0,25	0,20 - 0,30
V	-	0,03 - 0,07
Cu	0,25 Máximo	0,25 Máximo

Tal como lo indica la tabla 1, las diferencias se encuentran en el contenido de Carbono y en los aleantes que le otorgan resistencia a la corrosión (Níquel, Cromo y Molibdeno).

2 - Características del medio corrosivo

Un análisis de agua de formación típico de los pozos en ensayo es el que se muestra en la tabla 2:

Tabla 2- Caracterización del agua de formación de los pozos en ensayo

Aniones y cationes	Concentración (mg/l)
Cloruros	73.500
Carbonatos	0
Bicarbonatos	2.086
Sulfatos	2.200
Hierro Total	2
Calcio	1.806
Magnesio	240
Sodio	47.000
Bario	0
CO2 disuelto	308
SH2 disuelto	0,20

pH: 6,7
Temperatura (°C): 30
Densidad (gr/cm³): 1,08

El contenido de dióxido de carbono en el gas de entrecolumna oscila entre 60-70 % molar, mientras que el contenido de sulfhídrico es variable y muy particular para cada pozo.
En la tabla 3 se observan los valores de SH₂ para cada uno de los pozos en ensayo:

Tabla 3- Contenido de SH₂ en gas de entrecolumna de los pozos en ensayo

Pozo	SH ₂ (ppm)
A	500
B	600
C	4.000
D	1.900
E	s/d
F	s/d
1	250
2	7.000
3	750
4	800
5	100

3 - Ensayos de Laboratorio

Previo a la instalación en los pozos se realizaron ensayos, en el Centro de Investigación Industrial (CINI) del grupo Techint, para estudiar el comportamiento en medios corrosivos de los distintos aceros utilizados por Siderca para varillas grado D (4320, 4142M y 1530).

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

3-1 - Resistencia al Sulfide Stress Cracking (SSC)

Se evaluó siguiendo los métodos A y D de la norma NACE 0177-96. Es claro que estos ensayos no reproducen las condiciones reales de servicio de las varillas, ya que se trata de métodos que aplican cargas estáticas y no alternativas como las reales.

- **Método A:** como medio de ensayo se utilizó solución NACE A (pH = 2,7) con burbujeo de SH₂.
De las 12 probetas ensayadas (3 de cada tipo de acero), 11 rompieron en tiempos muy cortos (menores a 22 horas). Sólo una probeta (4142) superó las 720 horas.
Los resultados obtenidos (gran proporción de probetas rotas, muy bajos tiempos de rotura) indican que todos los materiales deben considerarse como altamente susceptibles a la SSC, es decir no adecuados para uso en medio agrio.
- **Método D:** la solución y gas de ensayo fueron los mismos utilizados para el método A. Este método es un ensayo de carácter fractomecánico que permite calcular el factor de intensidad de tensiones crítico del material (K_{ISSC}).
De acuerdo a los resultados obtenidos, el material de mejor performance fue el AISI 1530 y el de peor performance fue el AISI 4320.

3-2 – Ensayos de inmersión

Se expuso una probeta de cada uno de los aceros durante 400 horas en solución NACE A, con burbujeo en SH₂. Cada probeta se extrajo del cuerpo de la varilla mediante cortes transversales y luego del ensayo se realizó un corte longitudinal, analizando el perímetro de las caras resultantes del mismo, utilizando microscopio óptico y SEM/EDX. Las principales observaciones muestran que sobre superficies pulidas, el acero 4320 resultó con el picado más profundo, en algunos casos con propagación de fisura desde la punta del pit, lo que confirma la alta susceptibilidad al SSC.

3-3 – Ensayos en medios ricos en CO₂

Para evaluar la resistencia a la corrosión en medios ricos en CO₂, se utilizaron las siguientes técnicas electroquímicas:

- Resistencia de polarización lineal (LPR)
- Barrido potenciodinámico

Se evaluó una probeta tomada del cuerpo para cada formulación de acero, utilizando electrodo de cilindro rotatorio. Las variables de ensayo se muestran en la tabla 4 y la solución salina utilizada se observa en la tabla 5:

Tabla 4- Variables de ensayo utilizadas en el ensayo en medios ricos en CO₂

Variable	Valor
Velocidad equivalente de flujo (m/s)	2,5
Temperatura (°C)	60
Presión Total (bar)	1
Presión parcial de CO ₂	1
pH	5,35

Tabla 5- Composición de la solución salina utilizada en el ensayo

Ión	Concentración (mg/l)
Cloruros	75.000
Sulfatos	1.400
Bicarbonatos	900
Calcio	1.500
Magnesio	350
Sodio + Potasio	47.500

Los resultados de los ensayos LPR (que deben considerarse como una medida de la velocidad de corrosión generalizada experimentada por el material desnudo) se observan en la tabla 6, en la cual se puede apreciar que el acero 4320 fue el que presentó los mejores resultados:

Tabla 6- Resultados de ensayos LPR

Tipo de acero	Velocidad de corrosión (mm/año)
4320	1,6
4142 M	2,4
1530	2,9

Los barridos potenciodinámicos indicaron que el acero 4320 presenta un potencial más noble que los restantes materiales, por lo cual actuaría como cátodo (reduciendo su velocidad de corrosión) en caso de estar en servicio en contacto con otros materiales del grupo estudiado, en un medio similar al utilizado en el laboratorio.

4 – Experiencia de campo

Previo a la instalación se llevó a cabo un proceso de selección de pozos candidatos, que consistió en evaluar la cantidad de intervenciones por año, así como también el costo de materiales asociado a cada pozo.

Otro factor tenido en cuenta en la selección fue el uso de centralizadores inyectados sobre las varillas para evitar el rozamiento contra el tubing.

Los resultados de la experiencia de campo que se describe a continuación se dividen en dos grupos:

4-1 / Pozos con posterior cambio de sistema extractivo

4-2 / Pozos actualmente en uso

4-1 – Sartas bajadas en pozos con posterior cambio de sistema de extracción.

Se instalaron 6 sartas completas (una de ellas se volvió a reutilizar en otros 2 pozos) en pozos a los que, posteriormente, se les cambió de sistema de extracción por bombeo electrosumergible, resultando todas ellas sin indicios de corrosión. Los tiempos de ensayos de dichas sartas se observan en la tabla 7:

Tabla 7- Tiempos de ensayo de sartas bajadas en pozos que tuvieron cambio de sistema de extracción

Pozo	Tiempo de ensayo (meses)
A	20
B	18
C	7
D	7
E (ex C)	4,5 (11,5)
F (ex C y E)	4,5 (16)

Las observaciones más importantes se realizaron en los pozos A, B y D. Las mismas se detallan a continuación:

- **Pozo A:** la sarta fue instalada el 01/04/00. En dicha intervención, las varillas que fueron retiradas del pozo (API Grado D-4142M) mostraron un incipiente ataque carbónico localizado, a pesar de tener solamente 30 días de uso y habiéndose bajado nuevas. La sarta de varillas 4320 fue retirada el 07/12/01 por cambio de sistema a BES, la misma se encontró en muy buenas condiciones, sin indicio de ataque corrosivo (ver foto 1). El pozo se encontraba con en tratamiento anticorrosivo en forma continua. La sarta fue recuperada en su totalidad y luego se destinó otro pozo.
Tiempo de ensayo: 20 meses

Foto 1- Cuerpo varilla. bombeo. 4320 pozo A



- **Pozo B:** Este pozo acumulaba 3 pescas en el año 2000. La sarta fue instalada el 07/01/01. A los 60 días se produjo una pesca en cuerpo de varilla de 7/8". En esta intervención se cambiaron 84 varillas de 7/8" por nuevas y se prosiguió con el ensayo. Mediante análisis de falla realizado por el CINI, se llegó a la conclusión que la rotura de la varilla se habría producido por un piting del tipo bacteriano, dada la morfología del mismo y el tipo de productos de corrosión (sulfuros de hierro) encontrados en la varilla. Es importante aclarar que ninguno de los tres tipos de acero al carbono habitualmente utilizados para varilla de bombeo grado D son inmunes a este tipo de agente agresivo (BSR). La sarta se retiró el 01/07/02 por cambio de sistema de extracción. El resultado de la inspección electromagnética determinó que la totalidad de las varillas se recuperaron como grado 2.

Tiempo de ensayo: 18 meses

- **Pozo D:** La sarta fue instalada el 27/01/02, y fue retirada el 26/08/02 por cambio de sistema de extracción a BES. A pesar de estar solamente 7 meses en uso, en este pozo se obtuvieron importantes conclusiones. En primer lugar la inspección no destructiva determinó que todas las varillas resultaron recuperadas grado 2, pero las barras de peso diámetro 1.5" (fabricadas en acero AISI 4142) resultaron con un importante ataque localizado (ver fotos 2 y 3), lo que marca una diferencia en el comportamiento de los dos tipos de aceros frente al mismo entorno corrosivo.

Tiempo de ensayo: 7 meses

Foto 2- Cuerpo varilla de bombeo 4320 pozo D



Foto 3- Cuerpo barras de peso 4142 pozo D



4-2 – *Sartas actualmente en uso*

En la actualidad existen 5 sartas completas de este material en uso. Los tiempos de ensayos de dichas sartas se observan en la tabla 8:

Tabla 8- Tiempos de ensayo de sartas actualmente en uso

Pozo	Tiempo de ensayo (meses)
1	33
2	21
3	21
4	4 (23)*
5	3

* El pozo funcionó 19 meses con sarta combinada, y 4 meses con acero 4320.

Las observaciones más importantes se realizaron en los pozos 1, 2 y 4. Las mismas se detallan a continuación:

- **Pozo 1:** Esta sarta fue la primera en instalarse en el yacimiento. La fecha de bajada fue el 23/02/00 y es la que mayor duración tuvo hasta la fecha.
Aplicando el criterio de evaluar costos en iguales períodos de tiempo (33 meses) previos y posteriores a la bajada del nuevo material, se observa que hay una importante reducción en los costos tanto de pulling como de varillas de bombeo, dado que hubo 3 pescas (29/04/99, 30/12/99 y 23/02/00) en el período previo y en el período posterior no se han originado pescas hasta el momento. Los números se observan en la tabla 9:

Tabla 9- Costos de pulling y varilla de bombeo previos y posteriores a la bajada del nuevo material en Pozo 1

	Período Previo	Período Posterior
Costo pulling (U\$S)	28.953,74	9.660,51
Costo varillas (U\$S)	25.958,74	10.400,34
Costo total (U\$S)	54.912,48	20.060,85

A los 30 meses de ensayo (02/10/02) el pozo tuvo una intervención por mejora de producción. Se observó el estado de la sarta y la misma salió sin ningún indicio de corrosión (ver fotos 4 y 5).

Tiempo de ensayo: 33 meses

Foto 4- Cuerpo varilla de bombeo 4320 pozo 1

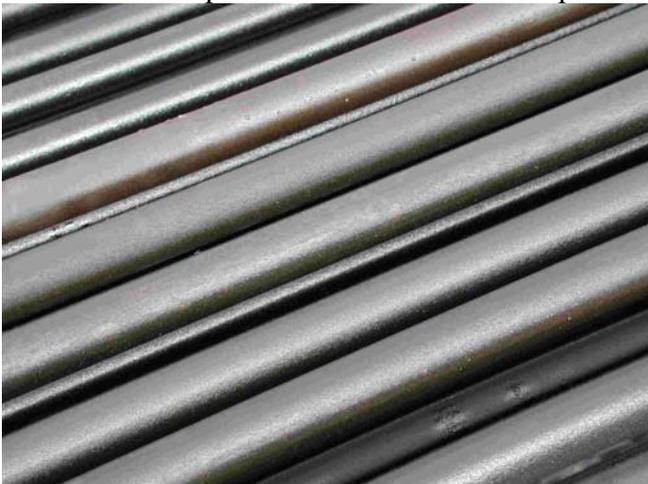


Foto 5- Cebolla y cuadrante varilla de bombeo 4320 pozo 1



- **Pozo 2:** La sarta se bajó el 26/02/01. Al igual que en el pozo 1, se observa que hay una importante reducción en los costos tanto de pulling como de varillas de bombeo, dado que también hubo 3 pescas (16/06/99, 21/06/00 y 26/02/01) en el período previo y en el período posterior no se han originado pescas hasta el momento. Los números se observan en la tabla 10:

Tabla 10- Costos de pulling y varilla de bombeo previos y posteriores a la bajada del nuevo material en Pozo 2

	Período Previo	Período Posterior
Costo pulling (U\$S)	20.442,53	5.098,60
Costo varillas (U\$S)	20.195,01	12.404,69
Costo total (U\$S)	40.637,54	17.503,29

Tiempo de ensayo: 21 meses

- **Pozo 4:** En este pozo se bajaron el 29/12/00 varillas de 1” de acero AISI 4142 combinadas con varillas de 7/8” de acero AISI 4320. En una intervención realizada por cambio de bomba 19 meses después (22/07/02), las varilla de bombeo 1” salieron con corrosión carbónica localizada en cuerpo y con mayor intensidad en la cebolla y cuadrante, mientras que las varilla de bombeo 7/8” salieron intactas (ver fotos 6 y 7).

Las varilla de bombeo de 7/8” se bajaron nuevamente al pozo y se completó la sarta con varilla de bombeo 1” de acero 4320 que se recuperaron de la inspección no destructiva del pozo B.

Tiempo de ensayo: 23 meses

Foto 6- Cebolla y cuadrante varilla de bombeo 1” de acero 4142 pozo 4 con corrosión carbónica localizada (varilla de bombeo 4320 sin corrosión)



Foto 7- Cuerpo varilla de bombeo 1” de acero 4142 pozo 4 con corrosión carbónica localizada (varilla de bombeo 4320 sin corrosión)



- **Pozo 5:** Se realizó la instalación de una sarta completa de varillas AISI 4320 el 27/8/2002. Luego de 60 días en servicio, el pozo registró una intervención por pesca de varillas. Se realizó el correspondiente análisis de falla resultando que la rotura se originó en un pit profundo de corrosión del tipo sulfhídrica (SH_2).
Aún cuando el contenido de gas agrio (SH_2) es el más bajo del grupo de pozos en estudio, existía una condición distintiva respecto del resto dada por el alto nivel de cargas en este pozo (mayor al 100% de capacidad nominal), y la presencia de cargas compresivas, posibles generadoras de pandeo por flexión de las varillas.
De todas formas se decidió continuar con el estudio del pozo, instalando una nueva columna de varillas AISI 4320.
Se están realizando análisis complementarios para determinar algún otro rasgo distintivo de esta falla.

Foto 8- varilla AISI 4320 diámetro 7/8" (pozo 5) con evidencias de ataque corrosivo localizado.



Conclusiones

- En los ensayos de laboratorio, este material demostró una pobre performance en ambientes agrios (SH_2). Específicamente posee una muy baja resistencia al fenómeno SSC (Sulfide Stress Cracking) (de acuerdo a la norma NACE MR 0175, no se recomiendan aceros con contenidos de Ni mayores al 1% para evitar este fenómeno)
- En ambientes corrosivos dulces (CO_2), el material mostró una buena performance, mejor aún que al acero AISI 4142 utilizado normalmente para fabricar varillas de bombeo Grado D.

- Aún conociendo estas limitaciones, se decidió instalar estas varillas como ensayo de campo, considerando que ni el entorno corrosivo ni el nivel de cargas de los pozos era tan agresivo como el usado en las pruebas de laboratorio.
- Los resultados obtenidos hasta el momento respaldan la decisión de instalar este tipo de varillas, dado que a la fecha, con 11 pozos ensayados (todos con elevado índice de pescas) solamente se registraron dos pescas de varillas por corrosión (pozo B y pozo 5).
- Se logró una importante reducción en el número de intervenciones y en los costos de materiales y pulling asociados a las mismas.
- Como conclusión final del trabajo, queda demostrado que el nuevo material utilizado en el yacimiento (AISI 4320) ofreció una mejor performance respecto al material de uso standard (AISI 4142), prevaleciendo su buen comportamiento en un medio con alto contenido de gas CO₂.

Referencias

- API Norma 11B. Especificaciones para varillas de bombeo. Ed. 26. Enero 1998.
- API Práctica Recomendada 11BR. Ed 11. Octubre 1989.
- NACE MR 0175, "Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Material for Oilfield Equipment".
- D. Olmos, A. Ameglio, R. Tapia, L. Da Silva, G. Ramirez and M. Poli, "A Field Experience Against Corrosion: Performance Report of Bronze" (SPE 69369).
- M. Poli, G. Galiano, J. Alvarez, H. Otera, H. Panarello and R. Cordero, "A Non-Conventional Study for Determination of H₂S in Production Gas", Journal Canadian Petroleum Technology (November 2002).
- C. Morales and T. Perez, "Performance in corrosive environments of the different steels used by Metalmecánica for API Grade D sucker rods ", Report 1641/00, Centro de Investigación Industrial de la Organización Techint, Buenos Aires, Argentina (Junio 2000).
- NACE, "Corrosion Control in Petroleum Production" (1979).
- NACE TM 0177, "Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking at Ambient Temperatures".

Los Autores

- Rodolfo Tapia es Ingeniero Químico de la Universidad Nacional del Comahue, Neuquén (1993).
Trabajó inicialmente en el Departamento de Química de esta institución, en tareas de monitoreo y detección de contaminantes orgánicos del río Colorado.
Pasó a desempeñarse en la industria del petróleo en 1995, trabajando en compañías de servicios que operan en la Cuenca Neuquina.
Desde 1997 pertenece al Departamento de Asistencia Técnica de Siderca, cumpliendo la tarea específica de asesoramiento a clientes del mercado local en la selección de materiales que minimicen los efectos de la corrosión en instalaciones de producción de petróleo y gas.
- Alejandro F. Ameglio es Ingeniero en Petróleo de la Universidad Nacional de Cuyo (Mendoza 1997).
Inicialmente desarrolló tareas como Asistente en Ingeniería de Reservorios de la empresa Tecpetrol (Grupo Techint).
Desde 1997 pertenece al departamento de Asistencia Técnica a Clientes de la empresa Siderca Varillas de Bombeo, con base en la ciudad de Neuquén.
- Diego Olmos es Ing. Mecánico Aeronáutico de la Universidad Nacional de Córdoba (1995).

Se desempeñó en el departamento de Aseguramiento de Calidad de Siderca SAIC hasta el año 1996.

A partir de allí, pasó al departamento de Asistencia Técnica a Clientes de Siderca Varillas de Bombeo, tareas que cumplió hasta 1998.

Desde esa fecha desempeña la gerencia comercial técnica de dicha empresa.

- Marisa Poli es Ingeniera Química egresada de UTN, Regional Rosario. Tiene un Postgrado en “Metalurgia y Tecnología de Materiales”, (CNEA, 1982).
Entre 1982 y 1985 trabajó en la CNEA, Centro Atómico Constituyentes, Depto. de Materiales, laboratorio de Corrosión.
Ingresó en YPF en 1985 en la Gerencia de Investigación y Desarrollo, Sector Materiales y Corrosión. En 1994 pasó a desempeñarse en el Centro de Tecnología Aplicada del Upstream en Luján de Cuyo, Mendoza, trabajando en el área de servicios de apoyo a operaciones del Upstream.
En 1997 pasó a desempeñarse en la U.E. Rincón de los Sauces en el Sector Recuperación Secundaria y desde abril del 2000 trabaja en Tecnología de Producción del Area Servicios de Ingeniería de dicha Unidad Económica.
Es miembro NACE desde 1998.
- Guillermo Ramírez es Ingeniero en Petróleo egresado de la Universidad Nacional de Cuyo. Ingresó a YPF S.A. en 1983 en el Sector Estudios de Extracción del Area Rincón de los Sauces.
Desempeñó tareas en: Ingeniería de Producción, Sector Gas realizando tareas para pozos del Yacimiento Loma la Lata; Reparación y Terminación de Pozos (RTP) de la Administración Plaza Huinul; Ingeniería de Producción de la Regional Plaza Huinul.
Se desempeñó en el Yacimiento Rincón de los Sauces, Regional Oeste, como jefe de Tecnología de Producción del Area Servicios de Ingeniería de la Unidad Económica Rincón de los Sauces y actualmente como jefe del Area Ingeniería de dicha Unidad Económica.