

Validación de un reactor de plasma no térmico a escala piloto para el tratamiento de aguas de retorno de procesos no convencionales de la industria del petróleo y gas

Validation of a pilot-scale non-thermal plasma reactor for the treatment of flowback water from unconventional oil and gas operations

Doctoranda:

Brenda SANTAMARÍA

<https://orcid.org/0000-0001-7046-2188>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Grupo de Descargas Eléctricas, Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.

brendasantamaria1989@gmail.com

Director:

Leandro PREVOSTO

Codirector:

Gerardo FISCHFELD

Resumen

Argentina posee una de las mayores reservas mundiales de petróleo y gas no convencionales. Su explotación mediante fractura hidráulica genera importantes volúmenes de aguas de retorno, un efluente líquido que contiene microorganismos y aditivos químicos utilizados durante el proceso de extracción. La actividad microbiana presente en estas aguas constituye la principal causa de corrosión inducida por microorganismos (CIM) en las instalaciones de producción. Actualmente, su control se basa principalmente en la aplicación de biocidas, cuyo empleo implica elevados costos operativos. Entre los aditivos químicos presentes en las aguas de retorno se encuentra la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM), cuya remoción representa un desafío adicional para el tratamiento de estos efluentes. En este trabajo se validó un reactor de plasma no térmico de película descendente a escala piloto (TRL 6) para la inactivación de microorganismos presentes en aguas de retorno y la degradación de HPAM. Los ensayos se realizaron en modo batch con recirculación, empleando aire y oxígeno como gases de alimentación. Se logró una reducción de entre dos y tres órdenes de magnitud de la carga microbiana y una disminución significativa de las bacterias asociadas a la CIM. Asimismo, se alcanzaron eficiencias de degradación de HPAM superiores al 90 %, junto con una marcada disminución de la viscosidad de las soluciones tratadas. En conjunto, estos resultados muestran la potencialidad del plasma para la inactivación de microorganismos y la degradación de HPAM en aguas de retorno de la industria no convencional de petróleo y gas, habilitando futuros esfuerzos enfocados en el escalado de la tecnología.

Palabras clave: plasma no térmico; producción no convencional de petróleo y gas; corrosión inducida por microorganismos; poliacrilamida parcialmente hidrolizada; reactor de plasma a escala piloto

Abstract

Argentina possesses one of the world's largest reserves of unconventional oil and gas. Their exploitation through hydraulic fracturing generates large volumes of flowback water, a liquid effluent containing microorganisms and chemical additives used during the extraction process. Microorganisms present in these waters are the primary cause of microbiologically influenced corrosion (MIC) in production facilities. Currently, their control relies primarily on the application of biocides, which entails high operating costs. Among the chemical additives present in flowback water is partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM), whose removal represents an additional challenge for the treatment of these effluents. In this work, a pilot-scale (TRL 6) falling thin-film non-thermal plasma reactor was validated for the inactivation of microorganisms in flowback water and the degradation of HPAM. The experiments were carried out in batch recirculation mode using air and oxygen as feed gases. A two- to three-order-of-magnitude reduction in microbial load was achieved, together with a significant decrease in MIC-associated bacteria. In addition, HPAM degradation efficiencies exceeding 90% were obtained, accompanied by a marked reduction in the viscosity of the treated solutions. Overall, these results support the use of the plasma for the inactivation of microorganisms and the degradation of HPAM in flowback water from unconventional oil and gas production, paving the way for future efforts aimed at scaling up the technology.

Keywords: non-thermal plasma; unconventional oil and gas production; microbiologically influenced corrosion; partially hydrolyzed polyacrylamide; pilot-scale plasma reactor

Introducción

La producción no convencional de petróleo y gas constituye uno de los sectores de mayor relevancia estratégica para el desarrollo energético argentino. Impulsada principalmente por la explotación de la formación Vaca Muerta, esta actividad representa actualmente más del 70% de la producción nacional de petróleo (Secretaría de Energía, 2025). Como consecuencia de su desarrollo se generan importantes volúmenes de aguas de retorno, cuyo tratamiento constituye uno de los principales desafíos ambientales y operativos para la industria (Gregory et al., 2011).

Las aguas de retorno presentan una composición altamente compleja, caracterizada por elevadas concentraciones de sales disueltas, materia orgánica, hidrocarburos, microorganismos y aditivos químicos empleados durante la fractura hidráulica. La elevada carga de contaminantes presente en estas aguas dificulta su tratamiento mediante tecnologías convencionales y limita su eventual reutilización (Luek & Gonsior, 2017). Entre los distintos contaminantes presentes en estas aguas, la carga microbiológica y determinados aditivos químicos constituyen dos de los principales desafíos para el desarrollo de tecnologías de tratamiento más eficientes.

Los microorganismos presentes en las aguas de retorno pueden favorecer procesos de corrosión inducida por microorganismos (CIM), responsables del deterioro de tuberías, tanques y otros equipos de producción, con el consecuente incremento de los costos de mantenimiento y de los riesgos operativos (Soler Arango et al., 2021). La corrosión representa una importante fuente de pérdidas económicas en la industria del petróleo y gas, por lo que el control de la actividad microbiológica resulta un aspecto crítico para preservar la integridad de la infraestructura. En aguas de retorno provenientes de yacimientos no convencionales se ha reportado el predominio de bacterias halófilas del género *Halanaerobium*, asociadas a procesos de CIM y adaptadas a las elevadas salinidades características de estas aguas (Lipus et al., 2017; Pagliaricci et al., 2025). Aunque el uso de biocidas constituye la estrategia más difundida para controlar el crecimiento microbiano, sus limitaciones en términos de eficiencia, costos operativos e impacto ambiental han impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas para la mitigación de estos procesos (Skovhus et al., 2017).

Además de la carga microbiológica, las aguas de retorno contienen diversos aditivos empleados durante la fractura hidráulica. Entre ellos, la poli(acrilamida parcialmente hidrolizada) (HPAM) es uno de los polímeros de mayor utilización debido a sus propiedades reológicas. Su elevada estabilidad química y limitada biodegradabilidad dificultan su eliminación mediante tratamientos convencionales, favoreciendo su persistencia en el ambiente (Al-Kindi et al., 2022). Por este motivo, el desarrollo de tecnologías eficientes para su degradación constituye también un aspecto de interés para la industria (Xiong et al., 2018).

En este contexto, los procesos de oxidación avanzada mediados por plasma no térmico han surgido como una alternativa tecnológica promisorio para el tratamiento de matrices acuosas complejas. La generación in situ de especies reactivas permite promover simultáneamente la inactivación de microorganismos y la degradación de compuestos orgánicos persistentes, reduciendo o incluso evitando el empleo de reactivos químicos adicionales (Malik, 2010). Estudios recientes han demostrado el potencial de esta tecnología para la degradación de HPAM en soluciones acuosas (Kyere-Yeboah & Qiao, 2024), lo que respalda su aplicación al tratamiento de aguas de retorno provenientes de la industria del petróleo y gas.

En este trabajo se evaluó el desempeño de un reactor de plasma no térmico a escala piloto para la inactivación de microorganismos presentes en aguas de retorno provenientes de un yacimiento no convencional argentino y para la degradación de soluciones de poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM), uno de los principales aditivos empleados durante la fractura hidráulica.

Desarrollo

Los tratamientos se realizaron utilizando un reactor de plasma no térmico con un nivel de maduración tecnológica TRL 6 del tipo película descendente operado en modo batch con recirculación (Figura 1). El plasma se generó mediante una descarga corona pulsada positiva desarrollada en fase gaseosa en contacto con el líquido a tratar. Para ello se aplicaron pulsos de tensión de aproximadamente 20 kV, 600 A, con una duración inferior a 100 ns, una frecuencia de repetición de 131 pps y una energía aproximada de 250 mJ por pulso. El caudal de recirculación fue de 11 L/min. Se emplearon aire (sin flujo) y oxígeno (5 L/min) como gases de trabajo. La cámara donde se generó la descarga permaneció confinada para minimizar la difusión de las especies reactivas hacia el medio exterior.

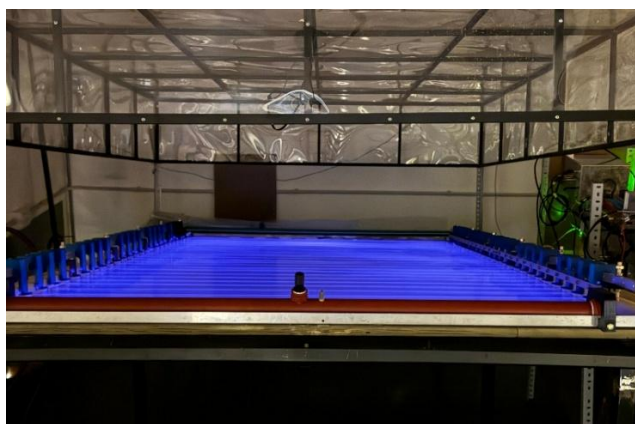


Figura 1. Reactor de plasma a escala piloto

Los ensayos se realizaron con un volumen de 6 L (mínimo volumen de procesamiento) y un tiempo de tratamiento de 120 min. Durante los tratamientos se recolectaron muestras cada 15 min para cuantificar los microorganismos viables y determinar la concentración de HPAM. Además, la viscosidad de las soluciones tratadas se evaluó 48 h después de finalizado el tratamiento.

Las muestras de agua de retorno, provenientes de dos puntos de muestreo del yacimiento Vaca Muerta —pozo sumidero (PS) y tanque lavador (TK)—, se emplearon para la evaluación microbiológica. Los microorganismos viables se cuantificaron mediante la determinación in situ de ATP utilizando un kit comercial LuminUltra®, con resultados expresados en equivalentes microbianos (ME/mL). La eficiencia biocida se calculó respecto del control sin tratamiento. Se filtró 1 L de agua de retorno correspondiente al control (sin tratamiento) y otra muestra luego de 120 min para la extracción de ADN mediante un kit comercial NucleoSpin Soil™ (Macherey-Nagel®). Posteriormente, se realizaron análisis de qPCR para cuantificar bacterias totales, bacterias nitrato reductoras y el género *Halanaerobium*.

Las soluciones de poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) se prepararon en agua destilada con una concentración inicial de 100 mg/L. La concentración del polímero se determinó mediante turbidimetría según el método de Scoggins y

Miller (1979), mientras que sus propiedades reológicas se caracterizaron mediante mediciones de viscosidad realizadas 48 h después del tratamiento utilizando un reómetro MCR 302 (Anton Paar).

Resultados

El tratamiento con plasma produjo una rápida disminución de la carga microbiana en ambas aguas de retorno (Figura 2), alcanzándose eficiencias biocidas de entre el 90 y el 99 % a partir de los 30–60 min de tratamiento. Tanto con aire como con O₂ se observó una marcada reducción de los microorganismos viables desde los primeros minutos de tratamiento. En el pozo sumidero (PS) se alcanzó una reducción cercana a un orden de magnitud luego de 30 min, mientras que en el tanque lavador (TK) la disminución fue aún mayor, registrándose una reducción aproximada de dos órdenes de magnitud a los 60 min.

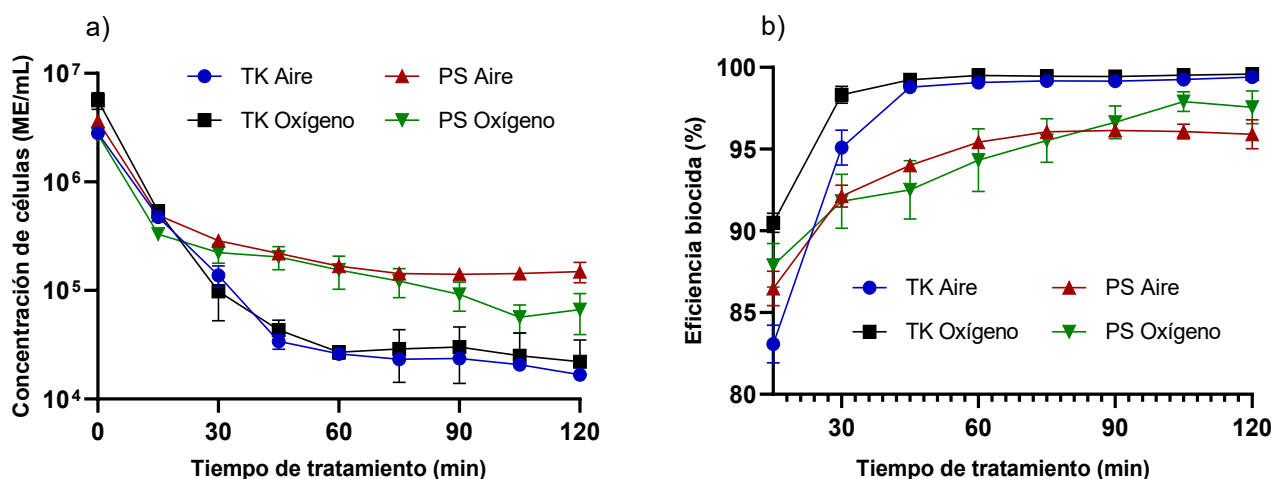


Figura 2. Concentración de microorganismos viables (a) y eficiencia biocida (b) durante el tratamiento con plasma de aguas de retorno.

La reducción de la carga microbiana también se evidenció en los análisis de qPCR (Figura 3), los cuales mostraron una marcada disminución en la cantidad de bacterias totales en ambas aguas de retorno. Asimismo, las bacterias nitrato reductoras, asociadas a la corrosión microbiológica, se redujeron hasta niveles no detectables luego de 120 min de tratamiento con ambos gases de alimentación. En el caso del género *Halanaerobium*, se observó una eliminación completa en las muestras provenientes del tanque lavador tratadas con O₂.

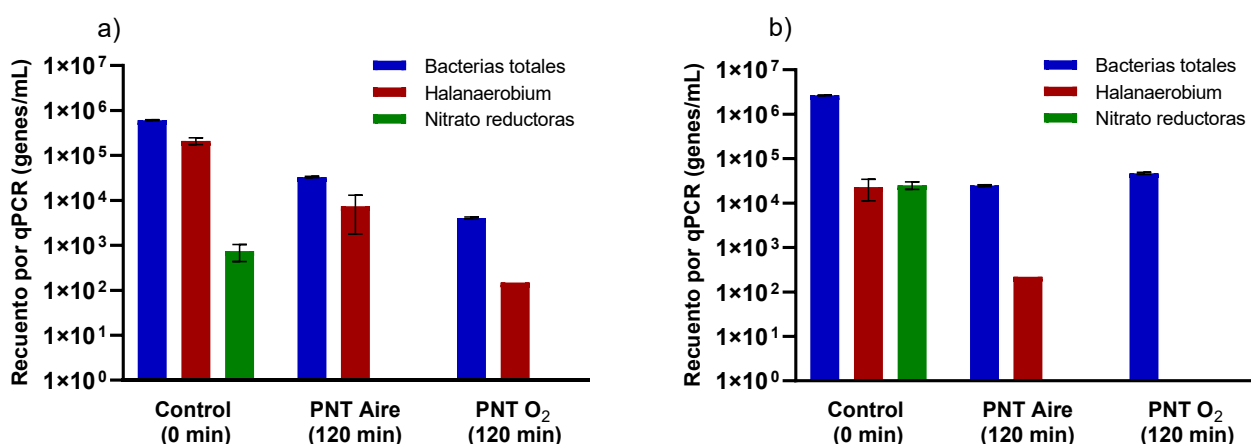


Figura 3. Cuantificación mediante qPCR de bacterias totales, bacterias nitrato reductoras y del género *Halanaerobium* en aguas de retorno antes y después del tratamiento con plasma. (a) Pozo sumidero (PS). (b) Tanque lavador (TK).

La concentración de HPAM disminuyó progresivamente durante el tratamiento con plasma utilizando ambos gases de alimentación (Figura 4). Luego de 120 min se alcanzaron eficiencias de degradación superiores al 90 %, ligeramente mayores

cuando se empleó O₂. Estos resultados muestran que el reactor degradó eficientemente el polímero bajo las condiciones evaluadas.

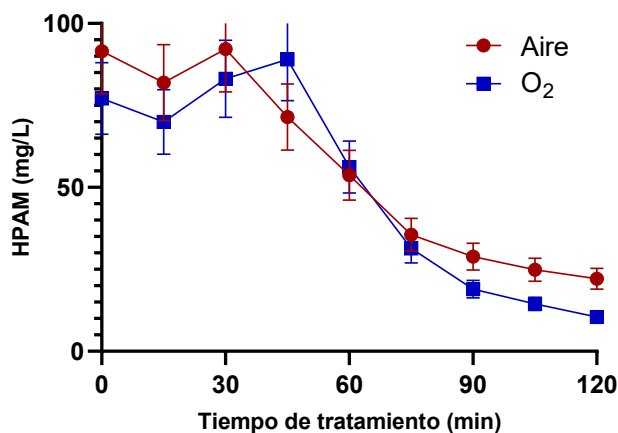


Figura 4. Evolución de la concentración de HPAM durante el tratamiento con plasma utilizando aire y O₂ como gases de alimentación.

La degradación de HPAM también produjo una disminución de la viscosidad de las soluciones tratadas (Tabla 1). En todos los casos se observó una reducción respecto del control, siendo más pronunciada en los tratamientos realizados con O₂. La disminución de la viscosidad fue consistente con la degradación del polímero determinada mediante turbidimetría.

Tiempo de tratamiento (min)	Viscosidad (cp)		Pérdida en viscosidad (%)	
	O ₂	Aire	O ₂	Aire
0	11,1	11,1	-	-
15	0,875	1,81	92%	84%
45	0,884	0,918	92%	92%
90	0,878	0,979	92%	91%
120	1,66	1,45	85%	87%

Tabla 1. Viscosidad de las soluciones de HPAM antes y después del tratamiento con plasma.

Conclusiones

El reactor de plasma no térmico a escala piloto demostró ser una alternativa eficaz para la inactivación de microorganismos presentes en aguas de retorno provenientes de la industria del petróleo y gas y para la degradación de soluciones de HPAM. El tratamiento permitió reducir hasta dos órdenes de magnitud la carga microbiana y disminuir significativamente bacterias asociadas a procesos de corrosión microbiológica. Asimismo, la degradación de HPAM provocó una rápida pérdida de viscosidad de las soluciones tratadas, evidenciando una alteración temprana de sus propiedades reológicas. Los resultados de turbidimetría sugieren que la degradación del polímero se extiende más allá de la formación de monómeros de acrilamida bajo tiempos prolongados de tratamiento. En conjunto, estos resultados respaldan el potencial del plasma no térmico para la inactivación de microorganismos presentes en aguas de retorno y la degradación de HPAM, aportando evidencia para su aplicación en el tratamiento de efluentes de la industria del petróleo y gas.

Referencias

Al-Kindi, S., Al-Bahry, S., Al-Wahaibi, Y., Taura, U., & Joshi, S. (2022). Partially hydrolyzed polyacrylamide: Enhanced oil recovery applications, oil-field produced water pollution, and possible solutions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(12), Article 875. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10569-9>

- Gregory, K. B., Vidic, R. D., & Dzombak, D. A. (2011). Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing. *Elements*, 7(3), 181–186. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.3.181>
- Kyere-Yeboah, K., & Qiao, X.-C. (2024). Application of cold plasma technology for the simultaneous degradation and viscosity removal of polyacrylamide and its copolymers from contaminated wastewater. *Journal of Environmental Management*, 370, 122861. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122861>
- Lipus, D., Vikram, A., Ross, D., Bain, D., Gulliver, D., Hammack, R., & Bibby, K. (2017). Predominance and metabolic potential of *Halanaerobium* spp. in produced water from hydraulically fractured Marcellus Shale wells. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(8), e02659-16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02659-16>
- Luek, J. L., & Gonsior, M. (2017). Organic compounds in hydraulic fracturing fluids and wastewaters: A review. *Water Research*, 123, 536–548. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.012>
- Malik, M. A. (2010). Water purification by plasmas: Which reactors are most energy efficient? *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 30(1), 21–31. <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>
- Pagliaricci, M., Rojas, G., Massello, F. L., Dos Santos, J., Bortoli, E., Navarrete, S., Morris, W., Vargas, W., & Vega, I. (2025). Microbiologically influenced corrosion in unconventional oil and gas facilities: A tailored integral solution. *SPE Journal*, 30(9), 5712–5724. <https://doi.org/10.2118/228313-PA>
- Scoggins, M. W., & Miller, J. W. (1979). Determination of water-soluble polymers containing primary amide groups using the starch-triiodide method. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 19(3), 151–154. <https://doi.org/10.2118/7664-PA>
- Secretaría de Energía. (2025, 24 de enero). *Argentina tuvo un año histórico en la producción de hidrocarburos*. Ministerio de Economía, República Argentina.
- Skovhus, T. L., Eckert, R. B., & Rodrigues, E. (2017). Management and control of microbiologically influenced corrosion (MIC) in the oil and gas industry—Overview and a North Sea case study. *Journal of Biotechnology*, 256, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.07.003>
- Soler Arango, J., Saavedra, A. U., Pagliaricci, M. C., Fernández, F. A., Morris, W., & Vargas, W. A. (2021). Identification and characterization of planktonic and sessile consortium associated with microbiologically influenced corrosion (MIC) in the oil and gas industry. In *CORROSION 2021*. Association for Materials Protection and Performance. <https://doi.org/10.5006/C2021-16544>
- Xiong, B., Miller, Z., Roman-White, S., Tasker, T., Farina, B., Piechowicz, B., Burgos, W. D., Joshi, P., Zhu, L., Gorski, C. A., Zydney, A. L., & Kumar, M. (2018). Chemical degradation of polyacrylamide during hydraulic fracturing. *Environmental Science & Technology*, 52(1), 327–336. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00792>