

EVALUACIÓN GEOMECAÁNICA DE UN RESERVORIO PARA ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE GAS NATURAL EN LA CUENCA NEUQUINA: EFECTOS DE LOS CICLOS DE INYECCIÓN Y EXTRACCIÓN

Elanor Díaz¹, Teresa M. Piqué², Damián Hryb¹, Emilio Camilión², Mercedes Perissé¹, Martín Sánchez²

1: YPF S.A. elanor.diaz@ypf.com

2: Y-TEC S.A., CONICET. teresa.m.pique@ypftecnologia.com

1: YPF S.A. damian.hryb@ypf.com

2: Y-TEC S.A. emilio.camilion@ypftecnologia.com

1: YPF S.A. mercedes.perisse@ypf.com

2: Y-TEC S.A. martin.sanchez@ypftecnologia.com

Palabras clave: Almacenamiento Subterráneo de Gas Natural, ASGN, Cuenca Neuquina, Geomecánica, Ciclado

ABSTRACT

Underground Gas Storage (UGS) is an efficient technology that has become an indispensable link in the gas supply chain to respond to the market's needs. At Neuquén Province, a depleted unit of an old gas reservoir formation was analyzed to become a UGS at 550 m depth on average. The study was carried out in a comprehensive and multidisciplinary way due to the need to understand the reservoir and its caprock's mechanical behavior.

This paper aims to show the design of laboratory tests, results obtained, and its analysis realized owing to the requirement of determining the mechanical capacity of the UGS, which allowed a better understanding of the state of stresses and sealing capacity of the reservoir. This analysis seeks to reduce the uncertainties and risks related to injection-extraction cycles of the UGS.

INTRODUCCIÓN

El Almacenamiento Subterráneo de Gas Natural (ASGN) es una tecnología eficiente que ha tomado gran relevancia a nivel mundial en la cadena de suministro de gas, ya que permite modelar una respuesta acorde a las necesidades del mercado, almacenando gas en épocas estivales y produciéndolo durante las temporadas más frías. Con el objetivo de acompañar el desarrollo de los yacimientos de gas en la cuenca Neuquina, YPF S.A. comenzó con la búsqueda de sitios que cumplieran con los requisitos para convertirse en ASGN. Para esto, se basó en la experiencia

adquirida durante el desarrollo y operación del único ASGN de Latinoamérica: Diadema-YPF, ubicado en la cuenca del Golfo San Jorge, Argentina, operativo desde 2001.

En función a esta búsqueda se seleccionó y estudió de manera multidisciplinaria e integral un nivel arenoso depletado perteneciente a la Formación Rayoso. Este nivel fue denominado Horizonte Rojo y se encuentra a una profundidad promedio de 550 m. Para que el ASGN trabaje como almacén de manera segura y eficiente es indispensable conocer en profundidad el comportamiento mecánico de las rocas y, con esta información, diseñar las condiciones de inyección y extracción óptimas, limitando las variaciones de presiones para evitar tensiones y deformaciones inadmisibles. Para esto se construyó un modelo geomecánico del subsuelo en una dimensión, o 1DMEM según sus siglas en inglés (*1D Mechanical Earth Model*) que se describe en el trabajo de Díaz *et al.* (2021).

Asimismo, la inyección de gas en períodos de baja demanda y su extracción en períodos de alta demanda generan una presurización y despresurización cíclica tanto de la roca reservorio, así como del sello. La resistencia de la roca a la carga cíclica, también conocida como la resistencia a la fatiga, es ampliamente analizada en bibliografía, encontrándose bien resumida en el trabajo publicado por Cerfontaine y Collin (2018). Estos autores ponen en evidencia que aún no existe una metodología estándar para medir la resistencia a la fatiga en rocas ni una respuesta única de las mismas ante este tipo de cargas. Es sin embargo conocido que una muestra sometida a una carga cíclica a una amplitud constante puede fallar con cargas inferiores a la máxima resistencia estática por la difusión de microfracturas y la pérdida de cohesión de la estructura de la roca. No existe aún una normativa para establecer una carga límite de fatiga, que implicaría una carga máxima para la cual, sin importar la cantidad de ciclos, la roca no fallaría.

En este trabajo se presentan ensayos geomecánicos de laboratorio, los resultados y los análisis realizados para poder calibrar los modelos geomecánicos. Las condiciones de los ensayos se definieron utilizando el 1DMEM que, a su vez, fue recalibrado con los resultados obtenidos. También se presenta una metodología empírica que se diseñó para verificar la integridad de las muestras tanto de reservorio como de sello frente a los ciclos de inyección y extracción de gas ante la falta de normativa estandarizada. La amplitud de los ciclos se estableció considerando las condiciones más desfavorables que se obtuvieron a partir de los modelos geomecánicos previamente calibrados.

MARCO GENERAL

El reservorio seleccionado para ser convertido a ASGN está localizado en la cuenca Neuquina, en la Provincia del Neuquén y se ubica en la zona morfoestructural conocida como engolfamiento (Fig. 1). El yacimiento está compuesto por una roca almacén, denominada Horizonte Rojo, y un sello, ambos pertenecientes a la Formación Rayoso. El Horizonte Rojo, cuya profundidad promedio es de 550 m, corresponde a una antigua capa productora de gas que actualmente se encuentra depletada.

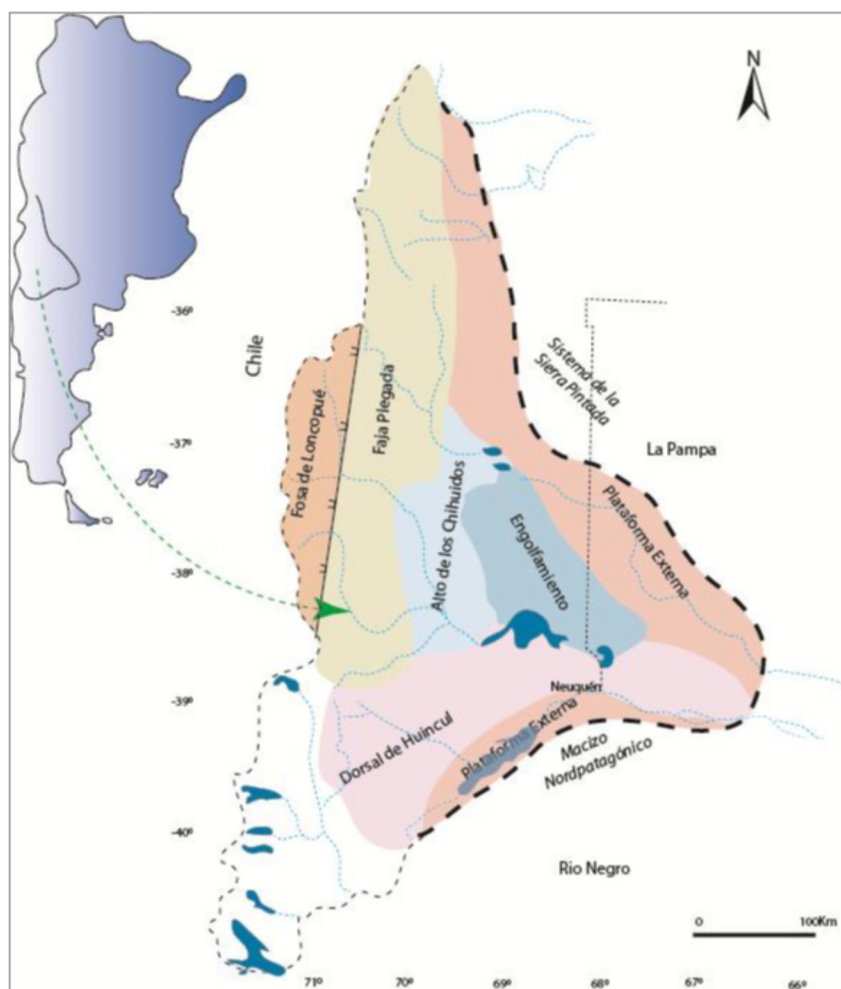


Figura 1. Ubicación de la cuenca Neuquina y las unidades morfoestructurales en las que se divide (tomado y modificado de Sales *et al.* 2014).

La Formación Rayoso corresponde a una unidad clástico-evaporítica depositada durante el Cretácico temprano (Barremiano-Aptiano) acumulada en un ambiente predominantemente continental durante la última fase de *post-rift* de la Cuenca Neuquina, indicando la desconexión de la cuenca con el Pacífico. Esta formación se extiende por más de 15000 km² con espesores máximos que alcanzan los 1200 m compuestos por areniscas finas, pelitas rojas, carbonatos y evaporitas, que se habrían depositado en un cuerpo lacustre somero y perenne de salinidad variable donde alternaban períodos húmedos y de extrema aridez (Zavala y Ponce 2011).

Esta formación yace en contacto neto sobre depósitos carbonáticos del Miembro La Tosca (Formación Huitrín) y en su parte superior se encuentra truncada por una leve discordancia angular (discordancia Intersenoniana) con la Formación Candeleros del Grupo Neuquén. Esta discordancia separa los depósitos de *post-rift* de los de *foreland*, asociados en su parte basal al grupo Neuquén. La alternancia antes mencionada, en respuesta a ciclos climáticos de larga duración, habría controlado la sedimentación dando lugar a intervalos pelíticos y clásticos, relacionados

a períodos transgresivos y regresivos del lago, por lo que se asignan a cortejos de expansión y cortejos de contracción, respectivamente. En base a esto, Zavala y Ponce (2011) proponen tres secuencias deposicionales, R1, R2 Y R3, donde la segunda y tercera secuencia presentan ambos cortejos (Fig. 2).

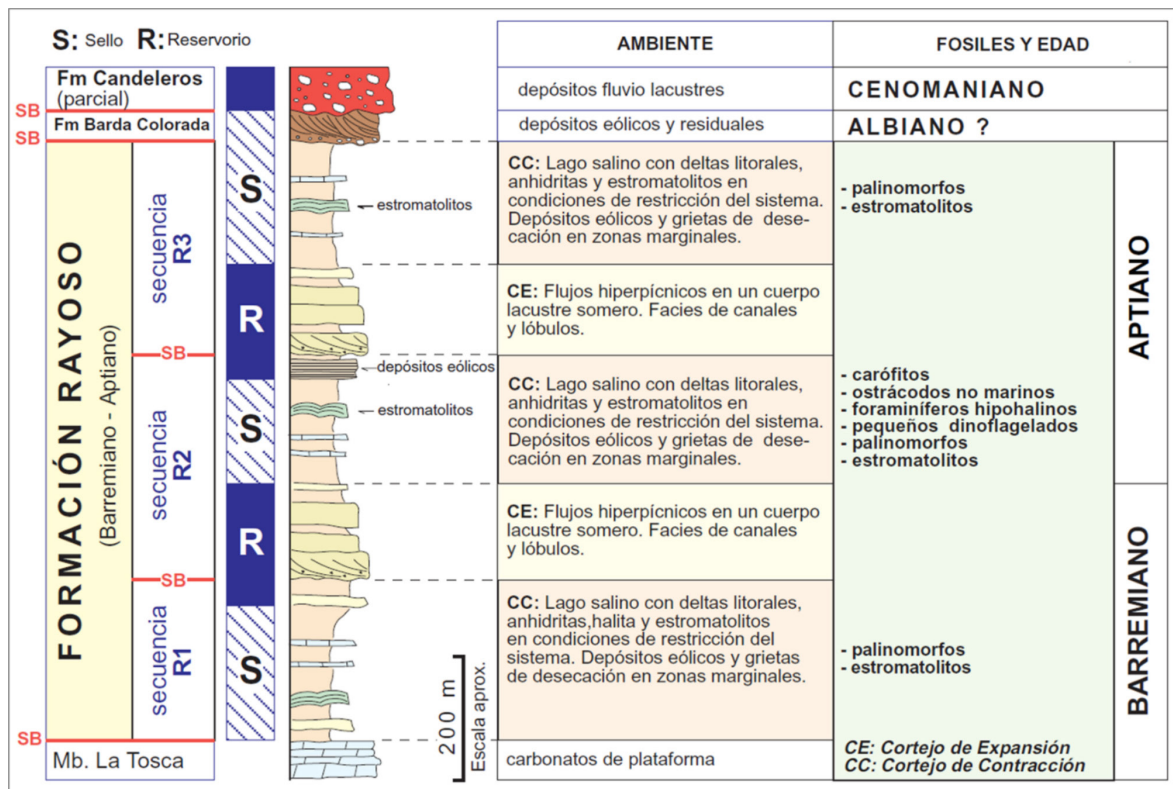


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada para la Fm. Rayoso (Zavala y Ponce 2011).

Con base a la composición clástica de cada secuencia deposicional, el Cortejo de Expansión se corresponde con los principales potenciales reservorios mientras que el Cortejo de Contracción generalmente se atribuye a sellos regionales. Además, los Cortejos de Expansión tienen intercalaciones que también funcionan como sello, pero de menor potencia que los Cortejos de Contracción.

Con el objetivo de poder estudiar tanto el Horizonte Rojo como sus sellos durante la campaña de adquisición de datos se tomó una corona de 19 m la cual abarca el reservorio de interés y tres intervalos de roca sello, uno que se encuentra dentro del Horizonte Rojo (Sello Intra-Rojo) y los otros por debajo del mismo (Sello Inferior 1 y 2).

Sobre estos niveles se extrajeron muestras de 1 pulgada de diámetro para poder realizar ensayos de mecánica de rocas y así poder caracterizar las rocas que comprenden el reservorio, tanto la roca almacén (Horizonte Rojo) como la roca sello, ya que los sellos inferiores son correlacionables con el que suprayace al Horizonte Rojo, el cual corresponde al sello del ASGN.

METODOLOGÍA

En primera instancia, se evaluó la integridad de las muestras a partir de imágenes de $36\text{ }\mu\text{m}$ de resolución obtenidas por microtomografía. Para esto se utilizó un equipo marca Bruker modelo SkyScan 1173 con el que se obtuvieron 60 proyecciones a 130 kV y 80 mA con filtro de bronce. Esto se repitió luego de finalizados los ensayos, para poder caracterizar el plano de rotura.

Los ensayos de compresión se realizaron según norma ASTM D7012-14 en una prensa marca TerraTek modelo TRX2010-020SYS. Las muestras se ensayaron recubiertas por una membrana termo-contráible para evitar el contacto con el fluido confinante. Durante los ensayos se midieron las deformación axiales y radiales con sensores colocados sobre la muestra. Los ensayos se realizaron después de aplicar un confinamiento inicial de 100 psi y la velocidad de aplicación de carga se definió a tasa de deformación axial constante de 20 E-6 s^{-1} . Se midieron la velocidad ultrasónica (ondas P y S) durante todo el proceso con una frecuencia de 1 MHz. Adicionalmente, para este trabajo se diseñó un ensayo particular de resistencia a compresión con carga cíclica. Se utilizó la misma prensa en la que, a confinamiento constante, se aplicó una carga desviadora cíclicamente a una amplitud y frecuencia definida para cada caso.

Los ensayos de tracción por compresión diametral también conocido como brasileños se realizaron en una prensa uniaxial de la empresa TerraTek modelo 915600 RevAC. Estos ensayos se realizaron siguiendo la norma ASTM D3967-49 16 sobre discos que se colocan entre dos cabezales que lo sujetan diametralmente a los que se le aplica una carga a tasa constante de 6 lb/s hasta la falla.

Finalmente, el coeficiente de Biot se estimó para muestras de reservorio. Este coeficiente se calculó a partir del resultado de ensayos triaxiales y de mineralogía utilizando una metodología que se describe en detalle en Pique *et al.* (2020). La composición mineral y la fracción en peso de cada fracción se obtiene mediante un ensayo de difracción de rayos X (XRD) que se realiza en un equipo marca Bruker modelo D8 Advance y la cuantificación utilizando el programa TOPAS de refinamiento estructural, aplicando el método de Rietveld.

RESULTADOS

Ensayos de laboratorio para Análisis 1D

Para la primera etapa del proyecto se construyó un 1DMEM preliminar con el objetivo de identificar la información faltante para lograr una buena calibración del modelo geomecánico y poder realizar los ensayos necesarios para estudiar la integridad del yacimiento propuesto para ASGN. De ese 1DMEM surgió la necesidad de registrar diferentes perfiles (densidad, sónico compresional y de cizalla e imágenes de pozo) desde superficie hasta la profundidad final del pozo, datos de

presión poral y presión de cierre y la extracción de un testigo corona con el fin de realizar ensayos de mecánica de rocas.

Del testigo corona extraído se seleccionaron siete puntos de muestreo abarcando las rocas que componen el reservorio (Horizonte Rojo) y los sellos (Intra-Rojo e Inferiores). Para las muestras de reservorio se asumió isotropía, lo que implica que las propiedades mecánicas de la roca no varían con la dirección del esfuerzo, por lo que se obtuvieron únicamente testigos verticales. Asumiendo una posible anisotropía en los sellos, es decir, un comportamiento mecánico distinto según la dirección del esfuerzo aplicado, se analizaron sus propiedades mecánicas en las direcciones horizontal y vertical. A su vez, se evaluó la dependencia de las propiedades con la dirección midiendo la velocidad de tránsito de ondas en el laboratorio. En la Figura 3 se muestran los resultados de la velocidad de onda P en las mismas muestras extraídas en direcciones perpendiculares entre sí. Se

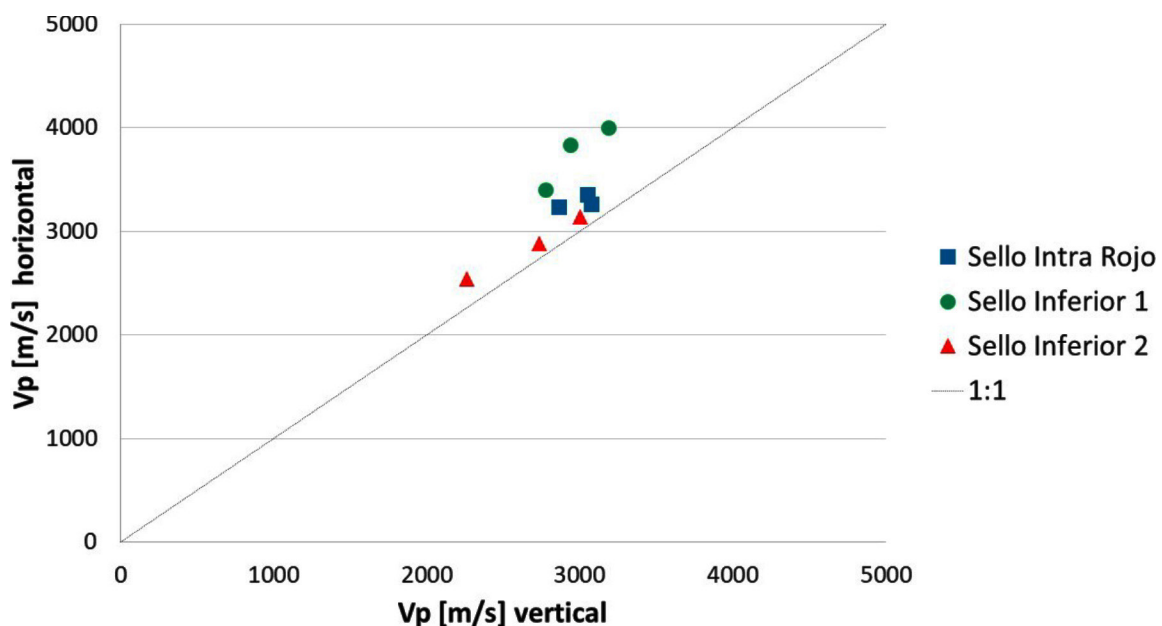


Figura 3. Verificación de la anisotropía de los sellos evaluados.

asumió que cuando la diferencia es mayor al 10%, la muestra es anisótropa. Puede observarse que únicamente el denominado “Sello Inferior 1” mostró anisotropía.

Las muestras se ensayaron en condiciones uniaxiales y triaxiales. En este último caso, con una presión de confinamiento de 1250 psi y 2500 psi. En cada ensayo se obtuvieron el esfuerzo de rotura, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson estático. El módulo de Young estático se midió en un ciclo de descarga de 1000 psi a aproximadamente la mitad del esfuerzo máximo. Esto evita considerar en el módulo de elasticidad las deformaciones inelásticas propias de la compactación de la muestra durante la carga.

Considerando que una de las muestras mostró anisotropía y que no se extrajeron los testigos

con un ángulo de 45° necesarios para la determinación del módulo dinámico de muestras anisótropas (Amadei 1996), se procedió a comparar el módulo de Young y el coeficiente de Poisson estático con las velocidades de onda P y S. Se establecieron correlaciones a partir de las cuales se determinaron los módulos elásticos estáticos en el perfil de pozo. Estas correlaciones se hicieron agrupando de manera distinta la roca de los sellos (Fig. 4) y la del reservorio (Fig. 5). La roca de los sellos muestra mayor rigidez para las mismas velocidades de onda.

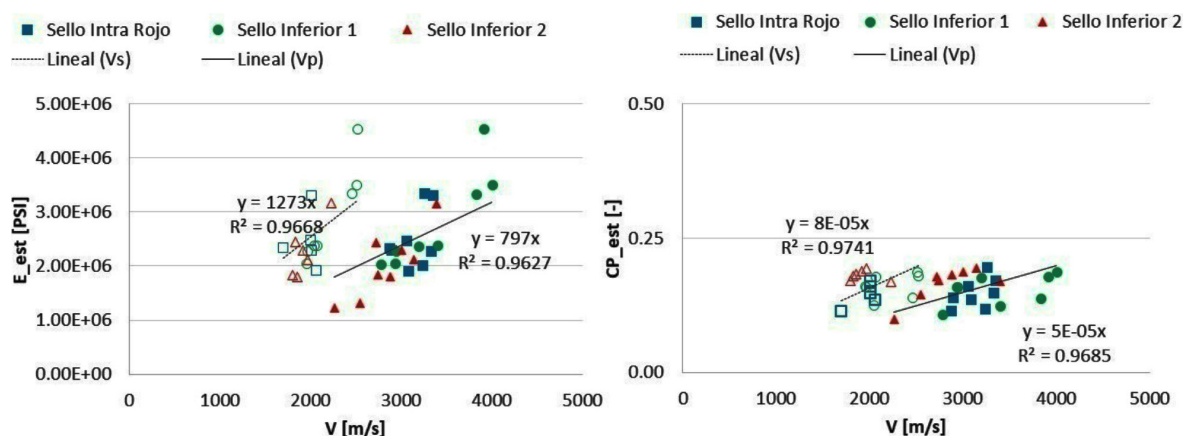


Figura 4. Relación entre el módulo de Young y el coeficiente de Poisson estático y las velocidades de onda Vp y Vs para las rocas de sello.

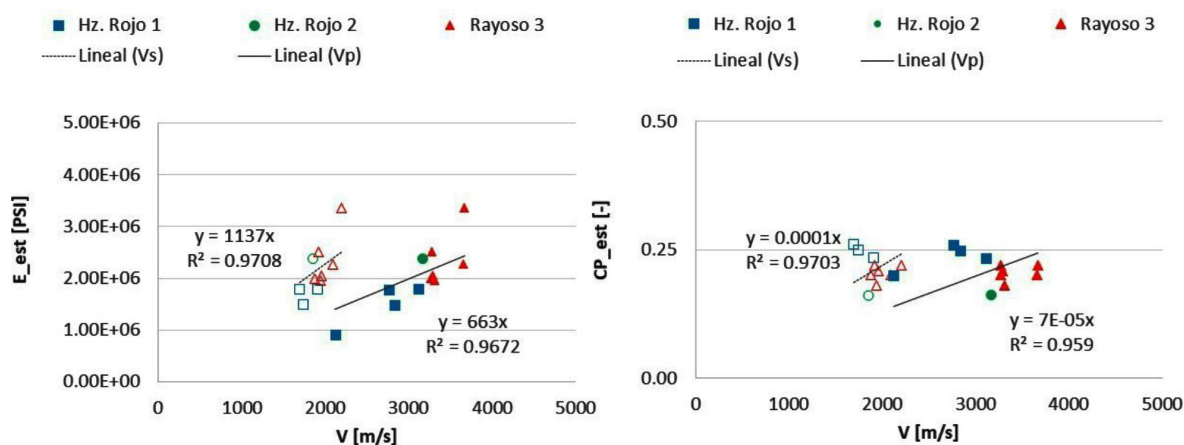


Figura 5. Relación entre el módulo de Young y el coeficiente de Poisson estático y las velocidades de onda Vp y Vs para las rocas de reservorio.

A partir de los resultados a rotura se calcularon las envolventes de falla, obteniéndose la cohesión y el ángulo de fricción interna de cada punto de muestreo. Se correlacionó el ángulo de fricción interna con el módulo estático para poder extender el resultado a datos de pozo. Estos resultados se presentaron en Diaz *et al.* (2021). La caracterización se completó a su vez con ensayos

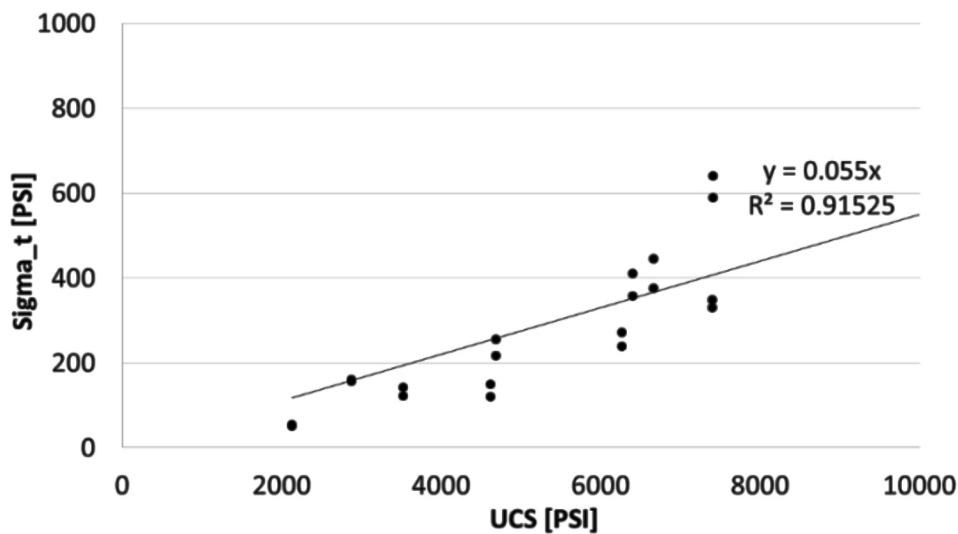


Figura 6. Relación entre la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la tracción medida según el ensayo brasileño.

de tracción brasileños. Este valor se comparó a su vez con la resistencia a la compresión simple (UCS) mostrando una buena correlación (Fig. 6).

Finalmente, siendo que para el modelo geomecánico se utilizó un modelo isotrópico poroelástico se determinó el coeficiente de Biot de las muestras de arena de reservorio a partir de la mineralogía como se describe en trabajos anteriores (Pique *et al.* 2020) utilizando la Ec. 1 (Mavko *et al.* 2009):

$$\alpha = 1 - K/K_g \quad (1)$$

en la que K es la compresibilidad de la muestra obtenida a partir del ensayo de resistencia a la compresión triaxial, y K_s es el módulo de compresibilidad mineral que se estima mediante un promedio ponderado del módulo de compresibilidad de cada mineral que compone al testigo ensayado con su fracción volumétrica. El coeficiente de Biot promedio obtenido de los 4 ensayos realizados fue de 0,9.

Con la información adquirida, se recalibró el 1DMEM preliminar y se definieron las presiones de trabajo de los siguientes ensayos.

Ensayo de Ciclado

Para evaluar la incidencia del ciclado en la integridad de las rocas se diseñó un ensayo de resistencia a la fatiga. Para esto se debió definir el tipo de ensayo, de los que existen varios en la bibliografía (Cerfontaine y Collin 2018) y establecer los tres parámetros: la amplitud del ciclo, la frecuencia con la que el ciclo se aplica y la cantidad de ciclos a someter a la muestra.

Se decidió trabajar con un tipo de ensayo de señal lineal y de amplitud y carga media constantes (Fig. 7). La amplitud se definió teniendo en cuenta las presiones más extremas a las que el reservorio y el sello estarían sometidas durante la inyección y la extracción del gas. Esto definiría la mayor amplitud de carga cíclica a la que la roca estaría sometida. Las presiones se calcularon a partir de un modelo geomecánico 2D que tiene en cuenta los efectos locales por la presurización no homogénea (Díaz *et al.* 2021). La frecuencia define la velocidad del ensayo, y para poder comparar los resultados con las resistencias a compresión triaxial se decidió utilizar la misma velocidad de ensayo. Esto definió frecuencias que variaron entre los 0,07 y 0,22 Hz. Finalmente se estableció arbitrariamente un máximo de 1000 ciclos. Cabe destacar que un proyecto de ASGN se planea con una vida útil mayor a los 50 años y que por cada año se espera un ciclo de inyección y extracción de gas.

En la Figura 7 se esquematiza el ensayo que se simuló en la prensa triaxial, manteniendo una presión de confinamiento constante y variando la presión desviadora según la frecuencia que determina la velocidad de un ensayo de resistencia a la compresión triaxial. Como era de esperar siendo la amplitud definida tan baja en comparación a la resistencia a la compresión de las muestras, ninguna falló antes de los 1000 ciclos. Es importante destacar que, en los ensayos reportados en literatura, la resistencia a la fatiga se alcanza con amplitudes cercanas a la resistencia a la compresión de las muestras (Cerfontaine y Collin 2018), mientras que para este ensayo la amplitud obtenida para el caso más desfavorable al que estarían sometidas las rocas según un modelo 2D no supera los 200 psi alcanzando una tensión máxima de 1400 psi, muy por debajo de la resistencia de las rocas estudiadas. Para ejemplificar lo anterior, en la Figura 8 se grafica la condición de ensayo de ciclado durante la inyección (ensayo inyección) y la extracción (ensayo depletado) y la envolvente de falla de una roca sello.

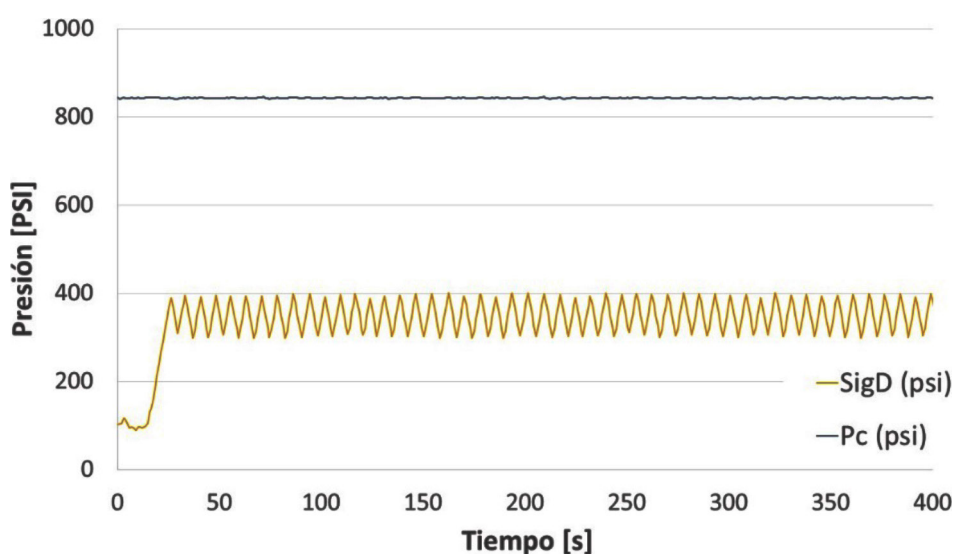


Figura 7. Ensayo de ciclado en el que se mantiene la presión de confinamiento constante mientras se varía el esfuerzo desviador con una amplitud preestablecida durante 1000 ciclos.

Finalizado el ensayo de carga cíclica, luego de verificar la integridad de las rocas con microtomografía, se procedió al ensayo de rotura. En la Figura 9 se observa la envolvente de falla correspondiente a un sello obtenida a partir de los ensayos de resistencia en condiciones uniaxiales y triaxiales (1250 psi y 2500 psi). Se grafica además con línea quebrada el círculo que esquematiza la rotura de una muestra de ese sello, ensayada a una presión de confinamiento de 850 psi, luego

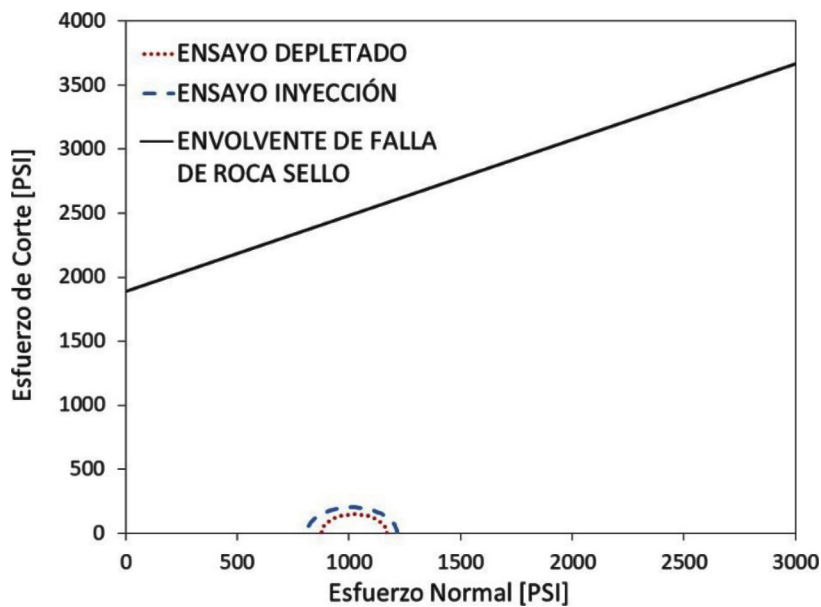


Figura 8. Envolvente de falla de una muestra de sello y los esfuerzos a los que fueron sometidas las muestras durante el ensayo de ciclado.

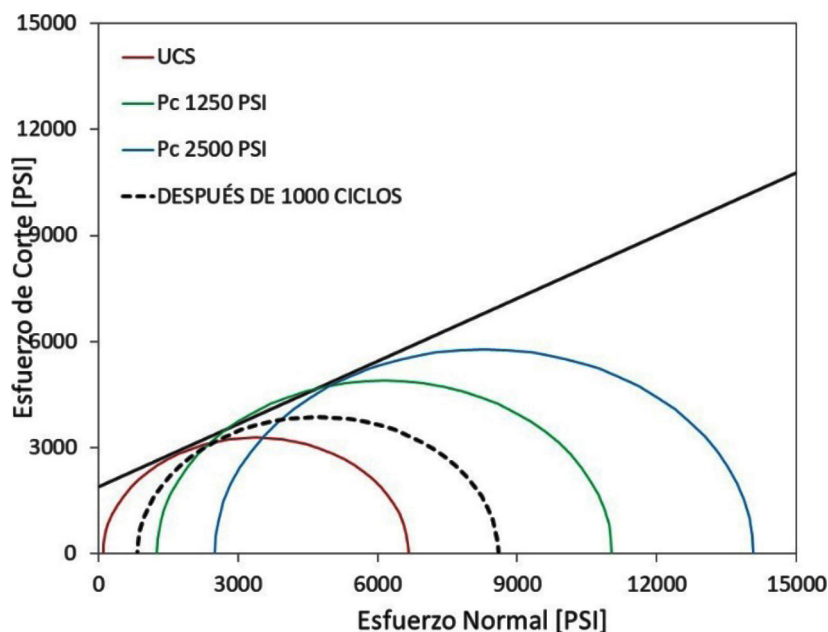


Figura 9. Envolvente de falla de una muestra de sello previo al ensayo de ciclado superpuesto al círculo de Mohr de una muestra del mismo grupo ensayada a rotura luego de 1000 ciclos de carga y descarga.

se ser sometida a 1000 ciclos de carga y descarga. Puede observarse que el círculo resultante se encuentra en contacto con la envolvente de falla que se traza a partir del ensayo de muestras no cicladas. Esto implica que no hubo un deterioro de la resistencia a la rotura de la roca durante el ciclado. Lo mismo se repitió para las 10 muestras ensayadas a carga cíclica, de distintos sellos y distintas zonas del reservorio, verificándose la misma tendencia.

Finalmente, se compararon los tiempos de tránsito de las ondas P y S previa y posteriormente al ensayo de fatiga (Fig. 10). Puede observarse que, para los sellos, las velocidades son las mismas

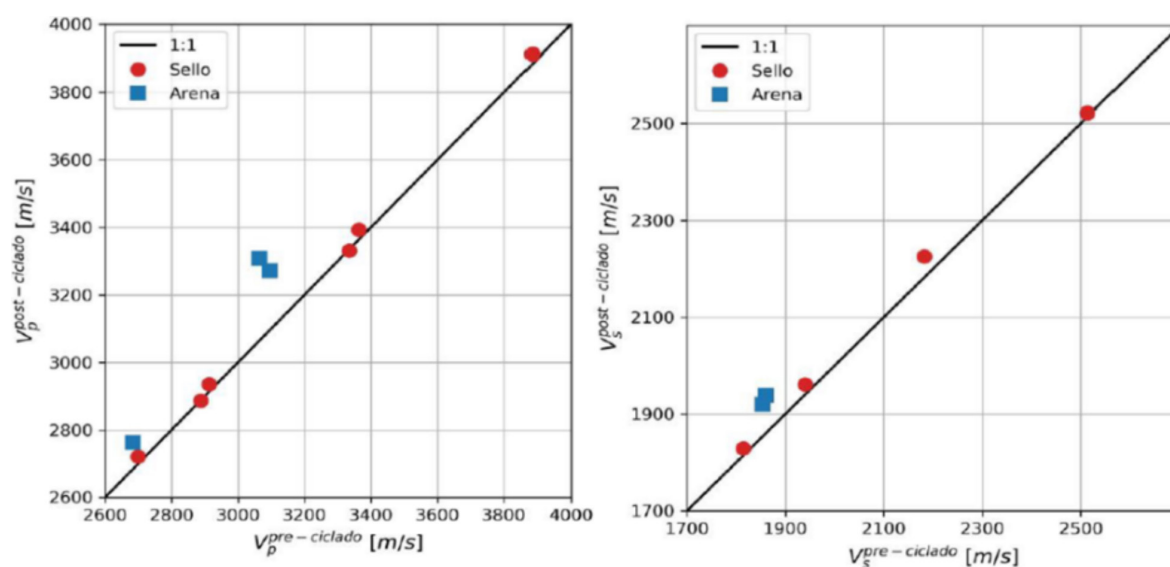


Figura 10. Comparación de las velocidades de onda P y S medidas previo y posterior al ensayo de ciclado para muestras de sello y reservorio.

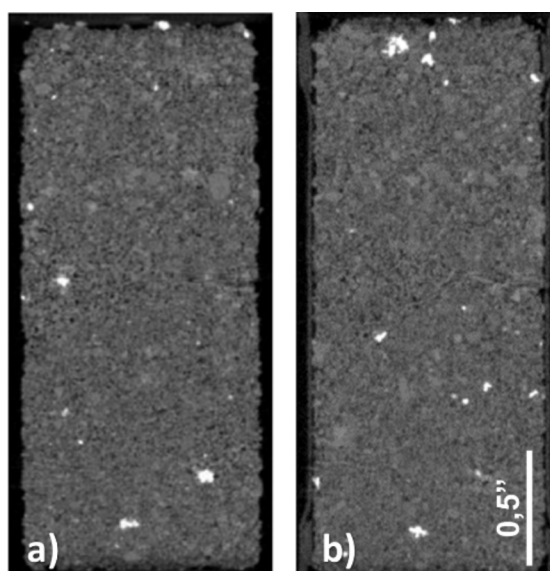


Figura 11. Imagen de una muestra de reservorio escaneada utilizando microtomografía antes (a) y después (b) del ensayo de ciclado.

antes y después del ensayo. Lo que significa que no se presentan cambios que puedan apreciarse mediante la velocidad de ondas elásticas luego del ciclado. Las muestras de reservorio presentan una leve rigidización después del ensayo. Esto puede deberse a la compactación de las arenas, ya de por sí poco consolidadas, debido al aumento de la superficie de contacto entre los granos por compactación o por mecanismos relacionados al cierre de fracturas y a la reducción de asperezas en los contactos de grano (Fjaer 2019). Según lo que se observó con el microtomógrafo, la deformación remanente luego de los 1000 ciclos no es visible, como puede observarse en la Figura 11 para una de las muestras de reservorio, considerándose despreciable.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de muestras de roca almacén y sello de un reservorio de gas depletado de la cuenca Neuquina para analizar el comportamiento mecánico de las rocas y verificar la factibilidad de convertirlo en almacén subterráneo de gas natural. Para ello se realizaron ensayos geomecánicos de los que se obtuvieron los resultados experimentales necesarios para la calibración del modelo geomecánico isotrópico poroelástico.

Se estudió también la resistencia a la carga cíclica del reservorio, teniendo en cuenta los ciclos anuales de inyección y extracción de gas a los que sería sometido el reservorio. Para esto se diseñó un ensayo en el que se utilizó la máxima amplitud a la que sería sometida la roca según un modelo geomecánico. Se eligió una frecuencia consistente con la velocidad del ensayo de resistencia a la compresión triaxial y se realizaron 1000 ciclos de carga y descarga. Se demostró que la resistencia de la roca no se ve alterada por el ciclado y que la integridad de esta, observada por microtomografía, se mantuvo luego de los 1000 ciclos. A partir de la medición de velocidad de ondas elásticas se observó que los sellos mantienen su rigidez luego del ciclado y que las muestras de reservorio manifiestan una leve rigidización que puede deberse a su condición de arena poco consolidada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer al equipo de trabajo del Laboratorio 22 de Y-TEC por el apoyo técnico.

REFERENCIAS CITADAS

- Amadei, B., 1996. Importance of Anisotropy When Estimating and Measuring In Situ Stresses, Rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 33, N°3, pp. 293-325.
- Cerfontaine, B. y Collin, F., 2018. Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: review, interpretation and research perspectives, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol 51, pp. 391-414.
- Díaz, E., Hryb, D. E., Merchán, V. E., y Ciancio, M.L., 2021. Geomechanical Characterization of a Prospective Reservoir for Underground Gas Storage in Neuquén Basin, Neuquén Province, Argentina, 55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, virtual.
- Fjær E., 2019. Relations between static and dynamic moduli of sedimentary rocks, Geophysical Prospecting, vol. 67, pp. 128-139.
- Mavko, G., Mukerji, T. y Dvorkin J., 2009. The Rock Physics Handbook, Second Edition Tools for Seismic Analysis of Porous Media. Cambridge University Press.
- Pique, T.M., Espinoza, D.N., Camilion, E. y Wino-grad, E., 2020. Poromechanical characterization of a tight-sandstone formation, American Rock Mechanics Association 54th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, virtual.
- Sales, T., Giusiano, A., Gutiérrez Schmidt, N., Alonso, J. y Muñoz, O. 2014. Análisis estratigráfico secuencial para la evaluación de reservorios tipo Shale de la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina, Argentina. II Simposio de Arcillas. Las arcillas y el hombre: geología, combustibles fósiles, ambiente y cultura material. XIX Congreso Geológico Argentino, junio 2014, Córdoba.
- Zavala, C. y Ponce, J. 2011. La Formación Rayoso (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C., y Vallés J. M., (Eds.), Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino, Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. pp.205-222.

