

ESTRATEGIA INTEGRAL DE MONITOREO Y OPTIMIZACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: INTEGRACIÓN DE DATOS DE LABORATORIO Y CAMPO

Andrea Moneta, Catalina Dazeo, Camila Galotto

moneta@giegroup.net , cdazeo@giegroup.net, cgalotto@giegroup.net

1. Sinopsis

La implantación y evaluación de inhibidores de corrosión en operación real plantea desafíos técnicos y económicos: cobertura limitada y representatividad de puntos de monitoreo, disponibilidad de instrumentos y variabilidad de condiciones de proceso.

Este trabajo presenta un enfoque práctico de toma de decisiones sustentado en la integración de fuentes de datos y en criterios de calidad y representatividad de mediciones. Se analizan casos de campo donde coexistieron cupones de corrosión, mediciones ER/LPR, análisis electroquímicos ex situ y concentraciones residuales de inhibidor. Sobre esa base se aplicó un esquema de trabajo que: (i) valida datos y detecta lecturas no confiables o puntos mal ubicados; (ii) construye tendencias operativas robustas; (iii) ajusta experimentalmente la dosificación (y, cuando corresponde, relocaliza puntos de medición o modifica la estrategia de monitoreo); y (iv) verifica la efectividad posterior. Los resultados muestran que, mediante un análisis crítico e integral (experiencia de laboratorio + monitoreo de campo + conocimiento del sistema), es posible confirmar dosis, mantener las tasas de corrosión dentro de objetivos y evitar sobreconsumos de producto, mejorando simultáneamente la confiabilidad de la protección y la eficiencia operativa. El trabajo detalla variables monitoreadas, herramientas empleadas y criterios de aceptación y ajuste para facilitar la replicabilidad industrial del enfoque.

2. Introducción

Los inhibidores de corrosión son sustancias que se agregan a una tubería para reducir la tasa de corrosión. Funcionan adsorbiéndose en una superficie metálica y formando una película protectora, aunque también pueden adsorberse a los sólidos o incrustaciones presentes en el sistema. Su eficacia depende no sólo de su composición sino también del material de la tubería, los mecanismos de corrosión, la composición del fluido y el tipo de flujo. Es necesario introducir el inhibidor en la fase que mayormente se encuentre en contacto con la pared de la tubería. Esto se puede lograr solo si se conocen los patrones de flujo y las distribuciones de fase en diferentes condiciones. La selección debe iniciarse con pruebas de rendimiento en laboratorio.

El rendimiento de un tratamiento químico puede verse afectado por la temperatura, la velocidad, la solubilidad, la compatibilidad con otros productos y la disponibilidad químicos. La consistencia en la calidad del producto químico a lo largo del tiempo también puede afectar el rendimiento del tratamiento.

En el proceso de gestión de uso de un inhibidor de corrosión es fundamental contar con un sistema de monitoreo confiable para evaluar su eficacia y optimizar de esta forma la relación performance/costos.

A continuación, se presenta una propuesta de etapas para seleccionar, inyectar y monitorear estos químicos a partir de casos de estudio reales.

3. Desarrollo

3.1. Pruebas en laboratorio

Antes de evaluar un tratamiento químico candidato en el campo, se utilizan pruebas de laboratorio que proporcionan un medio simple, compacto, rápido y económico para elegir el o los productos que mejor respuesta den al sistema. Los resultados de las pruebas deben poder predecir el rendimiento del tratamiento en términos de eficiencia del inhibidor y deben ser escalables (es decir; realizados bajo condiciones hidrodinámicas diversas y lo más representativas del sistema posibles).

Al llevar a cabo evaluaciones de inhibidores de corrosión en el laboratorio, es imperativo definir las condiciones de operación del sistema y el método de inyección, ya que estos parámetros tienen una influencia significativa en el rendimiento del producto.

La eficiencia de estos químicos generalmente se expresa mediante una medida de las tasas de corrosión en el sistema sin inhibidor y después de su aplicación, según la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia del Inhibidor} = 100 \times \frac{CR_{\text{sin inhibidor}} - CR_{\text{con inhibidor}}}{CR_{\text{sin inhibidor}}}$$

Donde:

- $CR_{\text{sin inhibidor}}$ = tasa de corrosión del sistema sin inhibidor.
- $CR_{\text{con inhibidor}}$ = tasa de corrosión del sistema inhibidor.

Para una evaluación completa del rendimiento de un inhibidor candidato, las pruebas de laboratorio no solo deben evaluar su eficiencia, sino también otras propiedades como partición, solubilidad, tendencia a la emulsificación y formación de espuma, estabilidad térmica, entre otras.

Existen varias pruebas de laboratorio disponibles para evaluar el rendimiento del inhibidor. Las metodologías sugeridas en la norma ASTM G170 incluyen:

- Electrodo de Cilindro Rotatorio (RCE).
- Jaula Rotatoria (RC).
- Impacto de Chorro (JI).

Otras pruebas utilizadas para evaluar el desempeño de inhibidores de corrosión incluyen las pruebas de burbujeo (kettle) y las pruebas de lazo de flujo (flow loop). Las técnicas de medición asociadas a cada una de estas metodologías pueden incluir pérdida de masa, técnicas electroquímicas o ambas.

Si bien el monitoreo en laboratorio no suele presentar grandes dificultades ni costos elevados - dado que las condiciones son controladas según el equipamiento disponible y la calidad de la información puede verificarse mediante la repetición de ensayos o la variación de condiciones-, en ocasiones ciertos productos exhiben comportamientos inesperados. Por ejemplo, los ensayos en celdas kettle se realizan a bajas velocidades, condición que puede no ser representativa del sistema real. Cuando en campo predomina un régimen de flujo turbulento, esta limitación resulta significativa, ya que las bajas velocidades tienden a reducir el grado de dispersión del producto, disminuyendo consecuentemente su capacidad de adsorción sobre las paredes metálicas y, por ende, su eficiencia aparente.

No obstante, existen escenarios en los que las velocidades de flujo en campo son efectivamente bajas, lo que convierte al ensayo kettle en una representación más fiel del sistema. El Caso de Estudio 1 ilustra esta situación: como se observa en la Figura 1, el Producto C presenta eficiencias negativas inesperadas atribuibles a una dispersión inadecuada que genera una distribución heterogénea del agente inhibidor. En comparación con los demás productos evaluados, el

Producto C muestra un desempeño inferior bajo condiciones representativas del sistema real, lo cual permite utilizarlo como criterio de descarte temprano. Cabe señalar que este producto había sido probado directamente en campo antes de que se implementara el protocolo de evaluación previa en laboratorio en esta operación productiva, y su eficiencia y capacidad de protección habían resultado insatisfactorias, requiriendo finalmente su descarte. Este antecedente demuestra cómo los ensayos de laboratorio permiten optimizar tiempo y recursos, dado que la escala reducida demanda significativamente menos producto y períodos de evaluación más cortos, agilizando así la toma de decisiones.

En cuanto a la utilidad de cada tipo de ensayo, es importante reconocer que ninguna metodología individual proporcionará información completa sobre el comportamiento de un producto. La selección del método experimental debe basarse en los objetivos específicos de la evaluación, considerando las limitaciones inherentes de cada técnica. En el caso del ensayo kettle, la ausencia de mezcla dinámica puede restringir su aplicabilidad para productos susceptibles a problemas de dispersión; sin embargo, esta técnica conserva su valor para la obtención de resultados cualitativos comparativos entre productos evaluados bajo las mismas condiciones controladas.

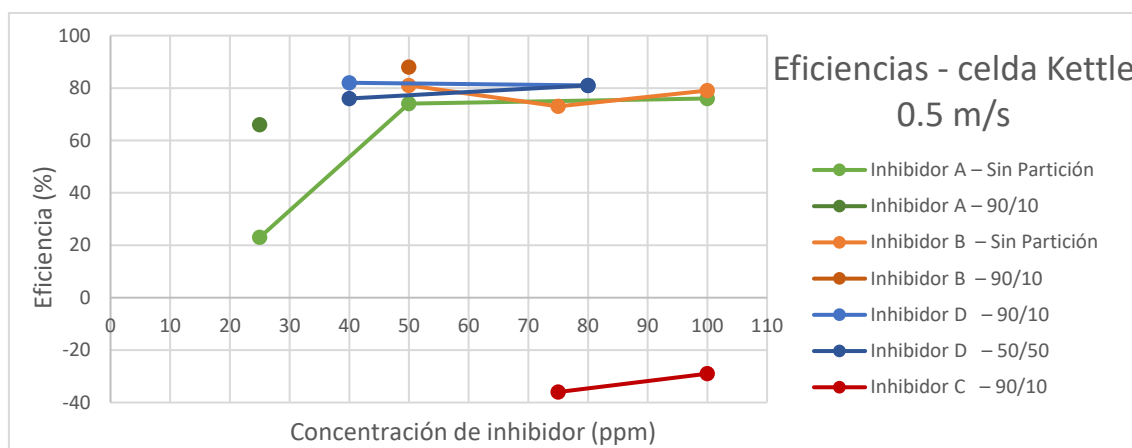


Figura 1. Caso de estudio 1: Resultados de los ensayos de eficiencia en celda Kettle a 0.5 m/s.

3.2. Implantación de un nuevo inhibidor de corrosión

Previo al ensayo del inhibidor en campo se requiere el análisis de la condición del sistema bajo el tratamiento químico en uso. Para ello se realizan análisis fisicoquímicos del agua (pH, CO₂, sulfuros, hierro ferroso, hierro total, cloruros, conductividad, sólidos totales disueltos, salinidad, sulfatos, dureza total), medición de residual de amina y registros de velocidad de corrosión en puntos de monitoreo seleccionados.

La primera etapa del proceso de implantación del nuevo tratamiento químico es llamada “Blanqueamiento” ya que se detiene la inyección del inhibidor de corrosión en uso hasta lograr que no se detecte su presencia en los análisis fisicoquímicos. En función de la evolución del sistema, determinado a partir de las mediciones de velocidad de corrosión y resultados de los análisis químicos, esta etapa puede demandar entre 5 y 10 días, manteniéndose las condiciones operativas relativamente estables como en el ejemplo mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de condiciones operativas durante la etapa de blanqueamiento.

Condiciones operacionales	Valores de referencia: inicio 26/03	Valores de referencia: fin 04/04
Producción de gas (MMscfd)	14.65	14.7
Producción de condensado (bbl/d)	225.51	234.6
Producción de agua (bbl/d)	176.56	170.2
Corte de agua	44%	42%
Presión de línea en pozo (psig)	432	410
Temperatura de línea en pozo (°F)	150 (65.5°C)	151.6 (66°C)
Presión de línea en planta (psig)	182	182
Temperatura de línea en planta (°F)	78 (25.5°C)	77 (25°C)
Caudal inyección de inhibidor (l/d)	0	0
Caudal inyección de bactericida (l/d)	2.5	2.5

Como consecuencia de la remoción de la película protectora se espera que la velocidad de corrosión aumente. En la Figura 2 se muestra la evolución de la velocidad de corrosión en una sonda de resistencia eléctrica durante las etapas de implantación del nuevo inhibidor. A continuación de la etapa de blanqueamiento se pueden visualizar el cambio de tendencia en pérdida de metal al comenzar a inyectar el producto (formación de película) y una estabilización posterior en la dosis de mantenimiento. Durante esta última etapa se había producido una obturación del sistema de inyección de inhibidor, por lo que se visualiza un incremento transitorio de la velocidad de corrosión. Esto demuestra la importancia de realizar monitoreo con alta frecuencia, con el fin de detectar fallas de manera temprana.

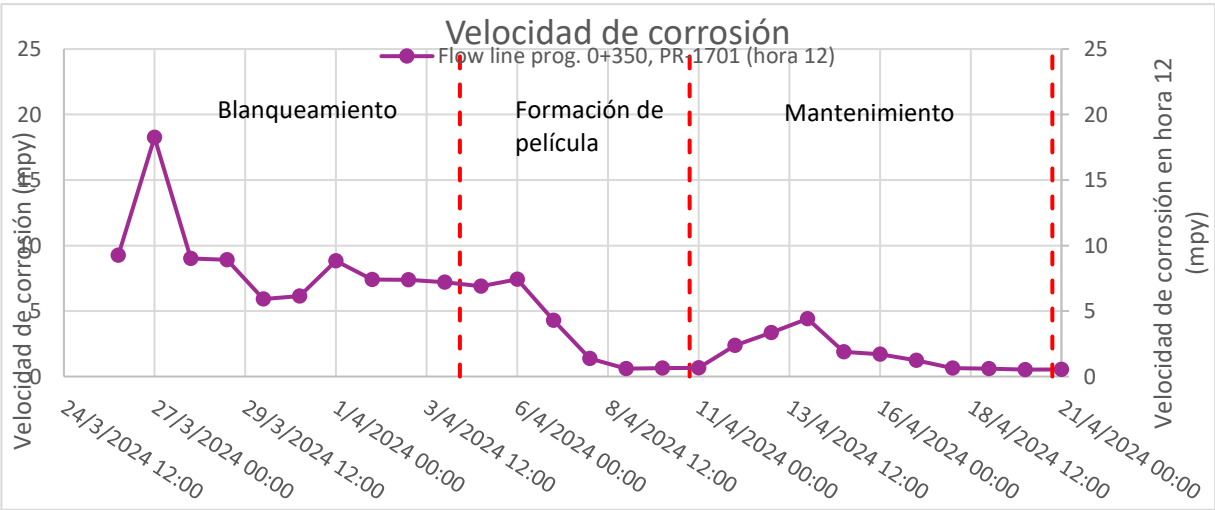


Figura 2. Velocidad de corrosión Caso de Estudio 1 – Etapas desde blanqueamiento a mantenimiento.

Para realizar una primera aproximación del rango en el que se encontrará la dosificación de inhibidor en campo se tienen en cuenta los resultados de la etapa de evaluación de laboratorio del

producto a implementar, cálculos teóricos en función de la concentración óptima determinada y características operativas del sistema, cálculos teóricos en función de la geometría del sistema y recomendaciones del proveedor de la química en base a la experiencia en la implementación del producto.

Como punto de partida para el ajuste del tratamiento químico, el proveedor de producto recomienda una dosis de mantenimiento en función del caudal de gas transportado, teniendo en consideración las condiciones operativas del sistema.

A continuación se mostrará un ejemplo de definición de dosificación inicial. En la Tabla 2 se detallan los caudales de producción que fueron contemplados por el proveedor de la química y el consumo diario resultante del producto.

Tabla 2. Dosis de aplicación del producto - Recomendación técnica del proveedor.

Pozo	Gas (SCFD)	Agua (BPD)	Dosis recomendada (l/MMSCFD)		Consumo asociado (l/d)	
			Formación película	Mantenimiento	Formación película	Mantenimiento
XX	14500000	177	4	1.2	58	17.5

Ahora bien, el volumen del producto químico debe basarse en la cantidad de agua que se transporta, en lugar del índice de flujo de petróleo o gas. El cálculo del volumen de inhibidor de corrosión a implementar en función de los fluidos de producción y el desempeño del producto a escala de laboratorio se obtiene a partir del siguiente calculo teórico:

$$V_{IC} = \left\{ \left[\left(\frac{Cf}{f} \right) \times V_{H_2O} \div 10^6 \right] \times 159 \right\}$$

Ecuación 1. Calculo teórico del volumen de inhibidor a implementar.

Donde:

V_{IC} es el volumen de inhibidor en l/d;

Cf es la concentración óptima del inhibidor de corrosión en el agua en ppm;

f es la fracción de agua en el sistema;

V_{H_2O} es el volumen de agua transportado en BPD; y

La Tabla 3 indica los datos de producción considerados y la dosificación a implementar de acuerdo con los resultados de la Ecuación 1.

Tabla 3. Dosis de aplicación del producto - Calculo teórico por caudales de producción.

Pozo	Datos de producción				Cf (ppm)	Dosificación mantenimiento (l/MMSCFD)	Consumo asociado (l/d)
	Gas (MMSCFD)	Condensado (BPD)	Agua (BPD)	Fracción de agua			
XX	14.508	261	177	0.404	60	0.288	4.18

En líneas generales, se utiliza la recomendación del proveedor como primera aproximación y luego se disminuye y se ajusta considerando el cálculo teórico por caudales de producción.

3.3. Seguimiento de performance de inhibidores – Técnicas de monitoreo y optimización

En los monitoreos de rutina en sistemas donde un inhibidor ya está en inyección continua, el objetivo es acompañar los cambios de las variables operativas con ajustes en la dosificación. No

se trata solo de medir corrosión, sino de interpretar críticamente los datos para tomar decisiones económicamente eficientes y técnicamente robustas.

A continuación, se detallan diferentes formas de monitorear la performance de los inhibidores de corrosión y casos prácticos de aplicación donde cada una de estas técnicas resultó implementable o más adecuada:

- Seguimiento de fisicoquímicos: dióxido de carbono disuelto y el hierro ferroso.

El monitoreo continuo del dióxido de carbono disuelto y del hierro ferroso constituye una herramienta fundamental para evaluar el estado corrosivo de un sistema de producción y la eficiencia de los inhibidores de corrosión aplicados. En el Caso de Estudio 2 presentado, los datos registrados entre 2021 y 2026 en los pozos productores de un yacimiento convencional (Pozo 7, Pozo 8, Pozo K2 y Pozo K3) muestran que las concentraciones de CO_2 disuelto se han mantenido consistentemente por debajo de las 100 ppm, muy por debajo del criterio de aceptación de 250 ppm, lo que indica que el sistema opera dentro de parámetros controlados. De manera complementaria, las concentraciones de hierro ferroso (Fe^{2+}) se han estabilizado en un rango de 10 a 20 ppm en la mayoría de los pozos, valores que reflejan una actividad corrosiva moderada y sostenida en el tiempo.

La relevancia de estos dos parámetros radica en su estrecha relación con los mecanismos de corrosión: el CO_2 disuelto en agua de formación genera ácido carbónico, el cual ataca directamente las superficies metálicas de la tubería, mientras que el hierro ferroso liberado es un producto directo de esa disolución metálica, actuando como indicador cuantitativo de la magnitud del deterioro. Por tanto, la tendencia descendente y la estabilización de ambos parámetros a lo largo del período analizado sugieren que el inhibidor de corrosión empleado ha logrado formar una barrera protectora efectiva sobre las superficies metálicas, reduciendo la tasa de reacción corrosiva. No obstante, el incremento puntual observado en el Pozo K2 para el CO_2 disuelto merece atención, ya que podría señalar una variación en las condiciones del reservorio, una disminución en la dosificación del inhibidor, o un cambio en las proporciones de agua de producción que requiera una revisión del programa de tratamiento químico.

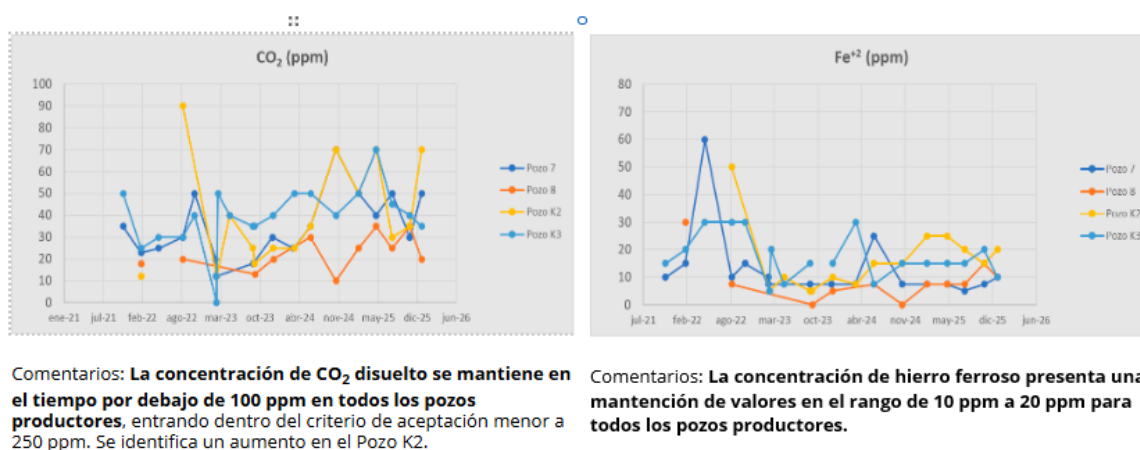


Figura 3. Caso de estudio 2: Parámetros medidos para el monitoreo de la corrosión interna.

Otro ejemplo es el del Caso de Estudio 1: luego del descarte de productos de baja eficiencia y la efectiva preselección del producto candidato mediante las pruebas en el laboratorio, se realizaron pruebas de campo en las que se midió el hierro ferroso en la etapa de blanqueamiento. Esta práctica que permitió observar que aguas debajo de la flowline se presentó una gran variación respecto al contenido de hierro presente en cada muestra durante los primeros días, estabilizándose finalmente en valores superiores a los registrados con el sistema protegido con el

inhibidor de corrosión actual. Este comportamiento indicó que efectivamente existe una mayor velocidad de corrosión a lo largo del ducto debido a la remoción de la película filmica, y que posteriormente se estabiliza alcanzando los niveles de protección deseados.

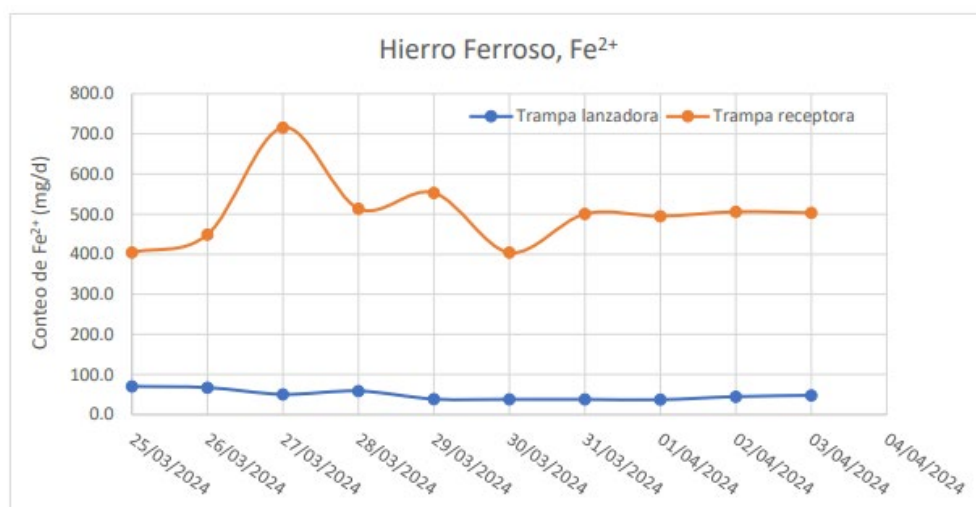


Figura 4. Contaje de hierro ferroso – Blanqueamiento – Pozo convencional de gas

Se puede observar en la Figura 4 cómo la velocidad de corrosión presenta la misma tendencia que el hierro ferroso en la etapa de blanqueamiento (Figura 5), estabilizándose al finalizar la misma para luego, una vez iniciada la inyección química del producto, reducirse de manera acelerada durante la etapa de formación de película.

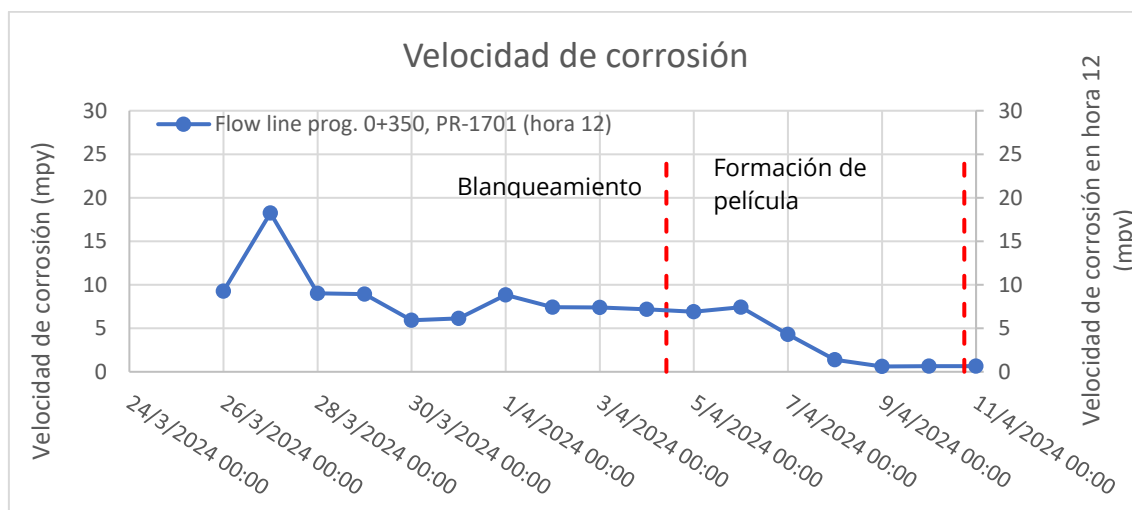


Figura 5. Caso de estudio 1: Velocidad de corrosión acumulada – Blanqueamiento y formación de película.

- Determinación del residual de amina.

En algunos casos, la complejidad del sistema no permite la fácil lectura de fisicoquímicos ni la colocación de puntos de monitoreo in situ representativos por lo que otra forma de controlar el químico es mediante la determinación del residual de amina, que consiste en la medición analítica de la concentración remanente de inhibidor de corrosión en el fluido en diferentes puntos del sistema. Es un indicador directo de la distribución y consumo del producto a lo largo del circuito. La disminución progresiva del residual indica consumo por adsorción, degradación o dilución. Es

correlacionable con la efectividad de la protección, aunque depende de la sensibilidad y selectividad del método analítico empleado y puede verse afectado por interferencias de la matriz del fluido.

La Figura 6 muestra el Caso de Estudio 3, donde la variación de residual de amina se correlaciona en forma coherente con la velocidad de corrosión obtenida en laboratorio con ensayos de LPR realizados al agua de producción en un yacimiento convencional.

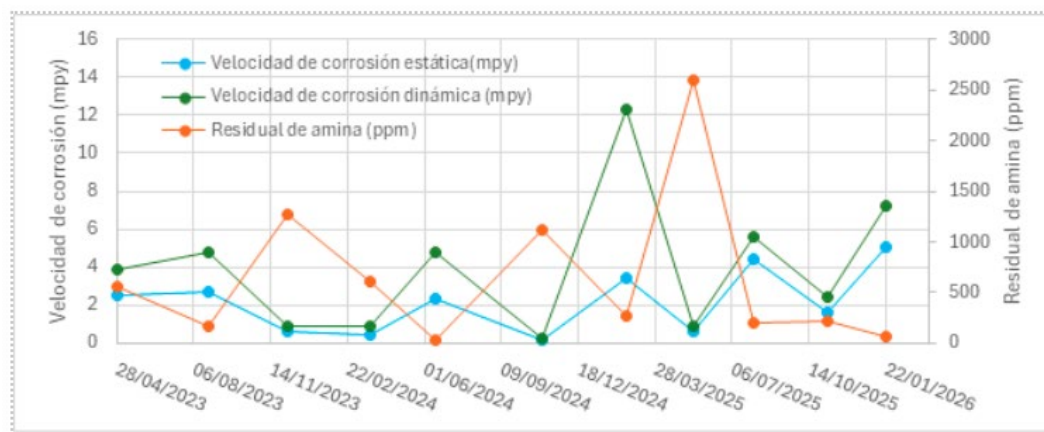


Figura 6. Caso de estudio 3: Histórico de velocidad de corrosión vs. Residual de amina.

Este sistema no cuenta con puntos de monitoreo in situ (cupones ni sondas), por lo que se analiza la variación cualitativa del inhibidor de corrosión (residual) para evaluar si es necesario un cambio en la dosificación conociendo las producciones y otros parámetros medibles. Para estos sistemas, cobra vital importancia contar con gráficos, data recolectada, análisis históricos y todo tipo de herramientas que permitan evaluar tendencias a lo largo del tiempo más allá de los valores absolutos.

- Implementación de sondas de resistencia eléctrica (ER).

Estos instrumentos miden el cambio en la resistencia eléctrica de un elemento sensor metálico a medida que se reduce su sección por efecto de la corrosión. Permiten la construcción de tendencias temporales cuasi-continuas sin requerir un medio electrolítico, lo que las hace aptas para sistemas multifásicos. Son sensibles a variaciones de temperatura y requieren compensación térmica adecuada. No detectan corrosión localizada y su resolución temporal depende del espesor del elemento sensor.

Un caso de implementación es el de un yacimiento de pozos de gas convencional, donde la colocación de estos instrumentos en las trampas lanzadoras y receptoras y su medición mensual permite obtener información de cómo se encuentra la tasa de corrosión en el ducto y cómo varía cuando se modifica la inyección de inhibidor de corrosión, permitiendo no solo controlar este valor sino también optimizar el producto, considerando este y otros parámetros que se evalúan en conjunto.

La efectividad de este método de monitoreo radica en la selección de puntos con condiciones representativas del sistema, el tipo de sonda y su dimensionamiento.

En la Tabla 4 se presenta el registro de velocidad de corrosión obtenido mediante una sonda electroquímica ubicada en la trampa receptora de un pozo productor de gas, donde se evidencia la respuesta del sistema ante los ajustes realizados en la dosificación del inhibidor de corrosión. Dado que el producto actúa en la fase acuosa, su concentración efectiva en el medio está

directamente condicionada por el caudal de agua producida, por lo que la dosis se expresa en ppm sobre dicha fase y se convierte a un caudal de inyección en l/d. Este caudal es revisado mensualmente en función de los resultados registrados por las sondas del pozo, permitiendo un ajuste dinámico del tratamiento. Cuando la velocidad de corrosión desciende a valores aceptables, se procede a reducir gradualmente la dosis del inhibidor con el objetivo de optimizar el tratamiento, buscando el punto de equilibrio entre una velocidad de corrosión controlada dentro de los límites establecidos por NACE SP077-2023 (Tabla 5) y una dosificación mínima eficaz que contemple la eficiencia económica del sistema de control de la corrosión (Figura 7).

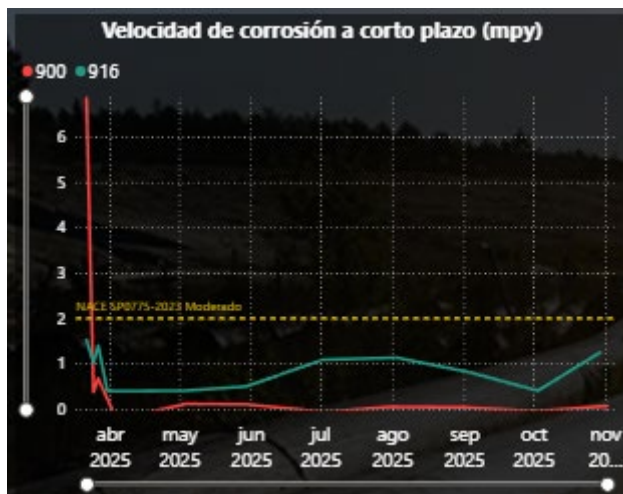


Figura 7. Caso de estudio 4: Disminución de la velocidad de corrosión censada por sonda de corrosión ubicadas en Trampa Receptora (PR-916) y lanzadora (PR-900) de pozo productor de gas.

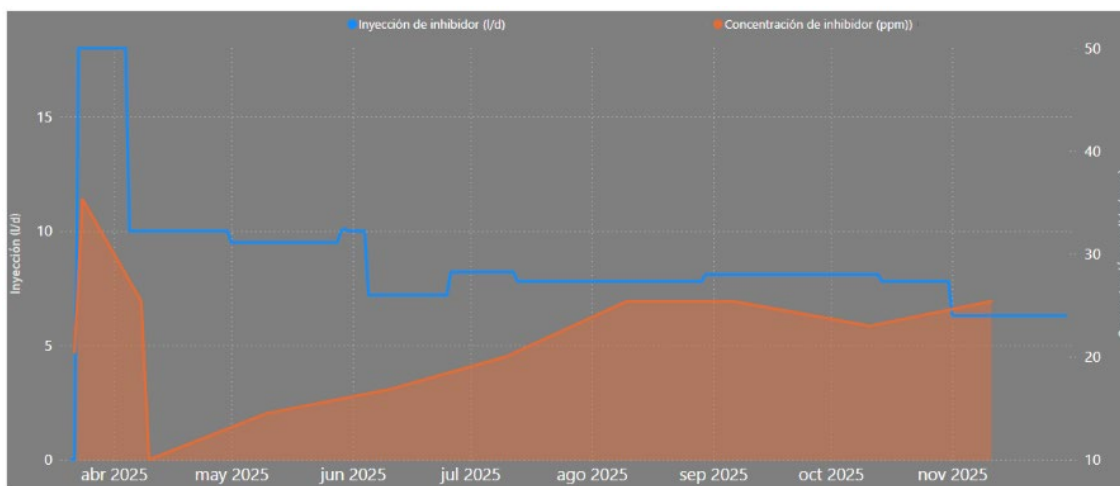


Figura 8. Optimización de inyección de inhibidor.

Tanto el tipo de sonda a instalar como su ubicación y su posición horaria son claves para la determinación de tasas de corrosión confiables. Si, por ejemplo, la sonda se ubica en el bypass de un ducto que se chanea diariamente, no estará en contacto con las condiciones del ducto chaneado, como sí lo estaría una sonda ubicada en posición rasante que se vería influenciada por la acción de limpieza. Lógicamente la instalación de este tipo de sondas rasantes en hora 6 conllevan una complejidad técnica y un mantenimiento arduo, por lo que es necesario evaluar si esta acción mejorará el control de este fenómeno.

Tabla 4. Categorización de severidad de tasa de corrosión generalizada, NACE SP0775-2023.

BAJO	MODERADO	ALTO
< 2 mpy	2- 8 mpy	> 8 mpy

- Instalación de cupones gravimétricos.

Se basan en la medición gravimétrica de la pérdida de masa de una probeta metálica expuesta al medio corrosivo durante un período definido, conforme a la norma ASTM G1. Proporcionan la tasa de corrosión promedio del período de exposición y además permiten el análisis visual de la superficie para identificar mecanismos de ataque, siendo especialmente útil para la detección de corrosión por picaduras, mecanismo no detectado por sondas de resistencia eléctrica.

Es de utilidad contar con análisis de falla históricos para tener conocimiento de la morfología de la corrosión en el sistema, es decir cuáles son los mecanismos de daño presentes en el sistema, con el objetivo de seleccionar estratégicamente el tipo de monitoreo más útil, que arroje los datos más representativos.

Adicionalmente, es de vital importancia considerar el material del cupón a colocar, que sea coincidente con el de la tubería y la selección del punto y la profundidad.

Otra de sus ventajas es que representan un punto de evaluación de bacterias sésiles ya que, al ser un trozo de metal inmerso en el fluido, permite medir la colonia en desarrollo si la hubiese. En este caso se definirá una adecuada permanencia para permitir la formación del biofilm, para su posterior retiro y estudio.

Su principal limitación es que no entregan información en tiempo real: el resultado integra todo el período de exposición y puede enmascarar eventos transitorios de alta corrosividad.

3.4 Gestión integral y análisis simultáneo de múltiples parámetros para optimización de recursos.

A partir de la experiencia acumulada en los casos de estudio, se propone un esquema de seguimiento que estructura el proceso de monitoreo en cuatro etapas iterativas. Como ejemplo de implementación práctica de este esquema, se desarrolló un tablero de gestión en Power BI que centraliza e integra, en una única plataforma de visualización, los datos de producción, velocidad de corrosión, parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los pozos bajo tratamiento, entre otros. El tablero se actualiza mensualmente con los nuevos datos de campo, constituyendo una herramienta dinámica de gestión de la corrosión interna que permite al equipo técnico monitorear la evolución del sistema en forma continua y tomar decisiones fundamentadas sobre el programa de inhibición considerando la variación de múltiples parámetros en simultáneo y con la intención de contar con las tendencias de cada uno de ellos a lo largo del tiempo.

La principal utilidad del tablero reside en la visualización de tendencias temporales de velocidad de corrosión correlacionadas con las variables operativas y la dosificación de productos químicos. Esta visión integrada permite gestionar gran cantidad de datos, identificando con claridad los períodos en que la velocidad de corrosión se mantiene dentro de los objetivos establecidos, así como detectar desvíos que requieren intervención. Sobre esta base, es posible proceder a la optimización de la dosificación del inhibidor, ajustando el caudal de inyección hacia la dosis mínima eficaz sin comprometer la protección del sistema, tal como se describe en las etapas que se detallan a continuación.

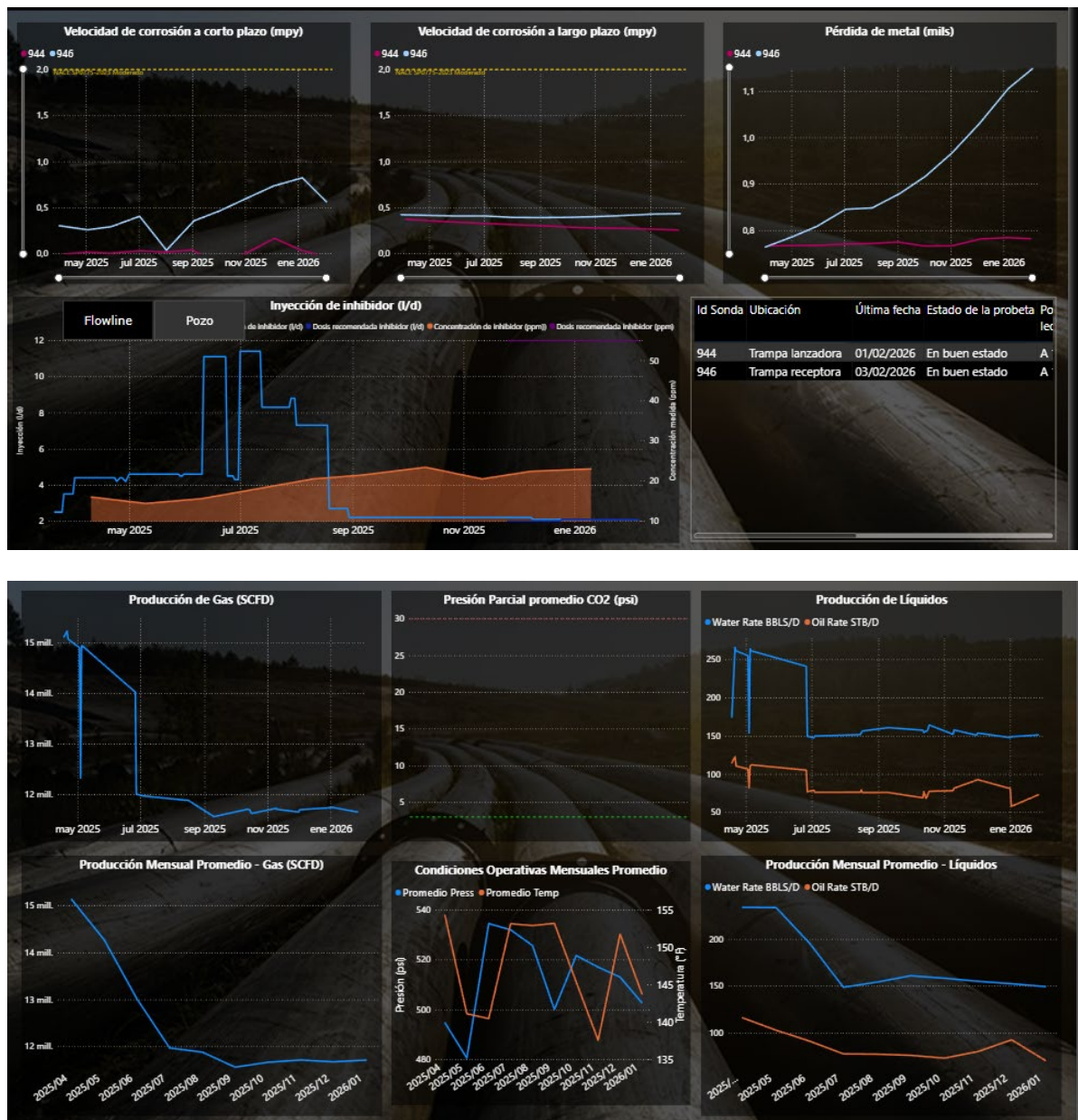


Figura 9. Capturas del dashboard para la gestión integral de la corrosión interna, en el marco de un proyecto de asesoría mensual.

3.7 Discusión

La aplicación del enfoque integrado en los casos de campo demostró beneficios concretos en términos de confiabilidad de la evaluación y eficiencia operativa.

En la etapa de calificación de productos en laboratorio, la combinación de múltiples metodologías de ensayo (como se describió en la sección 3.1) permitió identificar que algunos productos presentan comportamientos que no se manifiestan en todas las técnicas. La experiencia con ensayos en celdas Kettle que arrojaron eficiencias negativas ilustra la importancia de no basar la selección en una única metodología. Del mismo modo, productos que mostraban alta eficiencia en ensayos electroquímicos de laboratorio no necesariamente mantuvieron ese desempeño en campo, lo que resalta la necesidad de validación mediante pruebas en condiciones reales de operación.

En la implantación de nuevos inhibidores (sección 3.2), el protocolo de blanqueamiento y la estimación de dosificación mediante tres métodos independientes (recomendación del proveedor, cálculo teórico por caudales de producción y cálculo por geometría de tubería) proporcionó un rango de referencia para el ajuste fino posterior. Las diferencias significativas entre los valores obtenidos por cada método (por ejemplo, 17.5 l/d por recomendación del proveedor versus 4.18 l/d por cálculo teórico en función de caudales) subrayan la importancia de la validación en campo y el ajuste experimental de la dosificación.

La detección de puntos de monitoreo no representativos fue un hallazgo recurrente. Sin la validación cruzada entre técnicas, lecturas anómalas podrían haber conducido a decisiones erróneas, como un aumento innecesario de la dosis de inhibidor con el consiguiente impacto económico. La reubicación de puntos de monitoreo, cuando fue necesaria, mejoró significativamente la coherencia de los datos.

La optimización de la dosificación basada en datos validados demostró que el sobreconsumo de producto no solo no mejora la protección sino que puede enmascarar problemas subyacentes en el sistema de monitoreo. La identificación de la dosis mínima efectiva permite una gestión más eficiente del tratamiento químico.

Es importante destacar que el enfoque propuesto no pretende reemplazar el juicio del ingeniero de corrosión sino complementarlo con una estructura sistemática que facilita el análisis de información compleja y multivariable. El conocimiento del sistema productivo, la historia operativa y la experiencia acumulada siguen siendo componentes esenciales del proceso de toma de decisiones.

4. Conclusiones

A partir de los casos de campo analizados y la aplicación del enfoque metodológico integrado, se establecen las siguientes conclusiones:

- La evaluación de inhibidores de corrosión en sistemas de producción reales requiere la integración sistemática de múltiples fuentes de datos. Ninguna técnica de monitoreo por sí sola proporciona una visión completa del estado de la protección, y la combinación crítica de cupones de pérdida de peso, sondas ER, sondas LPR, análisis electroquímicos y concentraciones residuales permite reducir la incertidumbre y mejorar la calidad de las decisiones operativas.
- La calificación de productos en laboratorio es una condición necesaria pero no suficiente para garantizar el desempeño en campo. Las pruebas de laboratorio constituyen una herramienta valiosa para la preselección de productos, pero las diferencias entre las condiciones controladas y las condiciones reales de operación hacen imprescindible la validación mediante pruebas de campo con monitoreo integral. La experiencia con ensayos en celdas Kettle que arrojaron resultados no representativos del comportamiento en condiciones de flujo refuerza esta conclusión.
- La validación de datos es un paso ineludible antes de cualquier análisis. La detección de lecturas no confiables, puntos de monitoreo no representativos e inconsistencias entre técnicas evita decisiones erróneas que pueden tener impacto tanto técnico (subprotección o sobreprotección) como económico (sobreconsumo de producto o fallas por corrosión).
- La estimación de dosificación mediante múltiples métodos de cálculo proporciona un rango de referencia útil, pero no reemplaza el ajuste experimental en campo. Las diferencias observadas entre los valores obtenidos por recomendación del proveedor, cálculos teóricos por caudales y cálculos por geometría de tubería confirman que la optimización requiere validación con datos reales de monitoreo.

- El ajuste experimental de la dosificación, sustentado en datos validados e integrados, permite identificar la dosis mínima efectiva, evitando sobreconsumos de producto y mejorando la eficiencia operativa sin comprometer la protección.
- El esquema propuesto, basado en cuatro etapas (validación de datos, construcción de tendencias, ajuste de dosificación y verificación de efectividad), constituye una herramienta replicable que puede adaptarse a diferentes sistemas de producción y condiciones operativas, facilitando la estandarización de la gestión de inhibidores de corrosión en la industria.

5. Bibliografía

- [1] NACE International. "SP0775 – Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations." NACE International, Houston, TX.
- [2] ASTM G170. "Standard Guide for Evaluating and Qualifying Oilfield and Refinery Corrosion Inhibitors in the Laboratory." ASTM International.
- [3] ASTM G1-03 (Reapproved 2017). "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens." ASTM International.
- [4] ASTM G31-21. "Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals." ASTM International.
- [5] De Waard, C. & Milliams, D.E. "Carbonic Acid Corrosion of Steel." Corrosion, Vol. 31, No. 5, pp. 177–181, 1975.
- [6] Dugstad, A. "Fundamental Aspects of CO₂ Metal Loss Corrosion – Part 1: Mechanism." CORROSION/2006, Paper No. 06111. NACE International.
- [7] Papavinasam, S. "Corrosion Control in the Oil and Gas Industry." Elsevier, 2014.
- [8] NACE International. "MR0175/ISO 15156 – Materials for Use in H₂S-Containing Environments in Oil and Gas Production."

6. Breve CV de los autores

Andrea Moneta

- Ingeniera química egresada de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Más de 25 años de experiencia en protección anticorrosiva de ductos en la Industrial de Petróleo y Gas con Certificación Nace/AMPP CP3 (Tecnóloga en Protección Catódica), CIP 2 Inspectora en Revestimientos Nivel 2 y CI 2 Senior en Corrosión Interna. Participa activamente de la Comisión de Integridad de Ductos del IAPG.
- Cargo actual: Especialista en integridad y protección anticorrosiva en GIE Group.

Catalina Natalia Dazeo

- Ingeniera química egresada de la Universidad Nacional de Mar del Plata.
- 5 años de experiencia en proyectos relacionados a la protección anticorrosiva en la industria de Oil&Gas, ejecutando: análisis de corrosividad de fluidos, modelado de flujo

para determinación de zonas críticas de corrosión interna, análisis de efectividad de inhibidores de corrosión y biocidas, análisis de efectividad de la protección catódica.

- Cargo actual: Ingeniera de integridad y protección anticorrosiva en GIE Group.

Camila Maite Galotto

- Ingeniera Química – Universidad Nacional de Mar del Plata
- 2 años de experiencia en proyectos relacionados a Corrosión interna, y en particular a la selección y evaluación de inhibidores de corrosión
- Cargo actual en la empresa: Analista de Corrosión Jr.