



GAS Y PETRÓLEO

INNOVACIÓN, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD DESDE LA **UNLP**

COORDINADOR: **FRANCISCO JAVIER DÍAZ**

GAS Y PETRÓLEO: INNOVACIÓN, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD DESDE LA UNLP

Francisco Javier Díaz
Coordinador

Coordinadores de edición: Marina Semper, Claudia Guidone, Florencia Zelaya,
Melany De Juana y Juan Franco Ricciardi

Diseño: Nancy Vara

Derechos de autor: Universidad Nacional de La Plata

ISBN: 978-950-34-2661-6

Fecha: La Plata, Diciembre 2025

Contacto: jdiaz@unlp.edu.ar

ÍNDICE

Prólogo

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA 2025.

Avances y desafíos de un modelo de universidad pública. Proyecto Institucional de la Universidad Nacional de La Plata. ----- 05
Dr. Arq. Fernando Tauber.

Introducción

Gas y Petróleo: innovación, eficiencia y sostenibilidad desde la UNLP. ----- 20
Lic. Francisco Javier Díaz.

Eje 1

Exploración, geociencias y caracterización de reservorios. ----- 24

Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: desarrollo de equipamiento y metodologías en el Laboratorio IEA - FI - UNLP. ----- 25
Leandro N. Bianchi, Pedro I. Lescano, Sebastian A. Alé, Gonzalo Blanco, Carlos Selva.

Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: resultados en el Laboratorio IEA - FI - UNLP. ----- 41
Leandro N. Bianchi, Pedro I. Lescano, Sebastian A. Alé, Gonzalo Blanco, Carlos Selva.

Caracterización litológica y granulométrica de agentes de sostén recuperados mediante flujos de retorno y su comportamiento en el tiempo en reservorios no convencionales. ----- 58
Juan Ignacio Cresta.

Caracterización petrofísica de la Formación Centenario como formación sumidero en un bloque de cuenca Neuquina. ----- 73
Marcia J. Faviana.

Caracterización y análisis de fracturas naturales, área Puesto Touquet, Neuquén, Argentina. ----- 97
Carla Diaz Torra.

Geofísica aplicada a la exploración y desarrollo de hidrocarburos: revisión de las tesis de grado y doctorado en la FCAG-UNLP (2005-2024). ----- 108
Federico G. E. Späth y Santiago Perdomo.

Adquisición de datos sísmicos 3D con nodos y modalidad "Dynamic Slip Sweep" en la Cuenca Neuquina. ----- 125
Ezequiel Valeff, Neptali Requena, Alejandra Galán, Jorge Muñoz, David Silva y Jorge Sanchez.

Eje 2	
Procesos tecnológicos y eficiencia energética.	----- 137
¿Gas natural o gas natural licuado? La huella de carbono del transporte de gas desde Argentina a Brasil.	----- 138
María Gimena Torres, Gabriel Lorenzo y Germán García Colli.	
Copolímeros fumáricos como modificadores de asfaltos: efecto de la estructura macromolecular sobre las propiedades del ligante.	----- 154
María Leticia Bravi Costantino y Tamara Oberti.	
Estructura y agregación de asfaltenos de petróleos argentinos.	----- 164
Axel D. Toledo, Mauricio F. Erben y Mariana Gerones.	

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA 2025

Avances y desafíos de un modelo de universidad pública.

Proyecto Institucional de la Universidad Nacional de La Plata¹

Lineamientos generales

Dr. Arq. Fernando Tauber²

Director del Plan Estratégico de la UNLP (2004-2030)

Cada vez que das un paso adelante, estás destinado a perturbar algo. Agitas el aire mientras avanzas, levantas polvo, alteras el suelo. Vas atropellando cosas. Cuando una sociedad entera avanza, ese atropello se hace en una escala mucho mayor; y cada cosa que trastornes, los intereses creados que quieras suprimir, todo se convierte en un obstáculo (NdeA: un obstáculo a vencer, siempre a vencer).

Mahatma Gandhi

En el marco del Plan Estratégico de la UNLP iniciado en 2004, el capítulo del desarrollo científico tecnológico en general y en particular el que se enfoca en vincular las riquezas naturales de nuestro país con el agregado de valor que brinda nuestra capacidad de generar y actualizar conocimiento científico tecnológico orientado y promover la formación de recursos humanos propios, fundamentales para un desarrollo nacional genuino nos llevó a ensayar y fortalecer caminos específicos que toman esa dirección.

En ese sentido, creamos Mesas de debate entre nuestros investigadores y tecnólogos sobre temas estratégicos para nuestro desarrollo, que promuevan el ambiente emprendedor y los vínculos con el sistema productivo: las Mesas del Litio, del Cobre, del Hidrógeno, de las Tierras Raras, de la vivienda social y de la Inteligencia Artificial, acompañadas por la del Gas y el Petróleo, motivo de esta compilación, convocaron a decenas de grupos que están investigando en esos campos, la mayoría, desde hace décadas. Seguramente se formarán otras Mesas, pero consideramos fundamental dejar el testimonio de nuestros objetivos, propuestas y avances.

A modo de introducción de esta publicación, pensamos en la utilidad de dejar sentado el modelo de universidad pública que construimos y vivimos, en el que se inscriben y circunscriben nuestras iniciativa y aportes, en este caso sobre temas estratégicos para nuestro futuro, como el gas y el petróleo en la

¹ Este documento sintetiza el Proyecto Institucional de base para gestionar el Plan Estratégico de la UNLP 2026-2030 –esta vez en su 7^a versión desde su inicio en el año 2004-. Es un documento que describe el estado de situación y propone y confirma modelo, objetivos generales, particulares, orientaciones y acciones en marcha y a seguir en cada capítulo de las políticas activas que moviliza la institución y justifica su existencia evolucionando de acuerdo a sus objetivos: a las necesidades propias y sociales, responsabilidades y compromisos, dificultades y oportunidades propias de su tiempo.

² Director de Asuntos Municipales 1996-1998, Secretario de Extensión Universitaria 1998-2004, Secretario General de la UNLP 2004-2010, Presidente de la UNLP 2010-2014, Vicepresidente Institucional de la UNLP 2014-2018, Presidente de la UNLP 2018-2022, Vicepresidente Académico de la UNLP 2022-2026.

Argentina, si agregan valor desde el conocimiento que nuestro país genera a partir de su sistema científico y tecnológico y de la formación de sus recursos humanos.

Los objetivos de nuestra Universidad Pública

Las universidades de América Latina y el Caribe acordamos hace tiempo que la educación superior es un bien público y social, un derecho humano universal y una responsabilidad del Estado. Desde la década del 90 defendimos esa visión en cada debate dado en los foros educativos mundiales contraponiendo este modelo al representado en otros países del resto del mundo que entiende el acceso a los conocimientos superiores como un bien selectivo, transable en el mercado.

La expectativa de nuestro desarrollo como país y nuestro progreso individual estuvieron siempre sustentados en la igualdad universal de oportunidades basada en principios fundamentales de inclusión. El ingreso irrestricto y la gratuitad de la enseñanza universitaria garantizadas definitivamente en la Argentina por la ley 27.204 sancionada el 28 de octubre y promulgada por la Presidenta Cristina Fernández de Kirchner el 9 de noviembre de 2015, ya nacieron en las ideas de la Generación del '80 -Sarmiento, Avellaneda, Roca- plasmadas en 1884 en la Ley 1.420 de Educación Común con los preceptos de "laica, obligatoria y gratuita" para la educación primaria, extendida luego a la secundaria; se plasmaron en el ideario de la Reforma Universitaria de 1918; y se concretaron inicialmente en el Decreto 29.337 que firmara el Presidente Juan D. Perón el 22 de noviembre de 1949.

Hoy a nadie se le ocurre proponer revisar los conceptos de gratuitad para la educación obligatoria inicial, primaria y secundaria y debemos asegurarnos que en esa línea no queden bolsones de discrepancia con el derecho universal a la gratuitad de la enseñanza universitaria de grado, aspirando a multiplicar esa oferta gratuita en el posgrado. El modelo nacional, largamente centenario, impone el derecho a la educación de todo el que esté dispuesto a hacer el esfuerzo de superarse, adquiriendo y acreditando más conocimientos.

La universidad debe ser un espacio para tener ideas y discutirlas, alejada del pensamiento único, promotora del pensamiento diverso, original y propio; caracterizada por estar llena de inquietudes, rechazos, audacias, escrúpulos y esperanzas que custodian el comportamiento ético, transparente, republicano y democrático de sus miembros.

Debe ser firmemente inclusiva y entender a "la educación" como una línea ininterrumpida e ininterrumpible que no corresponde que se corte por una falla del sistema que frene el proceso de toma de conocimientos de aquel que quiere seguir sumándolos por un fracaso, dificultad o deficiencia circunstancial.

Si un estudiante no sabe lo suficiente para avanzar a un estadio superior en el proceso de su formación, pero tiene la firme voluntad de resolver sus déficits esforzándose en sus estudios, la universidad debe darle siempre esa oportunidad. No puede dejarlo flotando en un limbo que no le permita ni retroceder ni avanzar. Y esto debe suceder desde el ingreso hasta la finalización de sus estudios.

Esto no significa resignar calidad (ni pertinencia, ni la siempre bien defendida búsqueda de la excelencia), por el contrario, significa agregarle responsabilidades al Sistema. Ese es el verdadero "contrato" que firmamos cuando este modelo fue concebido para desarrollar al país y multiplicar las oportunidades para el progreso colectivo. La calidad y la masividad, asociada al esfuerzo y al compromiso son un conjunto indisoluble. Si existe uno de estos factores, necesariamente deben existir los otros en la universidad pública argentina.

No puede considerarse realmente de calidad la educación superior de un país que acepta dejar afuera a la mayoría de la población y no apunta a ofrecer oportunidades de acceso. La calidad incluye a la ética y a la conciencia social y es claro que cuando el acceso a la educación superior se limita a pocos, ella tiene características que la asemejan a un bien de mercado y no a un derecho humano universal.

Los principios de la Reforma de 1918, nacidos en la Universidad Nacional de Córdoba, quizás la última gran revolución en la Educación Superior de alcance continental, fueron asimilados inmediatamente por las Universidades Nacionales de La Plata y Buenos Aires, y las Provinciales de Tucumán y el Litoral (únicas en ese momento en la Argentina) y se propagaron inmediatamente por América Latina y el Caribe.

Sus postulados de autonomía, cogobierno, libertad de cátedra, gratuidad, ingreso irrestricto, ingreso a la docencia por concurso, extensión universitaria y concebir a la Universidad como el ámbito natural de debate de los temas que le importan e interesan a la Sociedad, señalaron el camino ya centenario para la construcción de un modelo de inclusión, todavía incompleto en su concreción en vastos territorios de nuestro continente, que se sostiene en la enseñanza, la investigación y la extensión universitaria.

Sin embargo, las tremendas asimetrías sociales en contar con oportunidades de progreso y la permanente y creciente defensa de la construcción de nuestros países a partir de decisiones democráticas y soberanas, imponen sumar a esos postulados básicos, a la producción (sostenida en el desarrollo de proyectos científico tecnológicos y su transferencia) y al trabajo (impulsado por la innovación, el emprendedorismo y el fortalecimiento de nuestros recursos humanos formados en todos los niveles, incluso el de educación formal alternativa, desde la propia gestión universitaria).

Es un objetivo laborioso y difícil, pero no nos atrevemos a muchas cosas porque son difíciles, pero son difíciles porque no nos atrevemos. Todo parece imposible hasta que se hace y desde ya, lo importante nunca es fácil, pero nos estamos demostrando que desde el conocimiento podemos concretar nuestros sueños y convicciones. "Somos lo que hacemos" diría J. P. Sartre y como universidad pública, debemos hacer lo que es necesario (no es suficiente con lo posible) por el mejor futuro para nuestro pueblo.

Necesitamos que la Universidad Pública reafirme su condición de herramienta para la transformación positiva de nuestra Patria y de progreso generalizado de sus habitantes, fundamento de las decisiones soberanas y fábrica de oportunidades para el conjunto de nuestra sociedad ¿puede ésta o cualquier coyuntura que nos desafía e interpela, aunque amenace a ser recurrente, hacernos arriar las banderas que aprendimos a levantar con enorme sacrificio, pero también con firme convicción y compromiso? No sintamos nostalgia por lo que todavía no sucedió. Ayudemos desde la universidad pública a construir el mejor futuro para nuestra Patria.

El modelo de universidad en la Universidad Nacional de La Plata

Este modelo transparente e inclusivo comprende brindar los conocimientos específicos para concebir al mejor profesional, pero también generar el ambiente imprescindible para contribuir fuertemente a dotarlo de los valores fundamentales para consolidarlo como el mejor ciudadano, pleno de solidaridad, consciente de su responsabilidad para los que menos tienen, tolerante hasta la exageración (para algunos), sabiendo que el debate, el pensamiento diferente y las culturas generacionales siempre son más que el silencio homogéneo e indiferente.

Estamos convencidos de que la democracia es un bien indispensable para poder alcanzar nuestros objetivos máspreciados, que nos costó mucho lograrla y sostenerla y que no es una condición natural inextinguible si no la protegemos y la mejoramos con más calidad y más derechos; que la defensa firme del medio ambiente es una acción de conciencia para dejarle a nuestros hijos y a sus hijos un mundo mejor que el que recibimos y en el que vivimos; que los derechos humanos no sólo significan la custodia de nuestra memoria en la búsqueda de la verdad y de la justicia para saldar las deudas de un pasado injusto, brutal y doloroso y de un presente inquietante, sino que acompañan cada acto de nuestra vida, basados en la convivencia, en la mentada búsqueda de la igualdad, en el reconocimiento del diferente, de las minorías y de cada uno de nosotros como un par.

En un mundo donde el conocimiento, la ciencia, la tecnología y el arte juegan un papel de primer orden, el desarrollo y el fortalecimiento de la Universidad Pública, tal como la concebimos, constituyen un elemento insustituible para el avance social, la generación colectiva de riqueza, el fortalecimiento de las identidades culturales, la cohesión social, la lucha contra la pobreza, el hambre y las enfermedades, la prevención del cambio climático y la crisis energética, así como para la promoción de una cultura de paz, en la convicción de que la búsqueda de la igualdad y la inclusión, a partir de una sociedad con las mismas oportunidades de acceso al conocimiento, es indispensable para consolidar una Patria soberana.

Para entender la base conceptual que fundamenta la razón de ser de la UNLP en estos tiempos, nuestra universidad tiene y confirma como objetivos primordiales:

1- Formar estudiantes en el pregrado, grado y posgrado volviéndolos graduados firmes en sus conocimientos específicos y en sus condiciones y convicciones ciudadanas, comprometidos siempre con su

comunidad, buscando el crecimiento constante de la matrícula, la permanencia con avances sostenidos y continuos en sus carreras que permitan su culminación en tiempos acordes y conscientes del esfuerzo social y personal necesario de hacer para alcanzar su graduación. No debemos conformarnos con sospechar que el sólo paso por la universidad transforma positivamente al individuo. El país necesita de profesionales probos que apuntalen su transformación y la universidad pública tiene la alta responsabilidad de proporcionarlos.

Este supuesto "del sólo paso" puede valer para el conjunto de la sociedad. No para quienes tenemos la responsabilidad de educar y ayudar a formar. Para nosotros, cada estudiante que abandona sus estudios es un "fracaso" que debemos impedir con nuestro esfuerzo y el de nuestra institución.

2- La UNLP también se propone producir conocimientos útiles para el desarrollo del país y el bienestar de la humanidad, con una agenda científica, tecnológica y artística convergente con las necesidades de nuestra sociedad y las demandas de nuestro país para su desarrollo soberano. Entendemos que no hay soberanía sin conocimiento propio y generalizado. El conocimiento se compra o se genera y no tomaremos nuestras propias decisiones si dependemos totalmente de los que nos venden. Seremos realmente soberanos si producimos el conocimiento necesario para alcanzar nuestro propio bienestar.

El hambre, la pobreza, las enfermedades y plagas que nos aquejan sin acceso universal a alimentos saludables, vacunas y medicamentos, a una vivienda digna y toda demanda insatisfecha para una mejor calidad de vida nos alejan de alcanzar objetivos básicos de dignidad social y oportunidades justas. La preservación de los recursos y bienes naturales, la producción ambientalmente sustentable y responsable y la colaboración con toda política pública apuntada a las necesidades sociales y al desarrollo nacional y regional, constituyen las grandes líneas para una investigación orientada, emergente de una sólida investigación básica y promotora de una investigación aplicada transferible y traducida en producción concreta y tangible, que se constituya en guía experimental de avanzada, funcional a la concreción de estas metas.

Para esto debe proteger y crecer en sus recursos humanos formados que son su mayor capital. La infraestructura y el equipamiento adecuado y los insumos indispensables son fundamentales, pero también cáscaras vacías de contenido si no contamos con un capital humano capacitado y dotado de los valores en los que creemos, creciente y convencido de que ese es el camino. Lo demuestra el papel de nuestros investigadores, tecnólogos y artistas, respaldados por nuestros docentes, Nodocentes y estudiantes, quienes cumplen un rol fundamental en esta crisis humanitaria estructural de nuestro pueblo, rodeada además de otras pestes prioritarias de resolver para y desde nuestra región como por ejemplo el dengue, el chagas o estructuralmente el hambre.

3- Es una responsabilidad y objetivo fundamental interactuar con nuestros graduados emprendedores e innovadores que integren o no formalmente el sistema científico-tecnológico-artístico pero que invierten esfuerzo y conocimiento en un sistema productivo nacional y regional, siempre constructor de soberanía y de una mayor equidad. Además de actualizar permanentemente sus conocimientos, procuramos igualar oportunidades y protegerlos, entusiasmarlos e incentivarlos ofreciéndoles nuestra infraestructura, nuestro equipamiento sofisticado (que se vuelve obsoleto antes de volverse viejo, muchas veces subutilizado si su único rol es la enseñanza y la investigación), nuestros vínculos, promoción y avances, sin abandonarlos ni tomar distancia una vez concluido el ciclo formativo formal.

La Universidad tiene múltiples relaciones con el sistema productivo e institucional regional, nacional y mundial, pero las que debe conformar con sus graduados deben ser nítidas, contundentes y permanentes. Nuestro país y nuestra región necesita de profesionales, de recursos humanos formados para la ciencia, el desarrollo tecnológico, el artístico y también para ser capaces de insertarse desde el conocimiento en el tejido productivo y de servicios indispensables para un país más soberano y para una sociedad más integrada. Cada vez más profesiones requieren de equipamientos y logística que resulta inaccesible desde un emprendimiento particular, sea individual o colectivo. En nuestra universidad lo puede encontrar y nosotros se lo tenemos que brindar. La Universidad Pública y sus graduados son eslabones de una misma cadena que será robusta e indestructible si comprende que su alianza permanente en la formación, el trabajo y la producción, es desarrollo generalizado, fortaleza en las circunstancias amenazantes y certeza de progreso colectivo.

4- La UNLP se obliga, con vocación infinita, a integrar la red social en todos sus niveles e interactuar naturalmente con la comunidad, intercambiando saberes y miradas, como parte de un proceso recíproco, especialmente con aquellos conciudadanos que tienen menos y sufren más necesidades. La extensión universitaria como parte del proceso formativo de estudiantes, docentes y Nodocentes debe ocupar un lugar de jerarquía que se ensanche con la capacitación formal alternativa de aquellos sectores de la comunidad que precisan adquirir y certificar conocimientos y habilidades -muchas identificadas como oficios- que multipliquen sus oportunidades en el mundo del trabajo y formalizar y fortalecer capacidades comunitarias para mejorar sus condiciones de vida. La universidad pública debe saber armonizar en su actividad la educación formal de pregrado, grado y posgrado, la producción científica, tecnológica y artística, la transferencia de sus frutos y su integración académica a la región y al mundo, con la necesaria cercanía a las necesidades coyunturales y estructurales del Pueblo del que proviene.

La inmensa mayoría de nuestros conciudadanos con necesidades de más conocimientos para vivir mejor, mira a la universidad pública como fuente de oportunidades, demandándole conocimientos para insertarse mejor en su medio, espacios de encuentro para intercambiar saberes, construir agendas y trabajar en su desarrollo, no asumiendo la función de otros estamentos, pero si su propio rol como parte del Estado.

El aula universitaria, el taller, el laboratorio y las unidades de producción concreta basada en conocimiento, tienen tiempos y espacios disponibles para poblarla de ciudadanía con voluntad y entusiasmo por aprender siempre y a toda hora. Esto nos consolidará como una sociedad más fuerte, hábil, sabia, capaz de entender que las oportunidades están hasta en los tiempos más difíciles y debemos saber generarlas.

5- Además, nuestra Universidad debe responder a las demandas institucionales crecientes que le hace la sociedad y crecer en diversidad, flexibilidad y articulación. Formar parte de la comunidad académica regional y mundial, intercambiar saberes y experiencias, integrar redes universitarias formativas, científicas, artísticas, solidarias, que nos permita estar a la altura de nuestro tiempo y comprender los escenarios en los que nos toca evolucionar, movilizando estudiantes, profesores, artistas e investigadores en un intercambio productivo que sume siempre en la interacción; y además integrar redes de instituciones no universitarias, comunitarias, profesionales -especialmente de nuestros graduados-, siendo rigurosos en la prioridad de la selección, conscientes que pertenecemos y construimos un modelo que tiene como objetivo fundamental lograr la inclusión social generalizada.

Sobre estas bases asentamos nuestra acción y nuestras estrategias académicas, pero también científicas, tecnológicas, artísticas y de compromiso institucional ante el devenir de nuestra historia, plagada de deudas sociales y con el desarrollo nacional y de necesidad de crecimiento soberano.

Las prioridades en la UNLP

Una institución educativa de gran complejidad como la Universidad Nacional de La Plata afronta y desarrolla centenares de programas y proyectos emergentes de políticas académicas, científicas, artísticas y sociales que trazan objetivos acordes con las definiciones expuestas. El Plan Estratégico de la UNLP, instrumento de gestión participativa emergente de un proyecto institucional que comenzó a sistematizarse como herramienta en el año 2004, cuenta hoy con más de 1.400 programas y proyectos, que distingue a los prioritarios de acuerdo a nuestros objetivos y que se renuevan con distinta periodicidad.

Todos coadyuvan a consolidar el modelo, los objetivos y las estrategias o caminos expuestos para poder alcanzarlos. La mayoría estuvo siempre presente en el Plan, sin embargo, su concreción o la celeridad y profundidad de los cambios de escenarios en todas las escalas, exigen y definen prioridades. Este es un tiempo para gestionar por prioridades:

1- El mayor rendimiento académico y el incremento de la graduación en tiempos proporcionados con la vida útil de cada ciclo formativo son una condición imprescindible para situar a nuestra universidad como una institución útil a la demanda insistente de un país y una sociedad que nos sostiene. Debemos atender las razones particulares y generar políticas para resolver las razones generales. No podemos darnos el lujo como institución y como país, de tener un desgranamiento estudiantil feroz, una duración laxa de las carreras ni de un raquíctico nivel de egreso. No nos lo debemos permitir.

La mejora del rendimiento académico y del egreso se basan en la voluntad del estudiante de hacer mayores esfuerzos para progresar en su carrera, pero hemos avanzado en proveerle más opciones que las que tenía hasta ayer y seguimos:

Implementamos una ampliación optativa del calendario académico con los estudiantes de grado activos. Todavía en muchos casos –carreras y materias-, un tercio del año el docente se separa del estudiante, salvo para tomarle algún examen. Ahora los cursos de ingreso y de adaptación a la vida universitaria empiezan entre la segunda quincena de enero y la primera de febrero en la mayoría de las facultades. Si las cursadas normales comienzan en abril, entonces febrero y marzo son meses de cursadas intensivas de verano y recuperatorios. Las vacaciones de julio y las de verano sirven para recuperar parciales, reforzar conocimientos, completar cursadas que quedaron incompletas, tener mesas de consulta para aclarar dudas previo a los exámenes, hacer cursos integradores que reemplacen al examen si la cursada está aprobada o preparatorios de repaso previos al examen. Incluso para cursar en forma intensiva materias cuatrimestrales.

Pasamos de un calendario de 8 a uno de 11 meses con el alumno con voluntad de avanzar en su carrera en el aula. Las materias tienen, en su inmensa mayoría, un sistema promocional alternativo para toda la cursada, igual de exigente en la aprobación, pero dando la opción al muchas veces traumático examen final. Los tutores alumnos avanzados y los docentes tutores hacen un acompañamiento personalizado del estudiante en la masividad durante toda la carrera, poniendo énfasis en el año de ingreso y en los trabajos finales para el egreso. Si las materias son cuatrimestrales, deben brindarse en los dos cuatrimestres. Debemos recuperar a los estudiantes avanzados que por alguna causa dejaron la carrera con más del 80% de las materias aprobadas, si es necesario yéndolos a buscar. La sociedad invirtió mucho en ellos para que puedan ser profesionales.

La tecnología necesaria para la educación virtual, avanza para transformarse en un complemento definitivo de la educación y la evaluación presencial que permita más inclusión en esta universidad masiva. Ya pensamos que la “presencialidad” también puede ser virtual y alternarse con la presencia física con el objetivo central de poder seguir creciendo, incluyendo. Sería imposible e impensable pensar en lograr una verdadera inclusión masiva basada solamente en el crecimiento de nuestra infraestructura edilicia. Tenemos que lograr que la tecnología educativa sea una herramienta de inclusión que permita presencialidad a distancia, mixta, en grupos integrados por estudiantes en el aula y en otros lugares, participando e interactuando de la misma forma. La presencialidad a través de la virtualidad digital debe ser una herramienta más para multiplicar las posibilidades de la mayoría, así como la inteligencia artificial, la tecnología inmersiva, y otras formas de realidad virtual y la robótica deben crecer como herramientas cotidianas en el transcurso formativo.

Empezamos este proceso de calendario continuo en junio de 2018 y aunque el calendario académico se mide en la Argentina del 1º de abril al 31 de marzo, en marzo de 2025 en la UNLP llevamos más de seis años de implementación paulatina de este ensanche de oportunidades para el estudiante con voluntad de avanzar en su carrera, invirtiendo un mayor esfuerzo y los resultados son muy importantes: en marzo de 2025 (ciclo 2024) los estudiantes de grado de la UNLP aprobaron 85.458³ materias más en el año, que en el ciclo 2017, último con el sistema anterior (que cerró en marzo del 2018). Esto es un 30% de crecimiento en materias aprobadas en siete años y con un sistema que recién empieza a implementarse y que crece permanentemente.

La pandemia nos encontró en medio de este proceso y nos impuso un nuevo desafío: la adecuación a la educación virtual en nuestros cinco colegios de Educación Inicial, Primaria y Secundaria con sus 5.000 estudiantes, en nuestras 17 facultades con sus más de 130.000 estudiantes de grado y 30.000 de posgrado y en nuestra Escuela de Oficios y otras dependencias de Presidencia y de todas las Unidades Académicas con más de 40.000 estudiantes de educación formal alternativa en tiempos de pandemia y 14.000 estudiantes en ciclos normales.

Compramos patentes, utilizamos software libre, acompañamos la gestión generalizada de la gratuidad de los pulsos telefónicos, aprovechamos nuestras plataformas. Cada Facultad, Colegio y Cátedra fue y va produciendo la modalidad que le resulta más cómoda y funcional. También nos capacitamos fuertemente

³ En el ciclo 2017 nuestros estudiantes aprobaron 284.643 materias y en el ciclo 2024 aprobaron 370.101 materias.

en cada una de esas modalidades. Desde marzo de 2020, las primeras 20 semanas dimos cursos virtuales de capacitación a nuestros docentes que seguimos complementando y actualizando hasta hoy, con aceptación y asistencia masiva.

En la UNLP funcionan 3.270 cátedras de grado. Entre las cuatrimestrales y las anuales, en el primer cuatrimestre deben funcionar 1.975 y durante 2020 de la pandemia lo hicieron virtualmente 1.916 –el 97%-. Lo mismo sucedió en el segundo cuatrimestre y desde ya, se normalizaron en los años siguientes.

Equipamos nuestro taller de recuperación de computadoras, tablets y notebooks, que acepta miles de donaciones de artefactos en desuso de instituciones y particulares, los actualiza y repara, y además compramos tablets, lanbooks y notebooks (hasta ahora aproximadamente 5.000) para dotar de tecnología a aquellos estudiantes que no tienen ni siquiera un teléfono celular. Son miles y los artefactos son caros, pero estamos enfocados en lograrlo.

La virtualidad cumple un rol complementario mucho más importante del que cumplía antes de la pandemia. La presencialidad se enriqueció. Por lo pronto, estamos transitando la crisis avanzando por el mismo camino y con el mismo objetivo prioritario: incluir a todo estudiante que esté dispuesto a hacer el esfuerzo y avanzar.

Este conjunto de acciones conformó el Programa de Rendimiento Académico y Egreso –PRAE-. Hoy se consolida y subordina a la promoción de un proceso estructural de titulaciones intermedias, tecnicaturas de 2 y 3 años, reducción de tiempos en las carreras de grado que lo permitan a 4 años teóricos y gratuitad de los posgrados estratégicos para completar el ciclo formativo de educación superior básica. A partir de la reforma de nuestro Estatuto en el año 2008, ya son gratuitos los doctorados para los docentes y Nodocentes de la UNLP y triplicamos con creces la cantidad de doctorandos y doctores entre nuestros docentes investigadores⁴. También son gratuitas para nuestra Comunidad (y masivas) las especializaciones en Docencia Universitaria y en Gestión de la Educación Superior. Avanzamos en el Programa gratuito 4+2 para que nuestros estudiantes puedan alcanzar la titulación acreditada en el grado a los 4 años en la mayor cantidad de carreras posible, incluso con un título intermedio a los dos años y puedan alcanzar opcionalmente y también en forma gratuita, formación de posgrado, sea en especializaciones o maestrías.

La consecuencia directa de estos nuevos procesos es el acercamiento entre la duración real de las carreras a la duración teórica, las titulaciones sistemáticas acreditando conocimientos y el crecimiento en la cantidad de graduados. Estamos cambiando el paradigma del funcionamiento en el pregrado, grado y posgrado. La conclusión elemental es que cuando el Estado está presente exigiendo esfuerzos individuales y colectivos, pero ofreciendo oportunidades de progreso, la Comunidad las aprovecha y la Sociedad en su conjunto se beneficia.

Por su lado, las prioridades para las nuevas carreras de grado en una Universidad prolífica en su oferta, están reservadas a las demandas acuciantes de una sociedad en transformación y a las necesidades de estar a la altura de un rumbo mundial de producción de nuevos conocimientos y tecnologías. Mucho tenemos para hacer en la adecuación a las demandas contemporáneas de nuestro actual sistema.

2- El crecimiento de los desarrollos científicos, tecnológicos y artísticos enfocados en las necesidades sociales, el cuidado ambiental y el desarrollo soberano de nuestro país ocupan un lugar central en nuestras políticas. Como universidad pública tenemos que ser y demostrar ser una herramienta imprescindible para el progreso colectivo nacional y para eso debemos producir conocimiento útil y transferirlo intensamente a las instituciones de la Sociedad Civil, a la micro, pequeña y mediana empresa, al Estado en todos sus niveles. Sin embargo, el crecimiento y la protección firme de nuestros recursos humanos formados son la única garantía para que podamos seguir dando respuesta al sinnúmero de demandas sociales e institucionales a la ciencia, a la tecnología y al arte.

Nuestros programas apuntan a garantizar el funcionamiento de nuestras unidades de investigación y transferencia (cerca de las 200 incluyendo más de 160 Laboratorios, Centros e Institutos), muchas de doble y triple dependencia con la CICpBA (Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos

⁴ La UNLP contaba en marzo del año 2025 con 3.016 docentes con título de doctor, 855 con título de magíster y 767 con título de especialización –total: 4.638 (cifra de crecimiento satisfactorio ya que tenía 918 doctores en el año 2008, año en el que se reformó el Estatuto y se garantizó la gratuitad de los doctorados para los docentes de la UNLP)-.

Aires) y el CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), en dotarlas de infraestructura y equipamiento adecuado, de asegurarnos que esos equipamientos sean reparados cuando tienen alguna dificultad (y esto significa muchas veces grandes esfuerzos), pero fundamentalmente se enfocan en nuestros recursos humanos: que cuenten con las becas y subsidios elementales para sostenerse en el sistema y seguir produciendo, haciendo todo lo posible para brindarles estabilidad y máxima dedicación, protegiéndolos en las épocas en las que otros sectores del Estado los rechazan o expulsan, ayudándolos en sus viajes de estudio en épocas de normalidad, en los eventuales costos para publicar, en la organización, gastos y logística de encuentros de intercambio virtuales, presenciales o mixtos.

Desarrollamos un sistema propio de categorización docente más amplio e inclusivo que los nacionales vigentes: el SICADI, Sistema de Categorización de Docentes Investigadores/as de la UNLP, para involucrar a más docentes en proyectos de investigación con reconocimiento curricular y crecer en actores y directores de proyectos, rigurosamente evaluados en todos los campos del conocimiento. Dimos el debate y transformamos el programa en Ordenanza en nuestro Consejo Superior por unanimidad de nuestro cogobierno. Fuimos por el mismo camino y con el mismo objetivo en una nueva Ordenanza para acreditar nuestros Laboratorios, Centros, Institutos y Unidades de Investigación. El crecimiento de nuestra comunidad de investigadores y de las instituciones que los contienen es notable.

El aporte de nuestros investigadores en las tareas de diagnóstico, en avances científicos y tecnológicos funcionales y convergentes a la causa de nuestra crisis social y necesidades de desarrollo soberano y en el voluntariado social en los más diversos campos, es formidable.

3- Insistimos en afirmar que es imprescindible involucrarnos con el sistema productivo y de servicios, sobre todo a partir de nuestros graduados emprendedores e innovadores, articulando con ellos nuestro inmenso dispositivo de infraestructura, equipamiento y producción de nuevos conocimientos. Poniéndolo a disposición de facilitar y acelerar su creatividad, su cultura emprendedora y su capacidad de asociarse produciendo sinergias mucho más potentes que las posibles desde su esfuerzo aislado e individual, constituyéndonos en núcleos de vinculación complejos y útiles al progreso de quienes formamos. Esto promueve un efecto multiplicador que acentúa el perfil de una región como la nuestra, que se caracteriza por una alta proporción de población formada y que sin embargo, no tiene activos naturales, ni humanos que tengan ni cerca, la dimensión que le puede dar el valor agregado del conocimiento.

El paso en esta etapa es lograr la construcción de Centros Logísticos Tecnológicos y de Extensión dotados de equipamiento y fibra óptica potente que además complementen la actividad formativa y de investigación de cada Facultad en las más diversas ramas del conocimiento. Las Empresas de Base Tecnológica –EBT- conformadas por nuestros graduados, son fundamentales y crecen en forma permanente.

Creamos Mesas de debate entre nuestros investigadores y tecnólogos sobre temas estratégicos para nuestro desarrollo, que promuevan el ambiente emprendedor: las Mesas del Litio, del Cobre, del Hidrógeno, de las Tierras Raras, de la vivienda social y de la Inteligencia Artificial, acompañadas por la del Gas y el Petróleo, motivo de esta Compilación, convocaron a decenas de grupos que están investigando en esos campos, la mayoría, desde hace décadas. Seguramente se formarán otras Mesas. El desarrollo y lanzamiento de satélites universitarios, el desarrollo propio de vacunas, el diseño de impresoras 3D para la construcción de viviendas, la electromovilidad traducida en vehículos familiares y de trabajo, colectivos urbanos, trenes y hasta un avión eléctrico con baterías de litio son ejemplos tangibles de estos procesos. El emprendedorismo público, público /privado y de nuestros graduados, se consolida como línea fundamental de nuestro modelo de universidad.

La UNLP se constituye en unidad demostrativa. Cada uno de nuestros programas académicos, científicos y tecnológicos tienen como respaldo una materialización concreta. El programa energético, ambientalmente sustentable se representa en diversos emprendimientos tecnológicos, pero el prioritario es la construcción en marcha de un campo fotovoltaico de 18.000 pantallas solares girasoles y bifaciales capaces de producir 10 kw de energía, que es la que necesita toda la universidad para funcionar sin afrontar el costo actual de esa energía. Sólo el alquiler del uso de la red actual. En 2027 estará funcionando.

Construimos un Centro Informático de la Facultad homónima asociado a grandes y hasta micro empresas nacidas en la Universidad –más de 70- y los resultados son muy alentadores. También un Centro de Desarrollo Tecnológico –FAUtec- de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, un Centro de Extensión con

Hospital Escuela (en calle 2 entre 43 y 44) de la Facultad de Psicología, una Escuela de Oficios y Centro de Servicios y equipamientos que lidera nuestra Secretaría de Políticas Sociales y la Facultad de Trabajo Social, un Centro Público de Arte que dirige la Facultad de Artes que también cuenta con un moderno set de cine y un taller de escenografía, un Hotel Escuela para la carrera de Turismo de la Facultad de Ciencias Económicas (42 habitaciones dobles con auditorio para 180 personas y aulas), un Hospital Integrado con alta tecnología que usa la robótica para la simulación en las prácticas tanto en la Facultad de Medicina como en la de Odontología, nuevos Hospitales Escuela en las Facultades de Veterinarias (grandes y pequeños animales) y Trabajo Social en la carrera de Fonoaudiología.

La Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas cuenta con el Planetario y con un complejo de edificios astronómicos del siglo XIX e inicios del XX que es considerado para ser declarado Patrimonio de la Humanidad. Además, el Departamento de Geofísica cuenta con equipamiento de última generación para la exploración de la corteza terrestre hasta 1.000 mts. de profundidad que lo vincula intensamente con el sistema productivo geológico como Vaca Muerta o la cuenca litífera.

Y la Facultad de Ciencias Naturales coordina el Centro Interdisciplinario de Investigaciones Aplicadas al Agua y al Ambiente -CIIAAA- acompañada por las Facultades de Ingeniería y la de Ciencias Astronómicas y Geofísicas y otras universidades e instituciones científicas. La Facultad de Ciencias Naturales cuenta también con el Museo de La Plata, uno de los museos de Ciencias Naturales más importante de América Latina, considerado Patrimonio Nacional.

La Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, en las carreras de Educación Física, dispone además de su propio complejo de canchas, polideportivos y pileta cubierta climatizada, con el Campo de Deportes de la UNLP, pero también cuenta con herramientas potentes de vinculación comunitaria como el PEPAM -Programa de Educación Permanente de Adultos Mayores- y la Escuela de Lenguas que ofrece enseñanza para diversas lenguas: francés, inglés, italiano y portugués. Y que articula con el Instituto Confucio que funciona en el Instituto de Relaciones Internacionales de la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales y en la Facultad de Ingeniería para la enseñanza del chino mandarín y actividades de intercambio académico y científico tecnológico. El IRI además dicta cursos de enseñanza de los idiomas japonés, coreano y ruso.

La Facultad de Ingeniería cuenta con el complejo tecnológico del "Instituto Malvinas" y participa de múltiples actividades con otras Facultades, la Facultad de Periodismo y Comunicación Social lidera el funcionamiento del Canal de TV, la Radio AM y FM y la Editorial de la UNLP y realiza una intensa tarea de extensión y voluntariado en su propia sede y en diversos centros periféricos al igual que la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, esta última encabeza la larga lista de oferta de formación universitaria para estudiantes en contexto de encierro.

Las Facultades de Ciencias Agrarias y Forestales y de Ciencias Veterinarias comparten varios campos y centros experimentales. La primera además cuenta con el Centro Tecnológico de la Madera orientado a construir todo tipo de piezas, pero en particular unidades habitacionales y muebles para la emergencia social. Con un centro de producción de alimentos deshidratados -150.000 raciones diarias de legumbres, hortalizas y carnes- para contribuir a dar respuesta a la emergencia social en su lucha contra el hambre, apuntalado fuertemente por el CIDCA, Centro de Investigación especializado en alimentos de la Facultad de Ciencias Exactas y el CONICET, articulado con nuestro importante corredor hortícola, ayudándolos con la deshidratación de sus excedentes, los que siempre fueron desechados.

Esta fábrica pública de alimentos deshidratados se transformó en el núcleo de un sinfín de emprendimientos alimenticios con el valor agregado de nuestros conocimientos: prebióticos, probióticos, kéfir, caldos de hongos, subproductos de la horticultura regional y tantos otros que conocemos y otros emprendimientos que se fueron incorporando, como la Biofábrica, que produce fertilizantes y pesticidas naturales sobre la base de la fermentación de la hortiga, del ajo y otros, de gran efectividad, bajísimo costo y sustentabilidad ambiental y que gana cada vez más espacio entre los productores de diversa escala en nuestro corredor flori, frutihortícola, el más extenso de la Argentina, abarcando centralmente, los distritos de La Plata, Berazategui y Florencio Varela.

Ciencias Veterinarias comparte con otras facultades múltiples proyectos y cuenta, como ya hicimos referencia, con el Hospital Escuela de Grandes y Pequeños Animales.

Seguimos con Energía alrededor de Y-TEC, una empresa pública potente, de YPF y el CONICET, que logramos que se asentara en una parcela proporcionada por la UNLP formando parte de un predio mucho mayor.

También en ramas del conocimiento en donde tenemos fortalezas que ofrecer: agua, alimentos, medicamentos y vacunas, industrias culturales, de la madera para vivienda social y muebles, viviendas de hormigón levantadas con Impresoras 3D diseñadas por la UNLP junto a los Astilleros Río Santiago, entre otras que se van conformando desde nichos más específicos.

Construimos y pusimos en marcha el Polo Tecnológico "Jorge Sábato", un complejo edilicio de 10.212 m² que integran las Facultades de Informática, Ciencias Exactas, Naturales, Arquitectura, Ingeniería, Veterinarias, Medicina, entre otras, destinado a alojar desarrollos y producciones de un alto valor agregado de conocimientos. Entre ellas un centro para la investigación, desarrollo, evaluación y sobre todo producción de vacunas, una Fábrica de celdas y baterías de litio -UNILIB-, articulados con Y-TEC (YPF, CONICET), el mencionado Centro Interdisciplinario de Investigaciones Aplicadas al Agua y al Ambiente -CIIAAA-, el Programa FAUtec de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo y una serie de Empresas de Base Tecnológica coordinadas con nuestros graduados investigadores científicos y tecnólogos.

La Facultad de Ciencias Exactas cuenta con una Unidad de Producción de Medicamentos capaz de producir todo el vademécum básico de los hospitales públicos de la región y de la provincia. Su infraestructura y equipamiento actual necesita de una importante ampliación y nos encontramos en pleno proceso de diseño para poder licitarlos.

La incidencia del costo de los envases en cualquiera de los productos, nos llevó a considerar producción propia, con la participación del Departamento de Diseño Industrial de la Facultad de Artes, de blisters, atomizadores y frascos, que son mucho más caros que un repelente, alcohol, gragea o pastilla.

El Hospital Escuela Odontológico Universitario de esa Facultad es uno de los más importantes del país, con 200 sillones en sala y 60 unidades de atención periféricas a las que se suman los 16 sillones en consultorios del ex Sanatorio de la Carne de Berisso, dotado de tecnología de última generación -totalmente gratuito, atiende hasta 2.000 personas diarias- es un ejemplo de solidaridad, pero también de sinergia y articulación con sus graduados.

El sistema de enseñanza en Ciencias de la Salud es una particularidad. Lo integran 14 carreras de diferentes facultades con unos 45.000 estudiantes y 3.000 docentes. Avanza en un sistema integrado de prácticas denominado Hospital Público Universitario en red, con el sistema de salud pública regional tanto provincial como municipal, integrado por 7 hospitales públicos de alta complejidad, 14 de complejidad intermedia y 67 unidades de atención primaria a la salud. La práctica se inicia desde el primer año del grado.

En ese contexto, implementamos el Programa SURES (Sistema Universitario Regional de Salud), que persigue el objetivo de fortalecer las redes locales para contribuir al acceso del derecho a la salud en barrios de La Plata. El SURES, pensado inicialmente con 5 salas y una posta itinerante, es una forma de continuar con las tareas de coordinación y articulación que se llevaron adelante desde esta Universidad en conjunto con el sistema de salud provincial en el marco del voluntariado desarrollado durante la pandemia COVID-19 y se realiza conjuntamente entre la Secretaría de Extensión y la Secretaría de Salud de la UNLP a través de propuestas de curricularización de prácticas extensionistas y profesionales. Desde 2023 se implementa en ese marco el Programa PARES (Programa Académico de Fortalecimiento de las Redes en Salud), coordinado por las Secretarías Académica y de Extensión y la Prosecretaría de Salud de la UNLP, mediante el cual estudiantes de grado realizan prácticas curriculares relacionadas con el campo de la salud en el ámbito de los SURES. Además construimos una gran Unidad Sanitaria Escuela en Berisso, para asistir a la población necesitada y fortalecer los programas de prácticas y formación profesional.

4- Sostuvimos propuestas de capacitaciones extracurriculares en el marco de la Educación Formal Alternativa que acerque y nos integre a sectores de nuestra comunidad que siempre estuvieron alejados de la universidad pública, sin advertir (ambos) que podemos ser el soporte sobre el cual puedan asentar sus expectativas de progreso o la satisfacción de sus inquietudes sobre determinados conocimientos, es el desafío más importante de nuestro tiempo para la extensión universitaria. Debemos adecuar los criterios de la educación formal en todos sus niveles a las demandas de nuestra sociedad en este tiempo, pero existe un sector enorme de esa sociedad que no recorrerá ese camino y sin embargo necesita de nosotros, de lo

que sabemos hacer y requiere que lo compartamos y comprendamos lo que ellos saben y pueden hacer. Esa conjunción de saberes nos da la oportunidad de consolidarnos como universidad popular, naturalizada en la vida cotidiana de nuestro pueblo.

En términos de Formación Profesional en oficios nuestra universidad desarrolló en los últimos quince años, una propuesta que partió de cursos de oficios en los barrios en el año 2010 en el marco de una perspectiva extensionista de una universidad pública con presencia en el territorio que logró consolidarse y ser reconocida como una propuesta académica que pudo integrar la perspectiva intersectorial y situada vinculada con la función que la vio nacer, con los requisitos, estándares y procesos de certificación propios del mundo académico universitario y la formación profesional como un subsistema reconocido por la ley de Educación Argentina. La propuesta actual del Establecimiento Educativo denominado Escuela Universitaria de Oficios, creado por el Honorable Consejo Superior de la UNLP mediante la disposición 315/25 cuenta con una propuesta formativa de carácter bimodal que permite sostener cursadas que integran las aulas y talleres ubicados en el predio de la EUO en el Edificio de la Secretaría de Políticas Sociales y las aulas extendidas sostenidas a partir de encuentros sincrónicos que cursan las distintas propuestas en condiciones de regularidad o modalidad libre a partir de cursos/materias que se integran en cuatro tecnicaturas vinculadas a la gastronomía, la fabricación de muebles, el mantenimiento de edificios públicos y la fabricación de ropa de trabajo. Estas cuatro líneas formativas se completan con una segunda fase productiva denominada Centro de Servicios en el cual egresados/as y docentes realizan productos de las cuatro líneas mencionadas.

La Escuela Universitaria de Oficios es el dispositivo institucional de la UNLP que brinda una propuesta educativa para quienes se encuentran interesados/as en formarse profesionalmente en oficios a partir de una currícula que permite una doble validación, como curso de formación profesional y como asignatura de una malla curricular que integra tecnicaturas reconocidas por el sistema universitario.

Nuestra política nos llevó a ofrecer saberes y capacitaciones alternativas a un colectivo social que crece de a miles por año. El último relevamiento anual sumó más de 40.000 personas formándose en estas capacidades en nuestra universidad pública. La figura de las diplomaturas es en este sentido una apuesta a la consolidación de saberes que son necesarios para llevar adelante las políticas públicas que recuperan roles y conocimientos que tienen las mujeres y los hombres que pueblan las barriadas de nuestra región y requieren del desarrollo de contenidos situados que mejoren y fortalezcan los conocimientos que tienen sobre el acompañamiento a la producción del hábitat, el desarrollo de estrategias en el marco de la economía social, popular y solidaria, entre otros temas relevantes de la agenda social.

En esa línea, desde el Consejo Social de la UNLP construimos, equipamos y pusimos en marcha una fábrica gestionada por cooperativas de carpinteros y cartoneros junto a la UNLP, acompañada por la CICBA y el CONICET, para la producción resultante de materiales reciclados en la recolección.

5- La construcción e integración de redes sociales con los distintos actores institucionales formales y no formales de nuestra región, nuestra consolidación como ámbito de debate e instrumento de acción colectiva y la multiplicación de vínculos activos y productivos con los distintos espacios de educación superior y ciencia en la región y el mundo, consolidando una agenda de intercambio orientada a la convergencia de necesidades concretas para alcanzar los objetivos trazados conforman un núcleo de actividades que debe consolidarse y crecer y que se ponen en valor en estas circunstancias críticas. La cohesión social es la amalgama de sus instituciones y de sus organizaciones en general.

La UNLP consolidó importantes redes de vinculación en su región como el Consejo Social, creado en 2010, el Consejo Consultivo de Instituciones de la Comunidad, el Consejo Consultivo de Colegios Profesionales y el Consejo Consultivo Empresario, además de vínculos estrechos con organizaciones de Derechos Humanos, de la Tercera Edad y de Organizaciones de Base, así como con las diversas Redes Interuniversitarias dependientes del CIN (Consejo Interuniversitario Nacional). Trabaja articulada con los gobiernos locales, provinciales y nacional y también con otros países de América Latina y el mundo. En la macroregión sus vínculos y participación crecen en redes de universidades como el Grupo Montevideo, UDUAL (Unión de Universidades de América Latina) y Macrouniversidades. En el mundo, interactúa en el campo académico y científico con numerosas universidades en proyectos de intercambio de estudiantes, docentes y científicos e investigaciones comunes, manteniendo su visión integradora en la convergencia de

saberes que consoliden su compromiso con el fortalecimiento de la agenda social, la ambiental y de desarrollo soberano. También con diversos países a través de sus Agencias de Cooperación Internacional.

Hoy la agenda propone una convergencia de las tecnologías y la presencialidad para reconfigurar la agenda universitaria mundial. Por lo pronto, nosotros vamos en esa dirección.

También el crecimiento de los servicios a los estudiantes que ayuden a su integración armónica a la vida universitaria y su sostenimiento, la continuidad del plan de obras y equipamientos, el mejoramiento constante de los sistemas de administración y finanzas, los beneficios, estabilidad y acompañamiento a la comunidad trabajadora docente y Nodocente, la atención especial a las identidades de género autopercibidas, los derechos humanos y en su contexto, la discapacidad y la importancia creciente social, académica y científica de comprender holísticamente a la salud, así como cada una de las actividades que nos transforma en una institución activa y en crecimiento sostenido, son fundamentales en nuestra agenda que se acentúa en las actuales circunstancias.

Todas estas son condiciones que reunimos para asumir con más fuerza la responsabilidad máxima de ser una institución comprometida en su presente y en su futuro con la construcción de oportunidades para nuestra gente y de alternativas de progreso para nuestra Patria.

El modelo centenario de la Reforma Universitaria tal como la vivimos hoy, promueve un conjunto de principios y condiciones que nos definen como Institución. Es un proceso en constante evolución acompañando las demandas de una sociedad que también evoluciona vertiginosamente, más allá de la pandemia. Cada momento de nuestra historia se configura en un escenario distintivo y cada escenario ordena las prioridades de ese proceso según las circunstancias que alinean nuestras más profundas convicciones con el tiempo que nos toca vivir. Comprender estas condiciones es nuestra oportunidad de ser realmente útiles al progreso de nuestra sociedad.

Nuestro Proyecto Institucional reafirma nuestros principios y consolida con fundamentos sólidos su defensa, dándole al debate general el respaldo necesario para poder afrontar un presente desafiante y crítico e imaginar responsablemente un futuro deseado, con la certeza que estamos respaldados por la mirada atenta y lúcida de nuestra sociedad y nuestros pares, que nos alerta sobre cada intento de desvirtuar nuestra esencia y fundamenta las aristas más sutiles que nos permiten avanzar en la construcción de una universidad comprometida con su historia y con una Comunidad que la reclama. Ese debe ser nuestro compromiso, cortar la maleza que nos enreda, lastima y demora, y avanzar, siempre avanzar.

Algunas cifras orientativas de la evolución de la UNLP desde el inicio de su Plan Estratégico en 2004

En 16 de los 18 rankings mundiales que aparecieron en la web en el 2024 /2025, la UNLP fue ubicada 2^a. en la Argentina, entre las 10/20 más importantes en América Latina y el Caribe de las hasta 4.000 universidades registradas en el subcontinente y entre las 500/600 más importantes en el mundo entre las 32.000 universidades registradas. En los otros dos rankings la ubican primera en Argentina, uno 2^a y otro 4^a en América Latina y 281 y 315 en el mundo.

En el ranking de impacto de la producción científica a julio de 2025 medida en citas a la producción de sus investigadores, la UNLP, con 1.970.971 citas⁵, se ubica 1^a en Argentina, 6^a en América Latina y el Caribe, y 285 en el mundo, sobre un total de 6.054 instituciones de educación superior (de un universo de 32.000) que cumplieron con la condición mínima y básica de superar las 1.000 citas en toda la universidad.

⁵ El Ranking Google Académico de Transparencia actualizado semestralmente en el mundo, mide la cantidad de citas a los artículos de los investigadores más importantes de cada universidad descartando los 20 primeros y contando las citas de los segundos 290. Es decir, del 21 al 310. Este sistema favorece a las instituciones de menor producción y de comunidades científicas reducidas. La UNLP suma en julio del 2025 unos 6.722 investigadores con perfiles en el Google Académico y sus primeros veinte -que no se consideran en el ranking- suman 2.332.763 citas, cifra superior a las 1.970.971 citas que suman los 290 que les siguen. Y la UNLP reúne entre todos sus investigadores 6.784.961 citas.

La UNLP cuenta con 17 facultades y cinco colegios (una escuela inicial y primaria y cuatro bachilleratos con anexos barriales con orientación laboral). Dicta 165 carreras de grado y 241 carreras de posgrado -el 93% acreditadas, y un 7% en proceso de acreditación:- 34 doctorados, 75 maestrías, y 132 especializaciones.

La UNLP contaba con unos 40.000 integrantes -estudiantes y trabajadores docentes y Nodocentes- en el período normalizador democrático de 1984. En marzo del 2025 ronda los 221.881 discriminados en 5.000 estudiantes de educación inicial, primaria y secundaria; 137.000 estudiantes de pregrado y grado, 17.000 estudiantes de carreras de posgrado, 13.000 estudiantes de cursos de posgrado, 20.000 estudiantes de cursos alternativos a la formación de grado en unidades académicas y Presidencia, 7.500 estudiantes en las trayectorias de formación profesional en oficios, 3.322 Nodocentes, 15.659 docentes y 3.400 preuniversitarios.

La UNLP pasó de 4.097 graduados en el año 2004 a 6.738 graduados en el grado en 2024. Proyecta, con las medidas en marcha, llegar a los 10.000 graduados anuales en los próximos 5 años sin crecer en cargos docentes sino reforzando el salario por una mayor carga horaria por ejemplo de quienes se sumen al Programa de Promoción del Rendimiento Académico y el Egreso -PRAE-. La tasa ingreso-egreso en los últimos años ha oscilado entre un 20 y un 30% según cómo se la mida. Aspiramos a mejorar sistemáticamente esa relación, para que llegue al menos a un 50% en el período expuesto.

Además, contamos con un acumulado de 20.464 graduados/as en trayectos de formación profesional en oficios certificados por nuestra universidad

Por su parte, la educación formal alternativa acuñada como una propuesta pensada desde la extensión, que era inorgánica e incipiente hace diez años, hoy suma un acumulado de 36.000 estudiantes en diferentes propuestas de conocimientos no convencionales.

Las redes institucionales microregionales de la UNLP integran 500 instituciones de la Sociedad Civil y organizaciones de base nucleadas en Consejos Consultivos y el Consejo Social. El trabajo en red es cotidiano y creciente.

El sistema científico tecnológico de la UNLP comprende 156 Laboratorios, Centros e Institutos de Investigación y 50 Unidades independientes que concentran unos 7.000 investigadores y becarios que acreditan unos 750 proyectos de investigación por año y producen más de 5.000 publicaciones indexadas (27 Institutos comparten la dependencia con el CONICET y 35 con el CICBA).

Desde que pusimos en marcha el Plan Estratégico de la UNLP en el año 2004 construimos unos 235.000 m² y recuperamos, restauramos y pusimos en condiciones 170.000 m² de los 290.000 que existían hasta ese momento (81% de m² nuevos y 60% de m² reacondicionados).

Se construyeron y recuperaron aulas, laboratorios, bibliotecas, facultades enteras, colegios y anexos y numerosas infraestructuras especiales: un planetario, un centro de convenciones y eventos para 4.000 personas, un hotel escuela universitario para 84 personas (42 habitaciones, auditorio y aulas), un Centro de Arte y hasta un Banco.

En el área de la salud: un hospital odontológico escuela con 200 sillones (más 70 sillones externos), un hospital médico integrado de prácticas y simulaciones totalmente robotizado, un hospital escuela de psicología, un hospital escuela de fonoaudiología, un hospital escuela para grandes y pequeños animales, cuatro bioterios grandes y medianos, una unidad de producción social de medicamentos y otra de vacunas, un laboratorio de análisis clínicos gratuitos y una unidad de producción de anteojos gratuitos.

En el área académica, científica y tecnológica; un centro de posgrado de 60 aulas y auditorios que complementan las instalaciones de cada unidad académica, un establecimiento educativo denominado Escuela Universitaria de Oficios, centros de innovación tecnológica con unidades de producción de alimentos deshidratados (con deshidratadoras de 3 toneladas diarias de legumbres, hortalizas y frutas), articulada con frigoríficos y con el cinturón hortícola de la región, con una capacidad de producir 150.000 raciones diarias. Una biofábrica de fertilizantes y pesticidas orgánicos, de viviendas sociales, de medicamentos, de vacunas y de celdas y baterías de litio. Con el departamento de Diseño de la Facultad de Artes, estamos desarrollando una fábrica de envases que permita reducir los costos de lo producido en nuestras fábricas: frascos, jeringas, atomizadores, rollos de nylon para envasar al vacío los alimentos, etc.

En el área vivienda además de la fabricación de distintos modelos de viviendas prefabricadas y muebles y el desarrollo de impresoras 3D para viviendas de hormigón; un albergue estudiantil de 200 habitaciones individuales y dependencias, un barrio de 72 viviendas para Nodocentes. Estamos dando los primeros pasos para construir un barrio de 100 viviendas para docentes y un barrio de viviendas con alquiler social de 1.000 unidades para estudiantes del interior que crece anualmente en alojamiento para 100 estudiantes.

En el área de la comunicación: un set de cine, uno de televisión, un canal de aire y dos radios.

Además, la Universidad cuenta con 17 museos y 23 bibliotecas, con una larga tradición de excelencia de calidad en productos, servicios y patrimonio.

Los servicios estudiantiles sumaron en el año 2004, la reapertura después de 30 años, del Comedor Universitario con turnos al mediodía y viandas nocturnas y de fin de semana con menús opcionales vegetarianos y para celíacos, al que asisten hasta 10.000 estudiantes diarios. Es gratuito para el estudiante de escasos recursos y con un costo subsidiado desde un 60% para el resto.

Como mencionamos, también sumamos el Albergue Universitario para 200 estudiantes sin recursos (habitaciones individuales con calefacción centralizada), que no podrían acceder a los estudios universitarios sin la asistencia total de nuestra universidad pública. Disponen de las cuatro comidas diarias, bicicleta, salas de estudio, informatizadas, recreación y canchas y espacios de deportes, SUM, atención médica, psicológica y social. El requisito de ingreso son sus dificultades económicas extremas y el de permanencia es acreditar la aprobación del 14% de las materias de su carrera por año. Se recibe el 90% de los ingresantes en las más diversas disciplinas.

Pusimos en marcha una línea de micros universitarios de 4 unidades, denominada "Rondín Universitario" que une el centro de la ciudad con la puerta de las 17 facultades y 4 colegios urbanos de la UNLP. También un Tren Universitario, recuperando 9 km de vías existentes y construyendo 10 paradores que contribuyen con el transporte público de universitarios y de toda la sociedad, uniendo la estación central de 1 y 44 con el Hospital San Juan de Dios, pasando por varias Facultades y el Hospital Policlínico. Ya firmamos un convenio con el Ministerio de Transporte para ampliar en 5 km más con 4 paradores el recorrido original, pasando por Gambier y llegando a Los Hornos. También contamos con dos rondines de "Ecobus" (pequeños micros eléctricos urbanos gratuitos que funcionan con baterías de Litio) que recorren la zona de El Bosque y entregamos anualmente centenares de bicicletas estudiantiles en comodato hasta el final de la carrera. Ya llevamos entregadas más de 5.000.

Las otras becas estudiantiles que se suman a las del comedor, del albergue y de transporte (de investigación, de experiencia laboral, de ayuda económica, para estudiantes inquilinos, para estudiantes con hijas /os, para acceder a una PC, para una mejor conectividad, para acceder a una bicicleta, para estudiantes con alguna discapacidad, para estudiantes liberados) se multiplican en forma permanente en monto y número.

Participamos en la redacción y fuimos la única universidad que gestionó para todos la Ley del Boleto Estudiantil en la provincia de Buenos Aires (Nº14.735). Con una fuerte participación estudiantil, en múltiples marchas y acciones, conseguimos la aprobación unánime en ambas cámaras de la Legislatura Bonaerense. El 16 de septiembre de 2016, día del 40 aniversario de "La Noche de los Lápices"⁶ (hecho luctuoso en épocas

⁶ La denominada "Noche de los Lápices" formó parte del plan sistemático de exterminio efectuado por la última dictadura cívico-militar, tal como lo demostraron sentencias judiciales e investigaciones académicas que dieran sustento a la Resolución 1048/15 producida por la Presidencia de la UNLP a partir de las contribuciones de su Secretaría de Derechos Humanos. Esas producciones dan cuenta de la persecución iniciada a fines de 1975 con el asesinato de Ricardo Arturo "Patulo" Rave, dirigente de la UES de La Plata; y de los secuestros y desapariciones forzadas de estudiantes secundarios -en su mayoría con militancia política y estudiantil- perpetrados durante septiembre de 1976. La conquista del gobierno democrático y la realización del Juicio a las Juntas posibilitaron visibilizar este hecho cuyo sentido político fue profundizándose a lo largo de los años en torno a las reivindicaciones del Boleto Estudiantil Secundario. En 2011 se sancionó la Ley provincial 10.671 que establece la fecha del 16 de septiembre como el "Día de los Derechos del Estudiante Secundario"; y más recientemente, en 2015 con la activa participación de la UNLP, se sancionó la Ley provincial 14.735 de Boleto Especial Educativo, que establece su gratuidad para estudiantes de todos los niveles del sistema educativo reglamentada con el Decreto 863/2016. Para ampliar ver <https://drive.google.com/drive/folders/1JxLpyNt6lUMCd12Y5sOPf6XeZxuavm2o?usp=sharing>

de la dictadura cívico-militar donde una decena de estudiantes secundarios -la mayoría de la UNLP- fue torturado y muerto por luchar y reclamar el boleto estudiantil) el transporte público urbano empezó a recoger estudiantes universitarios con 45 pasajes mensuales gratuitos y la totalidad de los estudiantes de educación primaria y secundaria de toda la Provincia y de otras universidades en forma gratuita.

También fuimos la única Universidad que gestionó en forma constante hasta conseguir su sanción y promulgación la Ley Nacional 27.204 de reforma de la vieja Ley de Educación Superior 24.521/95 a partir de la cual reafirmó la autonomía universitaria y se garantizó el ingreso irrestricto y la gratuidad de los estudios universitarios en todo el territorio nacional. La Ley fue sancionada el 28 de octubre y promulgada el 9 de noviembre de 2015.

Repasando lo que enunciamos, en acuerdo con el Movimiento Estudiantil, en 2024 empezamos a construir la "Ciudad Universitaria" un complejo de 1.000 departamentos en bloques de 24 unidades en planta baja y dos pisos más terraza con sala de estudios, lavadero y solario, para 5.000 estudiantes que mediante "alquileres sociales" determinados por el Consejo Superior de la UNLP, influye en el precio del alquiler para estudiantes en toda la región y facilita el acceso y la permanencia fundamentalmente de los estudiantes del interior. Este año construimos el primer bloque para 100 estudiantes y licitamos el segundo bloque idéntico e iremos escalando todos los años con nuevas etapas.

Cada uno de estos pasos hacia la consolidación de nuestro modelo de universidad pública, complementan el trabajo contundente de nuestro sistema académico, de extensión y de investigación y transferencia fuertemente articulado con la Comisión de Investigaciones Científicas de la PBA y con el CONICET, que nos posicionan entre las Universidades más destacadas del país, el continente y el mundo, marcando una vocación que incorpora al proceso de producción y transferencia de conocimientos, la producción propia, administrada y articulada.

El modelo centenario de la Reforma Universitaria tal como la vivimos hoy, promueve un conjunto de principios y condiciones que nos definen como Institución, pero es un proceso en constante evolución acompañando las demandas de una sociedad que también evoluciona vertiginosamente.

Cada momento de nuestra historia se configura en un escenario distintivo y cada escenario establece las prioridades de ese proceso según las circunstancias que ordenan nuestras más profundas convicciones con el tiempo que nos toca vivir. Comprender estas condiciones es nuestra oportunidad de ser realmente útiles al progreso de nuestra sociedad.

Nuestro Proyecto Institucional reafirma nuestros principios y consolida con fundamentos sólidos su defensa, dándole al debate general el respaldo necesario para poder afrontar un presente desafiante y crítico e imaginar responsablemente un futuro deseado, con la certeza que estamos respaldados por la mirada atenta y lúcida de nuestra sociedad y nuestros pares, que nos alerta sobre cada intento de desvirtuar nuestra esencia y fundamenta las aristas más sutiles que nos permiten avanzar en la construcción de una universidad comprometida con su historia y con una Comunidad que la necesita y la reclama.

Introducción

Este volumen constituye el tercer libro de la serie “Mesas de Energía de la Universidad Nacional de La Plata”, iniciativa impulsada por la Secretaría de Vinculación e Innovación Tecnológica con el propósito de articular investigación, desarrollo tecnológico y políticas públicas en torno a los recursos energéticos estratégicos de la Argentina.

Tras los volúmenes dedicados al litio y al hidrógeno, este tomo se focaliza en el gas y el petróleo, consolidando las iniciativas de la Mesa de Gas y Petróleo de la UNLP e inaugurando una nueva línea temática dentro de las Mesas de Energía.

El libro reúne diez artículos elaborados por investigadores, docentes y profesionales de diversas facultades, centros e institutos de la UNLP, así como por profesionales formados en sus programas de posgrado vinculados a esta temática.

Los trabajos abordan aspectos como la caracterización de reservorios no convencionales, la adquisición de datos sísmicos, la geofísica aplicada, el análisis petrofísico, y los procesos industriales y químicos asociados al uso y transporte del gas y derivados del petróleo.

Una mirada interdisciplinaria sobre los recursos energéticos

La Mesa de Gas y Petróleo se configura como un espacio de encuentro entre las geociencias, la ingeniería, la química, la informática y la energía ambiental, con el fin de generar conocimiento de dominio público y fortalecer la capacidad nacional para el uso responsable de los recursos energéticos.

Los artículos reunidos en este volumen reflejan esa diversidad de enfoques, combinando investigación básica y aplicada con una clara orientación a la transferencia tecnológica y la formación de recursos humanos especializados.

El denominador común de los trabajos es la innovación metodológica y tecnológica, tanto en la exploración y caracterización de reservorios como en los procesos de transporte y procesamiento de hidrocarburos, incorporando criterios de eficiencia y sostenibilidad ambiental.

Ejes temáticos del volumen

Eje 1: Exploración, geociencias y caracterización de reservorios

Los siete artículos que integran este eje profundizan en la comprensión del subsuelo, las propiedades de las rocas, y las técnicas de adquisición y análisis de datos:

- Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: desarrollo de equipamiento y metodologías en el Laboratorio IEA - FI - UNLP.
- Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: resultados en el Laboratorio IEA - FI - UNLP.
- Caracterización litológica y granulométrica de agentes de sostén recuperados mediante flujos de retorno y su comportamiento en el tiempo en reservorios no convencionales.
- Caracterización petrofísica de la Formación Centenario como formación sumidero en un bloque de cuenca Neuquina.
- Caracterización y análisis de fracturas naturales, área Puesto Touquet, Neuquén, Argentina.
- Geofísica aplicada a la exploración y desarrollo de hidrocarburos: revisión de las tesis de grado y doctorado en la FCAG-UNLP (2005-2024).
- Adquisición de datos sísmicos 3D con nodos y modalidad "Dynamic Slip Sweep" en la Cuenca Neuquina.

Estos aportes, provenientes de laboratorios de la UNLP, empresas y consultoras, conforman el núcleo técnico-científico del volumen, destacando el papel del conocimiento universitario en la exploración moderna y la caracterización precisa de los recursos energéticos.

Eje 2: Procesos tecnológicos y eficiencia energética

Tres artículos amplían el enfoque hacia los procesos industriales, la eficiencia energética y la caracterización de materiales derivados del petróleo:

- ¿Gas natural o gas natural licuado? La huella de carbono del transporte de gas desde Argentina a Brasil.
- Copolímeros fumáricos como modificadores de asfaltos: efecto de la estructura macromolecular sobre las propiedades del ligante.
- Estructura y agregación de asfaltenos de petróleos argentinos.

Estos trabajos abren nuevas líneas de colaboración entre la universidad, la industria y los organismos públicos, orientadas a mejorar la eficiencia y sostenibilidad en toda la cadena de valor energética.

Una Universidad comprometida con la transición energética

La Universidad Nacional de La Plata, a través de sus Mesas de Energía, reafirma su compromiso con el desarrollo de un modelo energético soberano, eficiente y ambientalmente responsable, sustentado en la investigación interdisciplinaria, la innovación tecnológica y la cooperación interinstitucional.

Este libro, junto con los dedicados al litio y al hidrógeno, conforma una trilogía que refleja la capacidad de la UNLP para pensar la energía desde el conocimiento público y con sentido federal.

Autores y afiliaciones institucionales

1. Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: desarrollo de equipamiento y metodologías en el Laboratorio IEA – FI – UNLP.

Leandro N. Bianchi, Pedro I. Lescano, Sebastian A. Alé, Gonzalo Blanco, Carlos Selva.

Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería (CONICET), Centro de Investigaciones Geológicas (CIG-CONICET).

2. Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: resultados en el Laboratorio IEA – FI – UNLP.

Leandro N. Bianchi, Pedro I. Lescano, Sebastian A. Alé, Gonzalo Blanco, Carlos Selva.

Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería (CONICET), Centro de Investigaciones Geológicas (CIG-CONICET).

3. Caracterización litológica y granulométrica de agentes de sostén recuperados mediante flujos de retorno y su comportamiento en el tiempo en reservorios no convencionales.

Juan Ignacio Cresta.

Grupo LCV S.R.L, Buenos Aires, Argentina.

4. Caracterización petrofísica de la Formación Centenario como formación sumidero en un bloque de cuenca Neuquina.

Marcia J. Faviana.

YPF S.A., Neuquén.

5. Caracterización y análisis de fracturas naturales, área Puesto Touquet, Neuquén, Argentina.

Carla Diaz Torra.

Consultora, Argentina.

6. Geofísica aplicada a la exploración y desarrollo de hidrocarburos: revisión de las tesis de grado y doctorado en la FCAG-UNLP (2005–2024).

Federico G. E. Späth y Santiago Perdomo.

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, La Plata, Argentina.

7. Adquisición de datos sísmicos 3D con nodos y modalidad “Dynamic Slip Sweep” en la Cuenca Neuquina.

Ezequiel Valeff, Neptali Requena, Alejandra Galán, Jorge Muñoz, David Silva, Jorge Sanchez.

TECPETROL S.A. y WELLFIELD SERVICES LTDA Buenos Aires, Argentina.

8. ¿Gas natural o gas natural licuado? La huella de carbono del transporte de gas desde Argentina a Brasil.

María Gimena Torres, Gabriel Lorenzo, Germán García Colli.

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina. Centro de Investigación y Desarrollo de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CIDCA), La Plata, Argentina. Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. J. J. Ronco" (CINDECA), La Plata, Argentina.

9. Copolímeros fumáricos como modificadores de asfaltos: efecto de la estructura macromolecular sobre las propiedades del ligante.

María Leticia Bravi Costantino y Tamara Oberti.

Facultad de Ciencias Médicas, UNLP, La Plata, Argentina. Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, CONICET CCT La Plata, La Plata, Argentina.

10. Estructura y agregación de asfaltenos de petróleos argentinos.

Axel D. Toledo, Mauricio F. Erben y Mariana Gerones.

Centro de Química Inorgánica, CEQUINOR (UNLP, CONICET CCT-La Plata), Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.

Francisco Javier Díaz

Secretario de Vinculación e Innovación Tecnológica
Universidad Nacional de La Plata

EJE 1

EXPLORACIÓN, GEOCIENCIAS Y CARACTERIZACIÓN DE RESERVORIOS

Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: desarrollo de equipamiento y metodologías en el Laboratorio IEA – FI – UNLP

Leandro N. Bianchi, Pedro I. Lescano, Sebastian A. Alé,
Gonzalo Blanco y Carlos Selva

Resumen

La caracterización integral de reservorios no convencionales es clave para optimizar las estrategias de explotación de hidrocarburos. En este trabajo se presentan las principales líneas de investigación y el equipamiento desarrollado en el Laboratorio de Innovación Energética y Ambiental (IEA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, orientados al estudio de rocas tipo shale de la Formación Vaca Muerta. Se destacan dos equipos de desarrollo propio para ensayos de tenacidad a la fractura (RTT-A y RTT-C), que permiten obtener parámetros fractomecánicos bajo condiciones que simulan escenarios de fondo de pozo, junto con un interferómetro de baja coherencia para medir rugosidad en superficies fracturadas. Además, se desarrollan metodologías innovadoras para estimar el contenido total de carbono orgánico (TOC) mediante espectroscopía FTIR y fluorescencia de rayos X (XRF), calibradas con análisis Rock-Eval. Estas herramientas integran aspectos mecánicos y geoquímicos para comprender el comportamiento de las rocas shale y optimizar los procesos de fractura hidráulica.

Palabras clave: Vaca Muerta; Fractura hidráulica; Presión de confinamiento; Ensayos de laboratorio; TOC

Abstract

Comprehensive characterization of unconventional reservoirs is key to optimizing hydrocarbon exploitation strategies. This work presents the main research lines and the equipment developed at the Laboratory for Energy and Environmental Innovation (IEA) of the School of Engineering at the National University of La Plata, aimed at studying shale rocks from the Vaca Muerta Formation. Two in-house-developed devices for fracture toughness testing (RTT-A and RTT-C) are highlighted, which enable the determination of fractomechanical parameters under conditions that simulate downhole scenarios, along with a low-coherence interferometer for measuring roughness on fractured surfaces. Additionally, innovative methodologies are being developed to estimate the total organic carbon (TOC) content using FTIR spectroscopy and X-ray fluorescence (XRF), calibrated with Rock-Eval analyses. These tools integrate mechanical and geochemical aspects to better understand the behavior of shale rocks and optimize hydraulic fracturing processes.

Keywords: Vaca Muerta; Hydraulic fracturing; Confining pressure; Laboratory testing; TOC

1. Introducción

Vaca Muerta se ha consolidado como uno de los reservorios no convencionales de tipo shale más relevantes a nivel mundial para la industria del petróleo y gas. Ubicada en Cuenca Neuquina, Argentina, esta formación, constituida principalmente por margas y calizas, constituye una reserva estratégica con un enorme potencial productivo, capaz de transformar el panorama energético nacional. No obstante, la complejidad geológica y operativa de este tipo de reservorios exige una comprensión profunda de sus propiedades y un enfoque multidisciplinario para su aprovechamiento sostenible.

En este contexto, la fractura hidráulica, también conocida como fracking, se ha consolidado como una técnica fundamental para viabilizar la producción en formaciones con baja porosidad y escasa capacidad de flujo [1]. El proceso consiste en inyectar fluidos a alta presión con el objetivo de generar y propagar fracturas en la roca generadora, que permitan el movimiento de petróleo y gas hacia el pozo.

Los fluidos de fractura hidráulica están compuestos en su mayor parte por agua y un agente apuntalante (aproximadamente el 99 % del volumen total). El 1 % restante corresponde a una mezcla de aditivos químicos que optimizan el desempeño del tratamiento. Estos incluyen modificadores de viscosidad, reductores de fricción, biocidas, tensioactivos y ácidos, entre otros, que cumplen funciones específicas como prevenir el crecimiento microbiano, disolver minerales, reducir pérdidas de carga y facilitar la penetración del fluido en la formación [2], [3].

Para lograr una fractura hidráulica efectiva, es indispensable llevar a cabo una evaluación rigurosa de diversos factores petrofísicos, mecánicos, geológicos y geofísicos, ya que estos influyen directamente en el diseño, la ejecución y el rendimiento del tratamiento. Entre los aspectos más relevantes se encuentran la saturación de fluidos (especialmente agua), la composición mineralógica, la orientación de los esfuerzos in situ, la anisotropía de las propiedades mecánicas y la presencia de fracturas naturales en la matriz rocosa. La comprensión detallada de estas variables permite optimizar la geometría de las fracturas inducidas, mejorar la conectividad con el sistema de poros y maximizar el volumen del reservorio estimulado.

Una caracterización integral de estas propiedades no solo mejora la eficiencia del tratamiento, sino que también permite reducir los costos operativos, y minimizar los riesgos geomecánicos y ambientales asociados. Entre estos riesgos se incluyen la reactivación de fallas preexistentes, la migración indeseada de fluidos, el exceso de presión en el pozo y otros efectos adversos que pueden comprometer la integridad del reservorio o la infraestructura de producción. En consecuencia, un diseño de estimulación bien fundamentado permite alcanzar mayores niveles de productividad con menor impacto económico y ambiental.

En este contexto, la fracturabilidad de las rocas emerge como un parámetro clave. Esta propiedad, entre otras, controla el inicio de la fractura hidráulica, la presión necesaria para su propagación y el tamaño del volumen de reservorio estimulado (SRV). Desde el punto de vista mecánico, la fracturabilidad se describe mediante parámetros como la fragilidad y la tenacidad, que reflejan la respuesta de la roca frente a esfuerzos inducidos. Una caracterización precisa de estos parámetros permite diseñar tratamientos de estimulación más eficientes y adaptados a las condiciones particulares de cada formación.

Otro parámetro fundamental en la evaluación de reservorios no convencionales es el contenido total de carbono orgánico (TOC, por sus siglas en inglés), el cual resulta clave para estimar el potencial del reservorio. Un mayor valor de TOC suele asociarse con una mayor capacidad de generación de hidrocarburos [4]. Sin embargo, valores muy elevados de TOC pueden generar comportamientos plásticos en la matriz rocosa, lo que por consecuencia dificulta el desarrollo de la técnica del fracking [5], por lo que su correcta determinación contribuye significativamente a la caracterización del reservorio y a la planificación de estrategias de desarrollo más eficientes.

El laboratorio de Innovación Energética y Ambiental (IEA), perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, fue creado en 2016 con el propósito de resolver problemáticas complejas

del sector industrial y científico mediante un enfoque interdisciplinario. Sus primeras líneas de investigación surgieron a partir de tesis doctorales enfocadas en el tratamiento de aguas de pozo y la recuperación de sistemas de ósmosis inversa, así como en el estudio de fractomecánica de rocas de reservorio, desarrolladas en articulación con empresas del sector privado. El equipo está conformado por profesionales de diversas disciplinas, entre ellas Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Química, Ingeniería Industrial, Ingeniería en Materiales e Ingeniería Electromecánica, además de Geofísica, Geología y Geoquímica, provenientes de la Universidad Nacional de La Plata y del CONICET.

Entre sus principales áreas de trabajo se destacan el tratamiento de aguas y efluentes industriales mediante procesos electroquímicos avanzados, la investigación en geomecánica y fractomecánica aplicada a reservorios no convencionales, el análisis de fallas y causa raíz, estudios de corrosión, caracterización de materiales (SEM-EDS, XRF), y la evaluación de integridad estructural y vida remanente de equipos. Bajo la coordinación del Dr. Gustavo Luis Bianchi, el equipo directivo está integrado por el Dr. Carlos Javier Seijas, la Mg. María Perla Villagarcia, el Lic. Jorge Luis Fasano y el Mg. Carlos Selva, quienes lideran proyectos que combinan investigación aplicada, desarrollo tecnológico y asesoramiento especializado para la industria, fortaleciendo así la vinculación entre el ámbito académico y el productivo.

Con el objetivo de aportar al desarrollo eficiente y sustentable de los recursos no convencionales, en IEA desarrollamos nuevas líneas de investigación y generamos conocimiento aplicado en tecnologías orientadas a la exploración y explotación optimizada de hidrocarburos no convencionales. Estas actividades se llevan a cabo bajo un enfoque interdisciplinario, que integra saberes y metodologías de diversas ramas de la ingeniería (mecánica, química y electrónica), así como de las geociencias, incluyendo geofísica, geoquímica y geología, lo que permite abordar los desafíos tecnológicos desde una perspectiva integral y colaborativa.

En este marco, el presente artículo describe las principales líneas de investigación y desarrollo que actualmente se llevan adelante en el Laboratorio IEA, junto con una descripción del equipamiento disponible, tanto comercial como de desarrollo propio, que constituye la base para la realización de estos estudios.

2. Trabajos de investigación en IEA

Relacionado con lo mencionado previamente sobre la importancia de la fracturabilidad como parámetro clave en el diseño de los tratamientos de estimulación, una de nuestras principales áreas de trabajo es la caracterización mecánica de las rocas. Este enfoque resulta fundamental para predecir con mayor precisión el comportamiento de la fractura hidráulica. En este sentido, realizamos ensayos orientados a la obtención de parámetros fractomecánicos en modo I, tales como la tenacidad a la fractura K_{IC} y el T-stress, bajo condiciones de confinamiento hidráulico de hasta 800 bar y presiones de inyección de hasta 1000 bar [6], [7], [8], recreando así escenarios semejantes a los de fondo de pozo.

Asimismo, investigamos los mecanismos de fractura subcrítica, incluyendo procesos como la corrosión bajo tensión y fatiga. En particular, el fenómeno de corrosión bajo tensión resulta de la interacción química entre los aditivos del fluido de fractura y la roca, pudiendo reducir su resistencia y facilitar la propagación de las fisuras [9].

Otra de nuestras líneas de trabajo se centra en la identificación de relaciones cuantitativas entre la tenacidad a la fractura, la rugosidad de las superficies fracturadas y las condiciones de confinamiento mecánico, especialmente en rocas tipo shale. Estos estudios experimentales se complementan con la extrapolación de resultados a modelos numéricos de gran escala, con el fin de mejorar la precisión y capacidad predictiva de las simulaciones, contribuyendo así al diseño más eficiente de los tratamientos de estimulación.

Paralelamente, tomamos metodologías innovadoras recientemente desarrolladas en esta casa de estudios para la estimación TOC mediante espectroscopía FTIR, a partir de calibraciones estadísticas con datos de fluorescencia de rayos X (XRF) y un número limitado de análisis Rock-Eval. En esta línea, también

investigamos posibles correlaciones entre propiedades fractomecánicas y parámetros geoquímicos, especialmente vinculados a la caracterización de materia orgánica y arcillas, con el fin de identificar mecanismos que expliquen su influencia en la resistencia a la fractura del material.

3. Obtención y procesamiento de muestra

En el Laboratorio IEA contamos con una amplia experiencia en trabajos de campo y laboratorio orientados a la obtención y caracterización de muestras provenientes de reservorios no convencionales.

3.1 Extracción de muestra

Anualmente, se realizan viajes de campo con el objetivo de extraer muestras destinadas a futuros ensayos mecánicos y de caracterización química, mineralógica y orgánica. Los afloramientos de la Formación Vaca Muerta se encuentran en la provincia de Neuquén, particularmente en dos zonas ampliamente estudiadas: Mina La Carrascosa, situada en las cercanías de la ciudad de Chos Malal, y Los Catutos, en la localidad homónima. Una vez que se reciben las muestras en el laboratorio IEA, se procede a preparar las mismas para la caracterización mecánica y orgánica.

En estas campañas se llevan a cabo dos tareas principales: el levantamiento de perfiles sedimentológicos y la recolección de muestras. La extracción de las muestras se realiza en bloques frescos, cuyas dimensiones aproximadas son de $400 \times 400 \times 300$ mm, en función de los objetivos del estudio. Cada bloque es identificado mediante un código interno que hace referencia a su posición estratigráfica.

Para facilitar el posterior mecanizado en laboratorio y optimizar el transporte, los bloques se cortan en campo utilizando una sierra ingletadora equipada con un disco de corte diamantado. Finalmente, los bloques son envueltos en bolsas protectoras para evitar daños o contaminación durante su traslado.

3.2 Preparación de muestra



3.2.1 Preparación de plugs

Una vez en el laboratorio IEA, se procede a la mecanización de plugs que serán ensayados. El primer paso consiste en, con un taladro de banco con una broca diamantada (ver Figura 1), obtener probetas de aproximadamente 1,5" (38.1mm) de diámetro y 40 mm de altura.

Figura 1: Extracción de muestras cilíndricas o plugs desde bloque de afloramiento.

Una vez obtenida la preforma, se procede a realizar la entalla, cuya función es actuar como concentrador de tensiones, determinando el frente de fisura.



Esta entalla se realiza manualmente utilizando sierras metálicas de 0,4 mm de espesor hasta alcanzar la profundidad deseada. Finalmente, con hilo diamantado, se profundiza aproximadamente 1 mm más, asegurando en todo momento que el frente de entalla mantenga una geometría recta (ver Figura 2).

Figura 2: Terminación de entalla con hilo diamantado.

Se debe destacar que la profundidad de la entalla (a) y el ángulo de esta (γ) respecto del plano de laminación constituyen parámetros geométricos ajustables, que pueden modificarse según los objetivos específicos del ensayo experimental que se desee realizar.

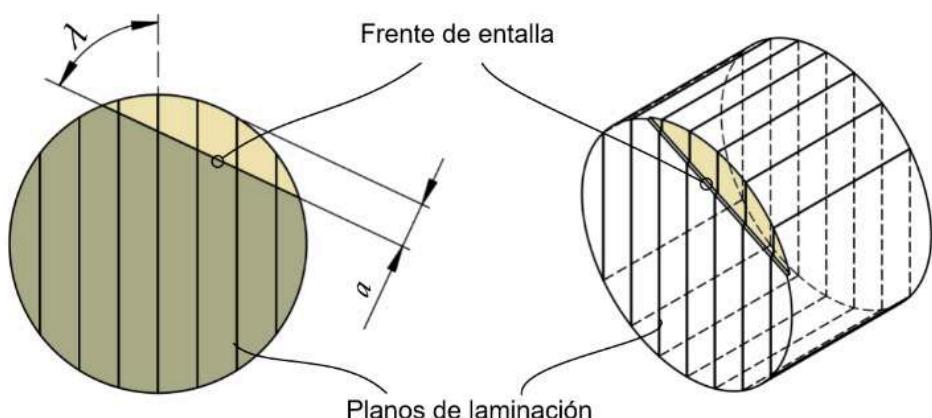


Figura 3: Esquema de la entalla y ángulo relativo al plano de laminación.

3.2.1 Molienda para FTIR

La preparación de muestras para análisis por FTIR comienza con un proceso de molienda. Inicialmente, se muelen entre 10 y 20 g de muestra en un mortero de porcelana hasta obtener un material que pase por un tamiz N° 60. Luego, la muestra se homogeniza y se toma una alícuota de aproximadamente 0,5 g, la cual se muela en un mortero de ágata hasta obtener un polvo muy fino, adecuado para el análisis espectroscópico.

4. Equipamiento

Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo la caracterización mecánica en el Laboratorio IEA contamos con equipamiento específico para la realización de ensayos experimentales. Para la obtención del K_{IC} y otros parámetros fractomecánicos disponemos de dos equipos de fractura, de desarrollo propio, denominados Rock Toughness Testing machine (RTT): uno diseñado para ensayos a presión atmosférica (RTT-A), y otro denominado RTT-C que posibilita la realización de ensayo bajo condiciones de presión similares a las de fondo de pozo, de hasta 800 bares. Asimismo, se encuentra en proceso de diseño una máquina de doble torsión para la determinación del K_{IS} (subcrítico). Finalmente, el laboratorio dispone de un instrumento también de desarrollo propio, especializado para la medición de la rugosidad de las superficies de fractura, lo que permite complementar el análisis de las propiedades mecánicas con la caracterización topográfica del plano fracturado.

4.1 RTT-A

El Rock Toughness Testing machine es un dispositivo de fractura que permite aplicar una fuerza impulsora mediante un fluido hidráulico en la entalla prefabricada del plug previamente mecanizado.

Para ello, la probeta es contenida en lo que se denomina cámara interna. Observando la Figura 4, el recinto de compresión está formado conjuntamente entre la probeta (4), O-rings (2), un anillo central de cierre geométrico (3), un anillo de fijación (1) y la cámara propiamente dicha (5).

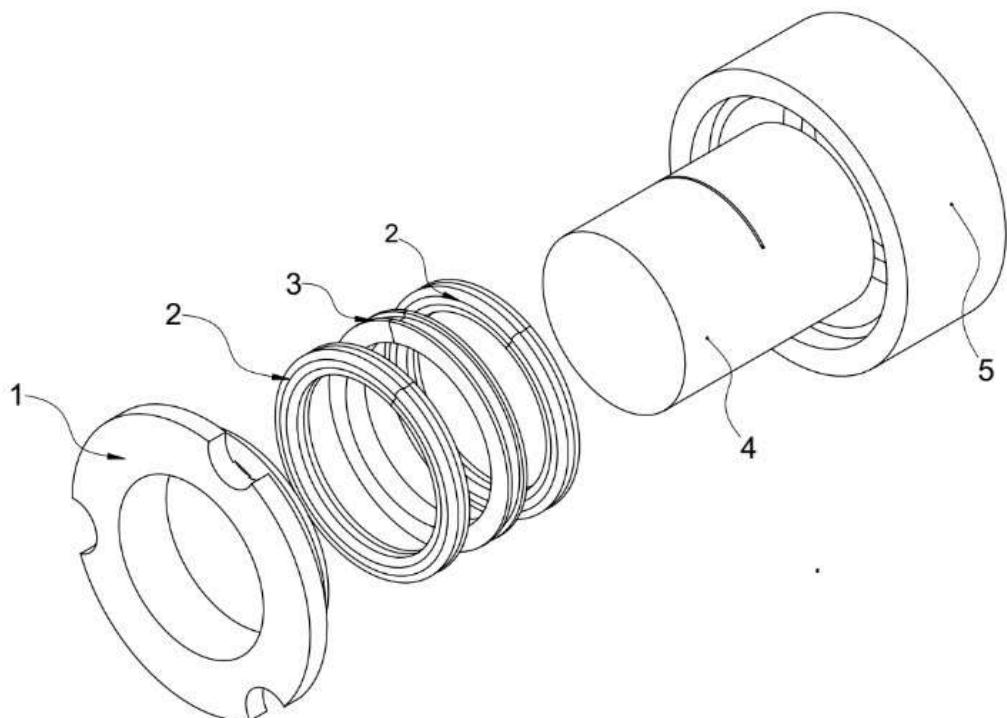


Figura 4: Disposición geométrica de una probeta colocada en la cámara interna. Partes principales: **1)** Anillo de fijación, **2)** O rings, **3)** Anillo central, **4)** Plug o probeta tipo RBSN (Round bar straight-notch), **5)** Cuerpo de cámara interna. Extraído de [6].

En la Figura 5 se puede observar la disposición final de la probeta, que en este caso fue recubierta con laca para evitar la interacción entre el fluido de fractura y la roca.



Figura 5: Paquete de ensayo formado por un plug y el par de O-rings.

Una vez finalizada la colocación de la probeta, el fluido de fractura se moviliza de manera quasi estática a través de un intensificador de presión (2A en la Figura 6) mediante el giro de la manivela, dirigiéndose hacia la cámara 4A. De esta manera, la presión se transmite a las caras de la entalla, actuando como fuerza impulsora de la fractura. El registro de la presión de rotura permite posteriormente calcular la tenacidad a la fractura (K_{IC}). Además, mediante análisis numérico es posible determinar el T-stress y otros parámetros no singulares asociados al proceso de fractura.

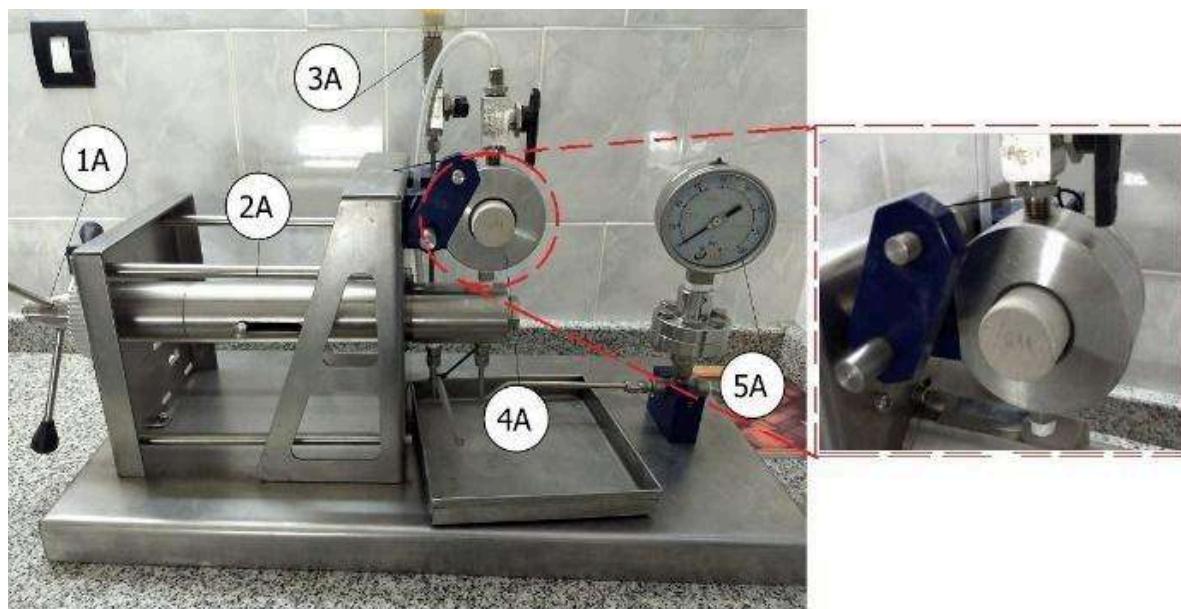


Figura 6: Dispositivo de ensayo de fractura sin confinamiento (RTTC-A). Partes principales: **1A**) Manivela, **2A**) Intensificador de presión, **3A**) permite la alimentación y cierre del circuito de presión, **4A**) Cámara interna, **5A**) Manómetro.

4.2 RTT-C

Como se mencionó anteriormente, el RTTM-C presenta un funcionamiento similar al RTTM-A, pero incorpora la característica innovadora de poder aplicar, además de la presión en la entalla para inducir la fractura, una presión de confinamiento sobre la probeta, permitiendo así reproducir condiciones de carga similares a las de un reservorio de hidrocarburos.

Para entender su funcionamiento, se seguirá el esquema de la Figura 7, y la vista general de la máquina en la Figura 8.

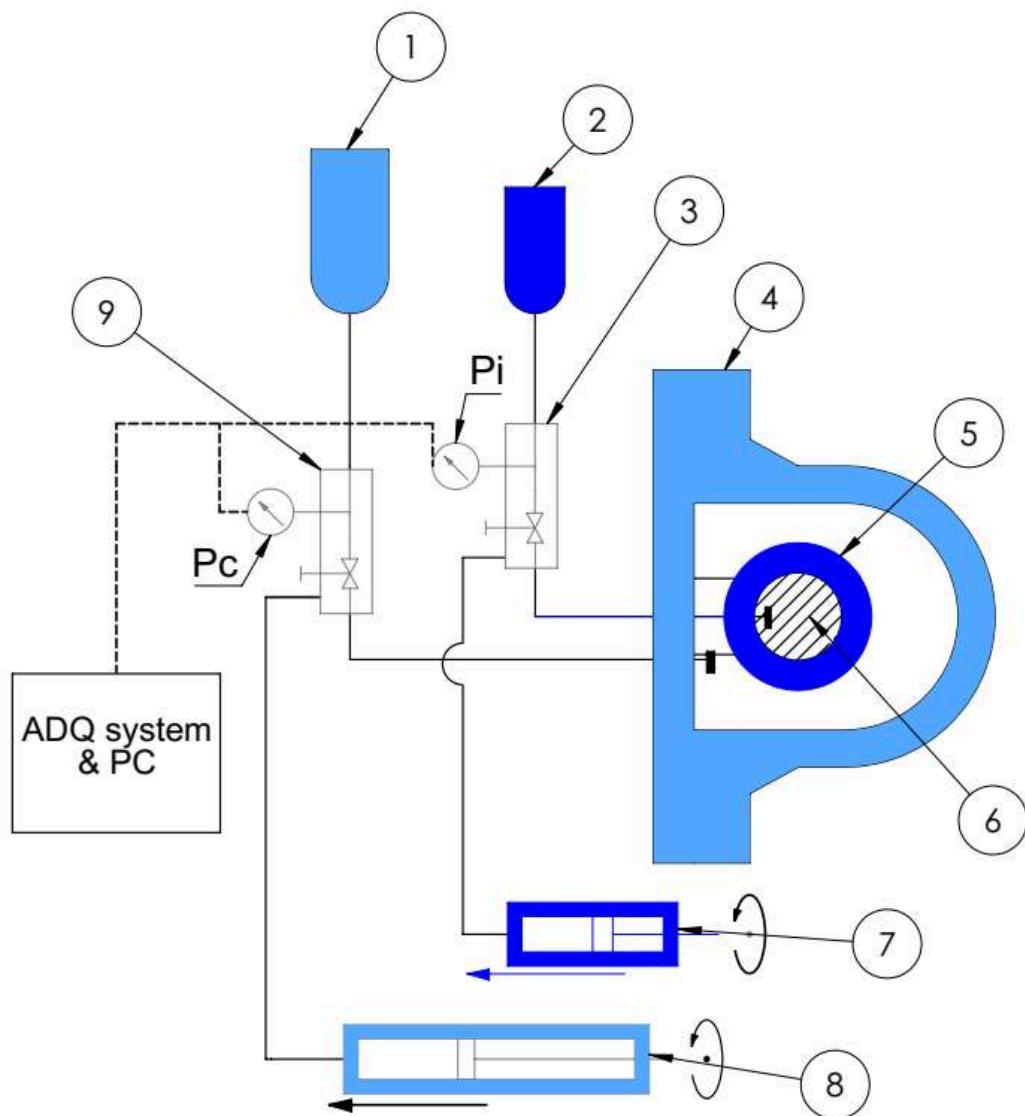


Figura 7: Esquema de RTT-C. Partes principales: (1-2) Depósitos de fluidos interiores y exteriores, (3-9) Colectores y transductor de presión P_i y P_c , (4) Recipiente de presión de confinamiento (P_c), (5) Cámara de presión interior, (6) Muestra de roca, (7-8) Intensificador de presión para fluidos interiores y exteriores.

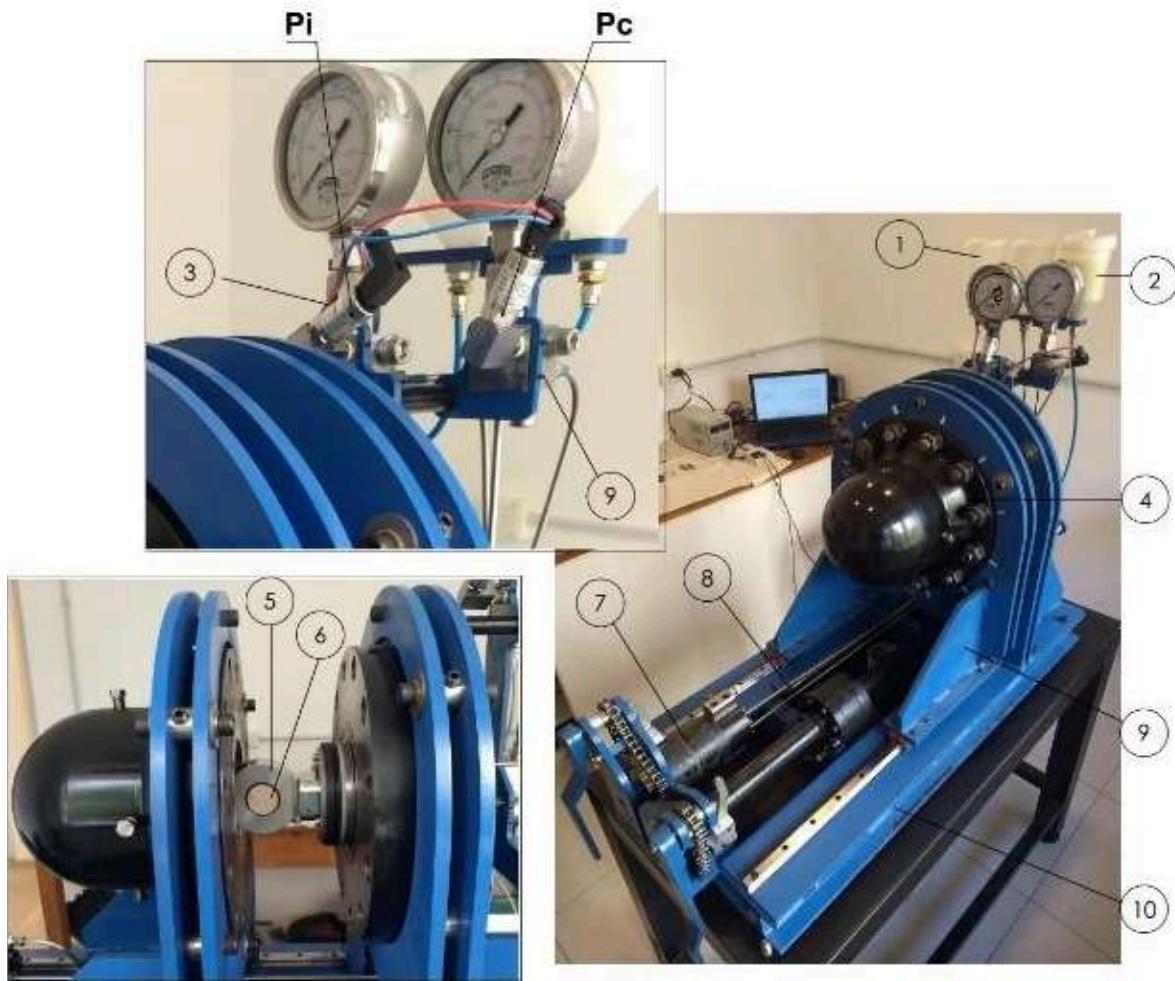


Figura 8: Esquema de RTT-C. Partes principales: (1-2) Depósitos de fluidos interiores y exteriores, (3-9) Colectores y transductor de presión P_i y P_c , (4) Cámara externa (P_c), (5) Cámara de presión interior, (6) Muestra de roca, (7-8) Intensificador de presión para fluidos interiores y exteriores, (10) Base fija, (11) Base Móvil.

La cámara interna (5-6) se mantiene sin cambios geométricos respecto de la utilizada en el RTT-A (Figura 4). La Figura 9 señala esquemáticamente la interacción de las presiones sobre la probeta confinada. Para inducir la presión de confinamiento P_c , un fluido distinto al de fractura transmite la presión hacia el interior de la cámara externa (4).

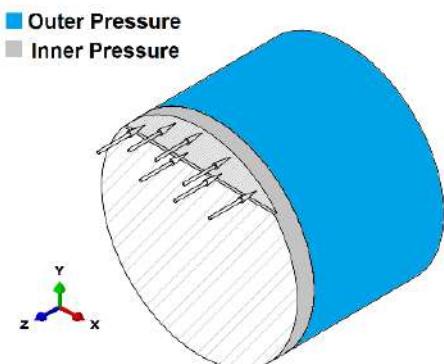


Figura 9: Esquema de la condición de carga de la probeta en ensayo de fractura con confinamiento.

En su posición de cierre, la porción semiesférica de la cámara externa es fijada a la tapa plana mediante 12 bulones roscados. El sellado de la cámara externa se logra mediante un anillo polimérico en conjunto con O-rings.

Finalmente, las cámaras internas y externas se llenan con los fluidos de fractura y de confinamiento, respectivamente. Una vez completado este proceso, el desplazamiento de los intensificadores (7-8) eleva las presiones en ambas cámaras hasta alcanzar el valor de confinamiento preestablecido. Alcanzada esta condición, la presión interna se incrementa conforme al comportamiento definido por el modo de fractura seleccionado (ver 4.2.2).

4.2.1 Instrumentación

Actualmente, el equipo cuenta con una segunda cámara interna que reemplaza a la previamente presentada, diseñada para incorporar instrumentación que permita la adquisición de datos adicionales en tiempo real durante los ensayos. Esta modificación incluye la colocación de galgas extensiométricas distribuidas de manera circunferencial sobre la superficie de la probeta, con el objetivo de medir localmente la deformación y la apertura de la entalla a medida que progresó el ensayo.

Para lograr estas mediciones, fue necesario rediseñar la cámara interna (Figura 10), permitiendo no solo la instalación segura de las galgas, sino también el ordenamiento y la conducción de los cables desde el interior de la cámara presurizada (capaz de operar hasta 1000 bar) hacia el exterior, donde la presión es atmosférica. Esta adecuación requirió implementar soluciones de sellado específicas y pasajes estancos que garanticen la integridad del sistema bajo condiciones de alta presión.

Adicionalmente, la probeta es instrumentada para medir la velocidad de propagación de la fractura inestable durante el ensayo, incorporando sensores específicos para tal fin.

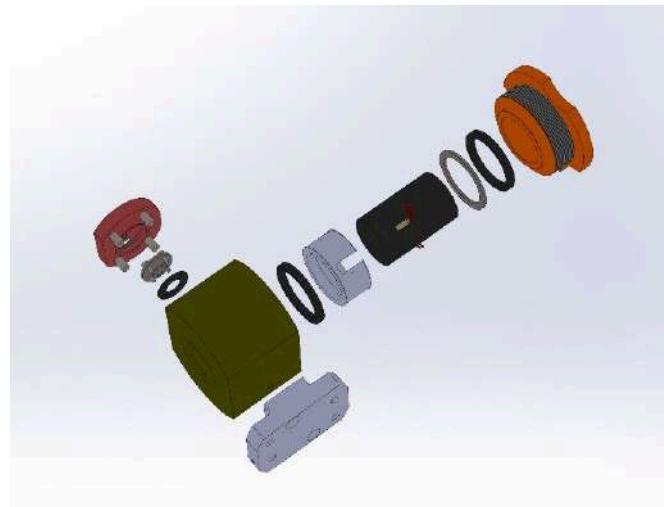


Figura 10: Despiece en 3D de la cámara interna modificada.

La implementación de esta instrumentación incrementa notablemente la precisión en la estimación de parámetros fractomecánicos, incluyendo el K_{IC} , el T-stress, parámetros no singulares asociados a la distribución de tensiones y el G_{IC} (energía crítica de fractura en modo I). En conjunto, estos datos permiten mejorar los modelos predictivos del comportamiento de fractura en rocas tipo shale, optimizando tanto el diseño experimental como la extrapolación de resultados a condiciones reales de campo.

Por otro lado, el dispositivo de ensayo RTT-C se encuentra equipado e instrumentado para realizar dos tipos de ensayo de forma autónoma, controlados a través de una interfaz hombre-máquina (HMI, por sus siglas en inglés Human-Machine Interface), con excepción de las operaciones de colocación de la probeta y purga de los sistemas hidráulicos.

El equipo cuenta con manómetros analógicos y digitales, siendo estos últimos utilizados para generar las curvas de presión en función del tiempo. Además, se encuentra instrumentado con motores de paso que regulan el avance de los pistones, cuyo desplazamiento está comandado por la variación de presión, permitiendo ajustar con precisión la velocidad de ambos intensificadores de presión.

Esto último permite realizar de manera autónoma los dos modos de ensayo, los cuales se describen en detalle en la siguiente subsección.

4.2.2 Modos de ensayo

Como se mencionó anteriormente, el equipo cuenta con dos modos de ensayo de fractura. En la interfaz, el usuario puede seleccionar qué ensayo desea realizar.

La primera modalidad corresponde al ensayo de fractura convencional. En este procedimiento, una vez que la presión interna (P_i) y de confinamiento (P_c) alcanzan el valor preestablecido, la primera se incrementa de manera gradual hasta inducir la fractura inestable de la probeta. Este fenómeno se identifica por la comunicación súbita entre ambas cámaras, lo que provoca la igualación inmediata de las presiones.

En la Figura 11 se muestra un diagrama de presiones de este tipo de ensayo de fractura.

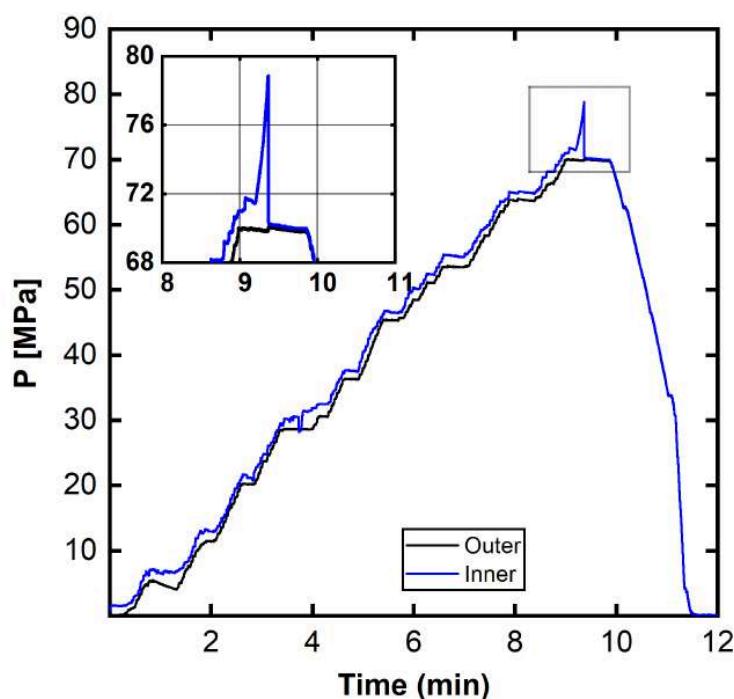


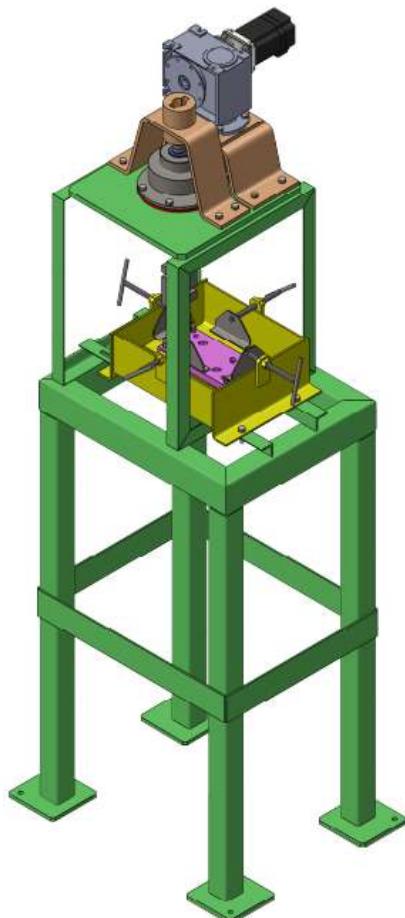
Figura 11: Diagrama de carga y rotura de un ensayo de fractura típico.

El segundo modo de ensayo corresponde al ciclado de carga. Este procedimiento inicia con el mismo proceso de presurización descrito en la sección 4.2. Una vez alcanzada la presión de confinamiento deseada, la presión interna se incrementa y posteriormente se reduce hasta el valor de confinamiento, generando ciclos de carga sobre la probeta. Este método permite analizar el comportamiento subcrítico de la fractura y obtener parámetros fractomecánicos asociados al efecto del ciclado de carga. Tanto la frecuencia como el número de ciclos pueden ajustarse en función de los objetivos del ensayo.

4.3 Máquina de doble torsión

El ensayo de doble torsión está diseñado para estudiar la propagación de fracturas en materiales frágiles, donde el avance de las grietas ocurre de manera acelerada. Particularmente, este dispositivo permite analizar fenómenos asociados a la fractura subcrítica, incluyendo la corrosión bajo tensión, un proceso mediante el cual un fluido corrosivo reduce la tenacidad a la fractura del material. Este mecanismo es

reconocido como uno de los principales responsables de la propagación lenta de fracturas en materiales geológicos. El dispositivo descrito es actualmente el único capaz de determinar el índice de fractura subcrítica de manera controlada en laboratorio.



El dispositivo experimental desarrollado (Figura 12) para la realización de ensayos de doble torsión consta de tres sistemas principales: el sistema de carga, el sistema de medición y el sistema contenedor.

Figura 12: Diseño de máquina de doble torsión.

El sistema de carga está compuesto por un motor de tipo paso a paso, una varilla roscada y una tuerca de presión que transforma el movimiento rotatorio en desplazamiento lineal. A este conjunto se le acopla una caja reductora que permite disminuir la velocidad de avance de la carga aplicada. La carga es transmitida a la probeta mediante un componente específico del sistema, el cual posee dos punzones ubicados en su extremo inferior. Estos punzones ejercen presión en puntos opuestos de la entalla de la probeta durante el ensayo.

El sistema de medición está constituido por una celda de carga tipo "S", que permite registrar la fuerza ejercida sobre la muestra, y un sistema de transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT, por sus siglas en inglés), que mide con precisión el desplazamiento inducido durante el ensayo.

El sistema contenedor consiste en un recipiente diseñado para alojar la probeta. Este posee cuatro puntos de apoyo donde se sitúa la muestra. Además, el recipiente permite la inclusión de distintos tipos de fluidos, algunos de los cuales pueden tener carácter corrosivo, según el objetivo experimental.

Las probetas utilizadas presentan una geometría rectangular y poseen una entalla preformada en el centro de uno de sus extremos. Dado que el ensayo de doble torsión no se encuentra estandarizado, no existe una dimensión fija para las probetas. Sin embargo, es común emplear muestras de 120 mm de largo, 60 mm de ancho y 5 mm de espesor.

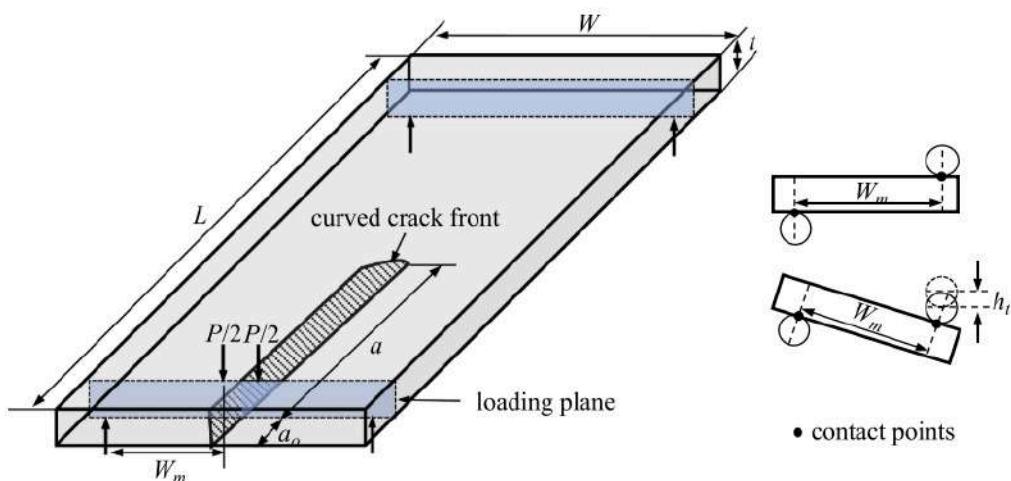
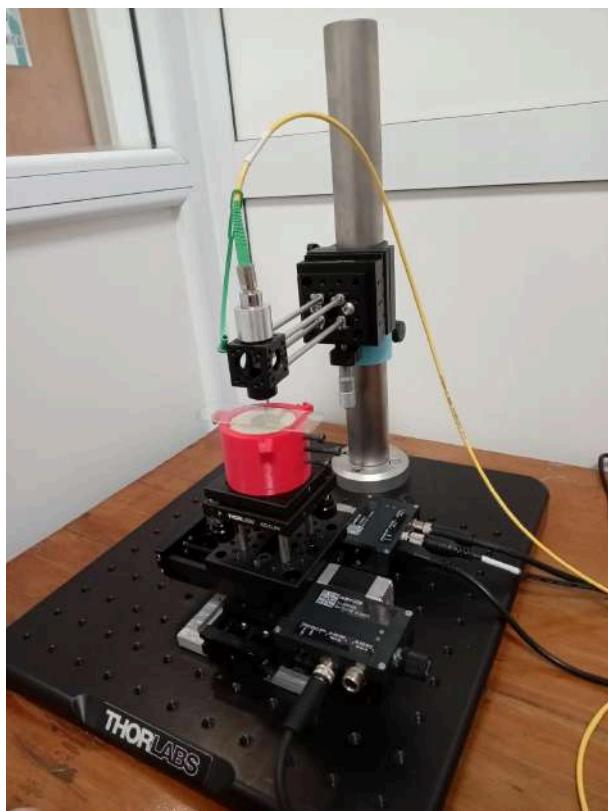


Figura 13: Probeta de ensayo de doble torsión. Fuente: [10].

Durante el plan de ensayos propuesto se emplearán probetas de roca de distintas composiciones químicas, incluyendo litologías carbonáticas, silíceas y ricas en materia orgánica. Estas muestras serán colocadas sobre los puntos de apoyo dentro del recipiente contenedor, en el cual se introducirán fluidos con distintas propiedades, incluyendo algunos con capacidad corrosiva.

4.4 Interferómetro

Un interferómetro es un dispositivo óptico de alta precisión que permite medir distancias y formas superficiales a escala micrométrica o nanométrica mediante el principio de interferencia de la luz. En particular, el interferómetro de baja coherencia (LCI) utiliza una fuente de luz de amplio espectro que se divide en dos trayectorias: una dirigida hacia la muestra y otra hacia una superficie de referencia. Al recombinarse las reflexiones provenientes de ambos caminos, se genera un patrón de interferencia que permite determinar con gran exactitud la distancia relativa entre la muestra y la referencia, punto por punto.



Este equipo (Figura 14) fue desarrollado conjuntamente por la IEA de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y el Grupo de Fotónica Aplicada de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional, con el objetivo de disponer de un instrumento de bajo costo capaz de medir con alta precisión la rugosidad de las superficies de fractura (plugs ensayados a fractura), cumpliendo con los requerimientos técnicos necesarios. Los ensayos ópticos realizados con este sistema alcanzan una resolución axial de 5 μm y una resolución lateral en el plano XY de hasta 4 μm .

Figura 14: Interferómetro.

4.5 Estimación del TOC

Típicamente, el contenido total de carbono orgánico (TOC) se determina mediante el método de pirólisis combinado con análisis por cromatografía gaseosa [11]. La configuración más utilizada para este fin es el equipo Rock-Eval 6, desarrollado por Vinci Technologies, que constituye el estándar de referencia en el mercado para este tipo de mediciones.

Si bien esta metodología presenta importantes ventajas en términos de exactitud y reproducibilidad, también implica costos elevados, es destructiva y requiere instrumental delicado [12], [13], [14]. Actualmente, en esta casa de estudios se está desarrollando un método que permitiría estimar el valor de TOC mediante herramientas estadísticas a partir de mediciones de XRF y FTIR, las cuales ofrecen ventajas significativas respecto a la pirólisis en términos de tiempo y costos. Este enfoque se complementa con un número reducido de mediciones mediante Rock-Eval, cuya función sería calibrar el método propuesto.

4.5.1 FTIR

Es una sigla en inglés que designa a un Espectrofotómetro de luz infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés). Este equipo puede emplearse para una amplia variedad de caracterizaciones de sustancias, siempre que presenten enlaces de carácter covalente, lo que le confiere un campo de aplicación sumamente extenso. En nuestro caso particular, se utiliza para obtener datos que permitan caracterizar la fracción orgánica de las rocas y, posteriormente, estimar el contenido total de carbono orgánico (TOC).

4.5.2 XRF

Se refiere a X-Rays fluorescence o en español fluorescencia de rayos X. Es un equipo que permite realizar un análisis multielemental de todo elemento más pesado que el sodio de manera rápida, expeditiva y de forma no destructiva. El equipo acepta muestra sólida en cualquier presentación sea polvo, cutting o roca. En nuestro caso, su función principal es generar datos para alimentar el modelo estadístico que utilizamos en la estimación del contenido total de carbono orgánico (TOC).

Conclusiones

El Laboratorio de Innovación Energética y Ambiental (IEA) ha desarrollado e implementado una serie de herramientas experimentales y metodologías que fortalecen el estudio integral de los reservorios no convencionales, particularmente en la Formación Vaca Muerta.

En el ámbito de la caracterización mecánica, se diseñaron y construyeron equipos específicos (RTT-A y RTT-C) que permiten determinar parámetros fractomecánicos críticos, como el K_{IC} , el T-stress y otros parámetros no singulares, bajo condiciones de carga que reproducen escenarios reales de fondo de pozo. La incorporación de instrumentación avanzada, como galgas extensométricas y sistemas de adquisición de datos, ha incrementado significativamente la precisión de los ensayos.

En paralelo, se desarrolló un interferómetro de baja coherencia que posibilita la medición de la rugosidad de superficies fracturadas con alta resolución, aportando información complementaria para el análisis del comportamiento mecánico de las rocas.

En el área de caracterización geoquímica, se están implementando metodologías innovadoras para la estimación del TOC mediante técnicas estadísticas y no destructivas (FTIR y XRF), calibradas con un número reducido de mediciones Rock-Eval. Este enfoque ofrece una alternativa de menor costo y mayor eficiencia frente a los métodos convencionales.

En conjunto, estas líneas de trabajo permiten abordar el estudio de los reservorios no convencionales desde una perspectiva interdisciplinaria, integrando geociencias, ingeniería y técnicas avanzadas de laboratorio, con el fin de optimizar las estrategias de exploración y explotación de hidrocarburos no convencionales.

Referencias

- [1] M. J. Economides and K. G. Nolte, "Reservoir Stimulation," 2000, Wiley.
- [2] Y. Nie, G. Zhang, Y. Xing, and S. Li, "Influence of Water-Oil Saturation on the Fracture Process Zone: A Modified Dugdale-Barenblatt Model," *Energies* 2018, Vol. 11, Page 2882, vol. 11, no. 11, p. 2882, Oct. 2018, doi: 10.3390/EN11112882.
- [3] R. T. Ewy, "Shale swelling/shrinkage and water content change due to imposed suction and due to direct brine contact," *Acta Geotech.*, vol. 9, no. 5, pp. 869–886, Oct. 2014, doi: 10.1007/S11440-013-0297-5/METRICS.
- [4] T. Wang, B. Xu, T. Song, Y. Chen, L. Deng, and H. Du, "Total Organic Carbon Logging Evaluation of Shale Hydrocarbon Source Rocks in the Shan 1 Section of the Sulige Gas Field, Ordos Basin, China," *Processes*, vol. 11, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.3390/pr11113214.
- [5] H. Li, B. Lai, and S. Lin, "Shale Mechanical Properties Influence Factors Overview and Experimental Investigation on Water Content Effects," *Journal of Sustainable Energy Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 275–298, May 2016, doi: 10.7569/jsee.2016.629501.
- [6] F. J. Antinao Fuentealba, J. J. Romero, J. L. Otegui, and G. L. Bianchi, "Device for rock fracture toughness testing under hydrocarbon reservoir conditions," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 109, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102718.
- [7] F. J. Antinao Fuentealba, L. N. Bianchi, J. L. Otegui, and G. L. Bianchi, "Accurate experimental determination of rock fracture toughness under simulated reservoir confining pressures," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 120, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.tafmec.2022.103425.
- [8] F. J. Antinao Fuentealba, G. L. Bianchi, A. Sánchez Camus, and R. Ramos, "Fracture toughness experiments in shale rocks, effect of fluid chemistry on K_{Ic} ," 10th Hydrocarbon Exploration and Development Congress (CONEXPLO), pp. 1–17, 2018.
- [9] Y. Zhao, L. Zhang, J. Liao, W. Wang, Q. Liu, and L. Tang, "Experimental Study of Fracture Toughness and Subcritical Crack Growth of Three Rocks under Different Environments," *International Journal of Geomechanics*, vol. 20, no. 8, p. 04020128, Aug. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001779.
- [10] K. P. Marimuthu, K. Lee, F. Rickhey, and H. Lee, "Enhancement of the analytical solution for double torsion test using extended finite element techniques," *Ceram Int*, vol. 45, no. 7, pp. 9548–9559, May 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.10.013.
- [11] F. Behar, V. Beaumont, and H. L. De, "Technologie Rock-Eval 6: Performances et développements," *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 111–134, 2001, doi: 10.2516/OGST:2001013.
- [12] B. S. Hart and A. S. Steen, "Programmed pyrolysis (Rock-Eval) data and shale paleoenvironmental analyses: A review," *Interpretation*, vol. 3, no. 1, pp. SH41–SH58, Feb. 2015, doi: 10.1190/INT-2014-0168.1.
- [13] J. R. Disnar, B. Guillet, D. Keravis, C. Di-Giovanni, and D. Sebag, "Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: Scope and limitations," *Org Geochem*, vol. 34, no. 3, pp. 327–343, 2003, doi: 10.1016/S0146-6380(02)00239-5.
- [14] B. Hazra, C. Ö. Karacan, D. M. Tiwari, P. K. Singh, and A. K. Singh, "Insights from Rock-Eval analysis on the influence of sample weight on hydrocarbon generation from Lower Permian organic matter rich rocks, West Bokaro basin, India," *Mar Pet Geol*, vol. 106, pp. 160–170, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.MARPETGEO.2019.05.006.

AUTORES

Leandro N. Bianchi

:: Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
leandro.bianchi@ing.unlp.edu.ar

Pedro I. Lescano

:: Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Sebastian A. Alé

:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
:: Centro de Investigaciones Geológicas (CIG-CONICET), Facultad de Naturales de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Gonzalo Blanco

:: Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Carlos Selva

:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Innovación para la caracterización de reservorios no convencionales: resultados en el Laboratorio IEA – FI – UNLP

Leandro N. Bianchi, Pedro I. Lescano, Sebastian A. Alé,
Gonzalo Blanco y Carlos Selva

Resumen

La caracterización integral de reservorios no convencionales es clave para optimizar las estrategias de explotación de hidrocarburos. En este trabajo se presentan los principales resultados de investigación del Laboratorio de Innovación Energética y Ambiental (IEA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, orientados al estudio de rocas tipo shale de la Formación Vaca Muerta.

Los ensayos experimentales y las simulaciones numéricas realizadas evidencian que la presión de confinamiento y el tipo de fluido de fractura influyen de forma significativa en el comportamiento fractomecánico de las rocas.

Palabras clave: **Vaca Muerta;** Fractura hidráulica; Presión de confinamiento; Ensayos de laboratorio;

Abstract

Comprehensive characterization of unconventional reservoirs is essential for optimizing hydrocarbon exploitation strategies. This work presents the main research findings of the Energy and Environmental Innovation Laboratory (IEA) of the Faculty of Engineering, National University of La Plata, focused on the study of shale-type rocks from the Vaca Muerta Formation.

The experimental tests and numerical simulations carried out demonstrate that confining pressure is a determining factor in the fracture-mechanical behavior of the rock. Likewise, the type of fracturing fluid also exerts a significant influence on this behavior.

Keywords: **Vaca Muerta;** Hydraulic fracturing; Confining pressure; Laboratory testing;

1. Introducción

El Laboratorio de Innovación Energética y Ambiental (IEA), perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, fue creado en 2016 con el propósito de abordar problemáticas complejas del sector industrial y científico. Las primeras líneas de investigación surgieron a partir de tesis doctorales orientadas al tratamiento de aguas de pozo y a la recuperación de sistemas de ósmosis inversa, así como al estudio de la fractomecánica de rocas de reservorio, en colaboración con empresas del sector privado. El equipo está integrado por profesionales de diversas disciplinas —Ingeniería Electrónica, Mecánica, Química, Industrial, en Materiales y Electromecánica, así como Geofísica, Geología y Geoquímica— pertenecientes tanto a la Universidad Nacional de La Plata como al CONICET.

Entre sus principales áreas de trabajo se encuentran el tratamiento de aguas y efluentes industriales mediante procesos electroquímicos avanzados, la investigación en geomecánica y fractomecánica aplicada a reservorios no convencionales, el análisis de fallas y causa raíz, los estudios de corrosión, la caracterización de materiales (SEM-EDS, XRF) y la evaluación de integridad estructural y vida remanente de equipos. Bajo la coordinación del Dr. Gustavo Luis Bianchi, el equipo directivo —compuesto por el Dr. Carlos Javier Seijas, la Mg. María Perla Villagarcía, el Lic. Jorge Luis Fasano y el Mg. Carlos Selva— lidera proyectos que combinan investigación aplicada, desarrollo tecnológico y asistencia técnica a la industria, fortaleciendo el vínculo entre el ámbito académico y el productivo.

Con el objetivo de contribuir al desarrollo eficiente y sustentable de los recursos no convencionales, el IEA desarrolla nuevas líneas de investigación y genera conocimiento aplicado en tecnologías orientadas a la exploración y explotación optimizada de hidrocarburos no convencionales. Estas actividades se llevan a cabo bajo un enfoque interdisciplinario que integra conocimientos de distintas ramas de la ingeniería y de las geociencias, lo que permite abordar los desafíos tecnológicos desde una perspectiva integral.

En este marco, el presente trabajo presenta los resultados más relevantes obtenidos en el estudio de la tenacidad a la fractura y otros parámetros fractomecánicos de rocas tipo shale de la Formación Vaca Muerta, considerando la influencia de la presión de confinamiento y de la química del fluido de saturación. Asimismo, se incluye el análisis de la zona de proceso de fractura (FPZ) y de la rugosidad de la superficie de fractura, combinando ensayos experimentales con modelos numéricos mediante el método de elementos finitos (FEM), con el fin de aportar criterios para la caracterización mecánica de reservorios no convencionales en condiciones representativas de fondo de pozo.

2. Método experimental

La máquina RTT (Rock Toughness Test) (Figura 1) es un dispositivo de ensayo de tenacidad a la fractura (K_{1C}) experimental diseñado y patentado por el grupo de trabajo perteneciente a IEA. Induce la fractura de una probeta en modo I, utilizando como fuerza impulsora una presión hidráulica aplicada directamente sobre las caras de una entalla preexistente. Simultáneamente, la probeta se encuentra sometida a un estado tensional hidrostático generado por una presión de confinamiento (P_c), lo que permite reproducir condiciones de carga similares a las que se presentan en formaciones de reservorios de hidrocarburos. Esta metodología experimental ha sido validada en publicaciones previas realizadas por el grupo de trabajo [1], [2].

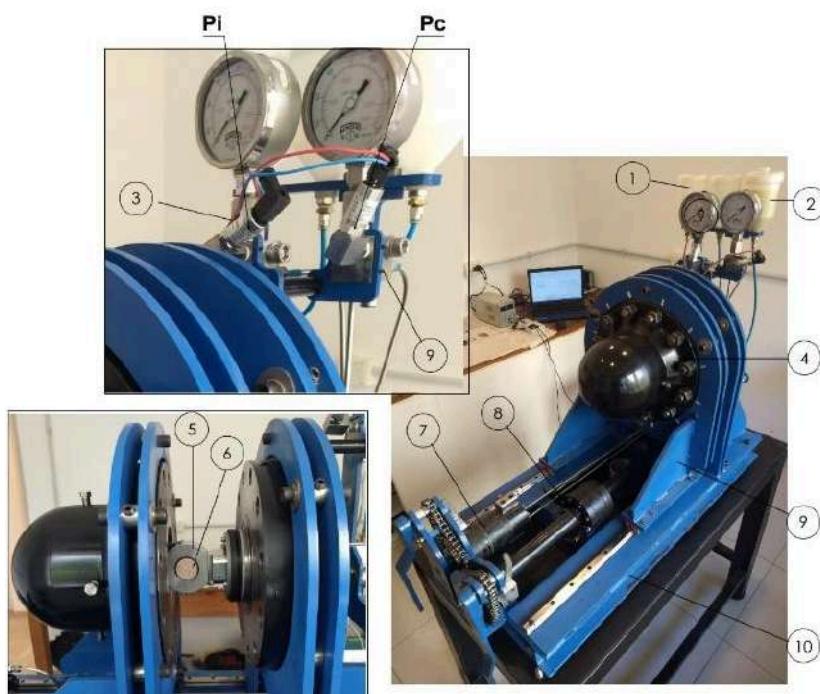


Figura 1: Esquema de RTT. Partes principales: (1-2) Depósitos de fluidos interiores y exteriores, (3-9) Colectores y transductor de presión P_i y P_c , (4) Cámara externa (P_c), (5) Cámara de presión interior, (6) Muestra de roca, (7-8) Intensificador de presión para fluidos interiores y exteriores, (10) Base fija, (11) Base Móvil.

La presión de confinamiento se genera mediante un fluido distinto al de fractura, que es conducido hacia la cámara externa a presión (4), capaz de operar hasta 80 MPa y 90°C. Esta cámara está compuesta por una semiesfera forjada y maquinada, unida a una tapa de cierre plana mediante 12 bulones roscados. El sellado se garantiza mediante un anillo polimérico y O-rings.

La interconexión entre los recipientes de alimentación (1-2), las cámaras interna y externa, las líneas de purga y los sistemas de medición y control se realiza a través de manifolds (3 y 9). Una vez que ambas cámaras han sido llenadas con sus respectivos fluidos, de confinamiento y de fractura, los intensificadores de presión (7-8) incrementan la presión hasta alcanzar el valor preestablecido de P_c . Finalmente, se incrementa la presión interna aplicada en la entalla mediante el intensificador (7) hasta inducir la fractura de la muestra. En la Figura 2 se puede visualizar un diagrama típico de presiones obtenido durante el ensayo de fractura.

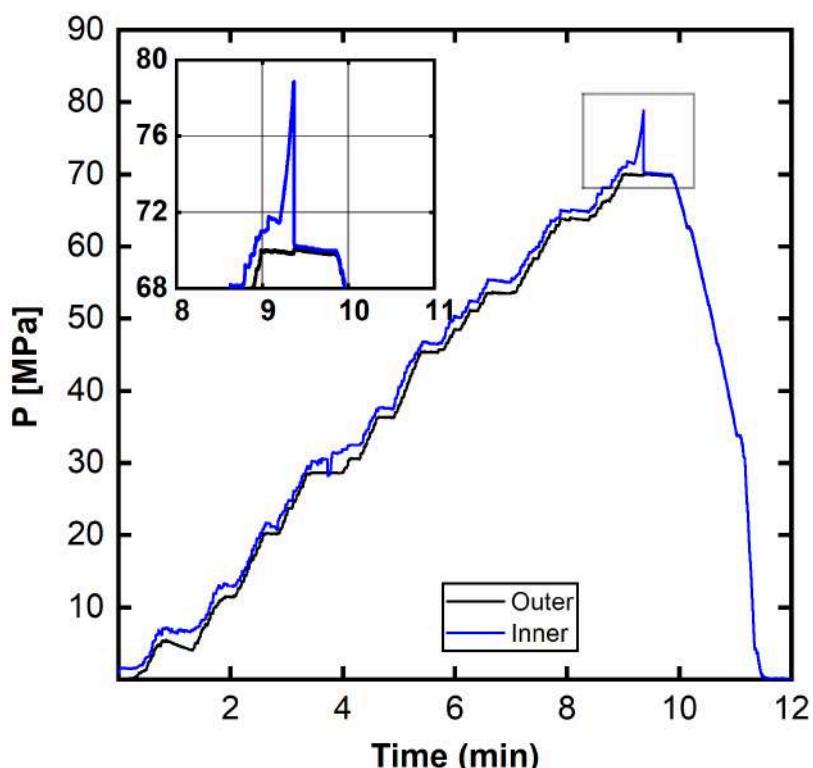


Figura 2: Diagrama de presiones de ensayo de fractura.

2.1 Plugs

Para la determinación de parámetros fractomecánicos en rocas de la Formación Vaca Muerta, se utilizan muestras extraídas durante campañas de campo llevadas a cabo por el Laboratorio de Innovación Energética y Ambiental (IEA). Las muestras fueron obtenidas en forma de bloques frescos, con dimensiones

aproximadas de $400 \times 400 \times 300$ mm, seleccionadas en función de los objetivos específicos del estudio. Posteriormente, dichos bloques fueron mecanizados para obtener probetas del tipo Round bar Straight Notch (RBSN), empleadas en los ensayos experimentales (Figura 3).

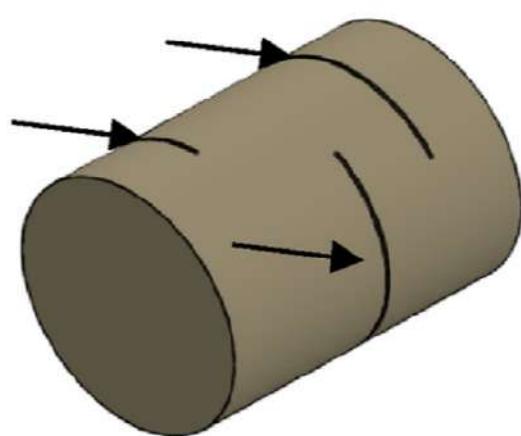


Figura 3: Probeta RBSN con varias entallas.

Las probetas RBSN presentan un diámetro nominal de 38 mm y una longitud de 40 mm. Se mecanizan con entre una y tres entallas por probeta, con una relación de entalla comprendida entre $0,10 < a/D < 0,25$, donde a es la profundidad de la entalla y D el diámetro de la probeta.

Cabe destacar que tanto la profundidad de la entalla (a) como su ángulo (γ) respecto del plano de laminación constituyen parámetros geométricos ajustables, los cuales pueden modificarse según los requerimientos del ensayo experimental a realizar (Figura 4).

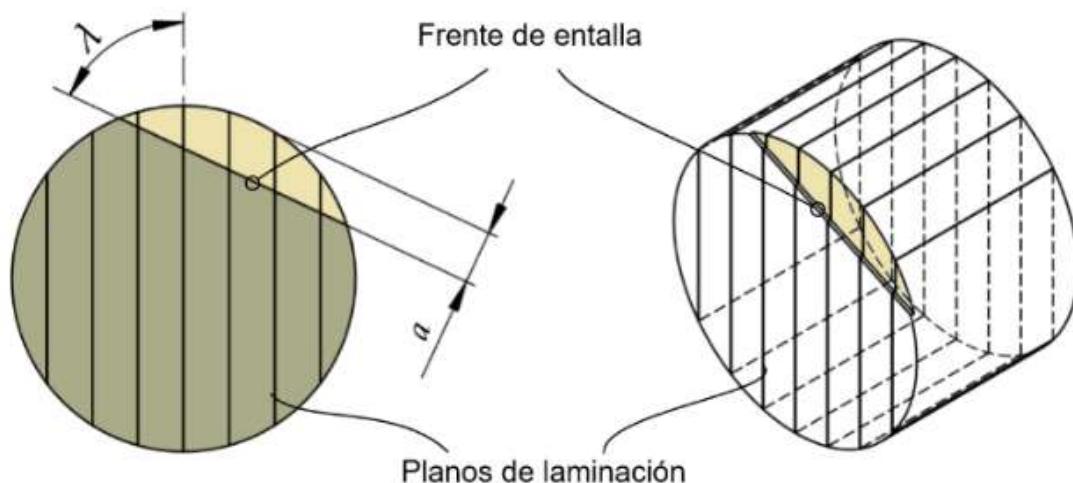


Figura 4: Esquema de la entalla y ángulo relativo al plano de laminación.

2.2 Interacción Plugs-O-rings

Para lograr la aislación adecuada entre la presión interna y la presión de confinamiento, la probeta es contenida en lo que se denomina cámara interna. Observando la Figura 5, el recinto de compresión está formado conjuntamente entre la probeta (4), O-rings (2), un anillo central de cierre geométrico (3), un anillo de fijación (1) y la cámara propiamente dicha (5).

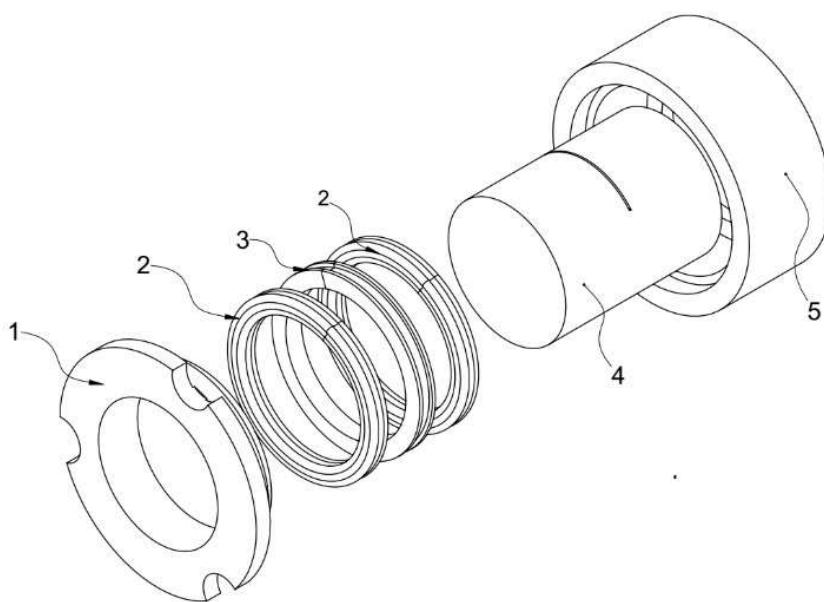


Figura 5: Disposición geométrica de una probeta colocada en la cámara interna. Partes principales: **1)** Anillo de fijación, **2)** O rings, **3)** Anillo central, **4)** Plug o probeta tipo, **5)** Cuerpo de cámara interna. Extraído de [2].

En la Figura 6 se puede observar la disposición final de la probeta, que en este caso fue recubierta con laca para evitar la interacción entre el fluido de fractura y la roca.



Los o-rings actúan como elementos de sellado entre el fluido de fractura y el fluido de confinamiento, evitando su mezcla. Este sellado se logra gracias a la interacción mecánica directa que ejercen sobre las superficies del espécimen, la cual puede, además, influir en el campo de tensiones en la vecindad de la entalla.

Figura 6: Paquete de ensayo formado por un plug y el par de O-rings.

Además, el sistema de sellado mediante o-rings permite mantener presiones diferenciales mediante la compresión del elastómero contra la superficie de la probeta. Esta compresión lateral induce una fuerza radial sobre la superficie externa del espécimen, a la cual se suma la fricción estática distribuida tangencialmente sobre la región de contacto entre el o-ring y el plug (zona roja en la Figura 7). Dicha fricción

actúa como una restricción adicional al desplazamiento axial, pudiendo introducir esfuerzos espurios contrarios a la dirección inducida por la presión interna.

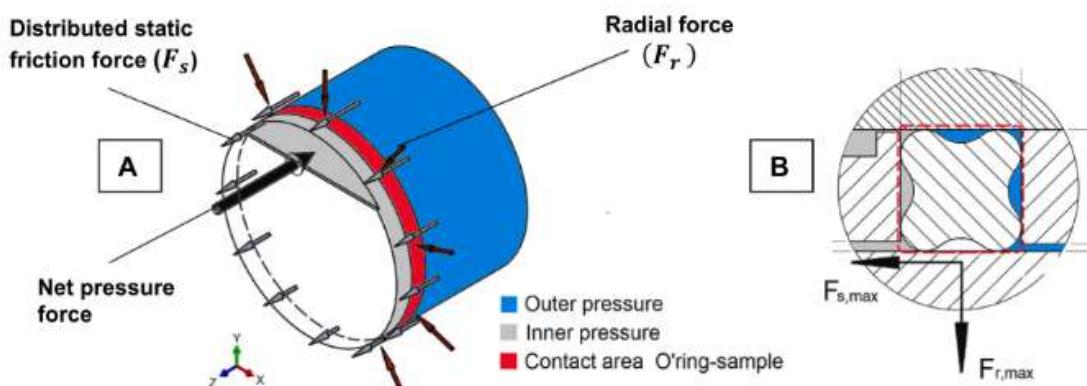


Figura 7: Esquema de distribución de esfuerzos en el área de contacto O-ring - probeta.

Estas contribuciones radial y tangencial no están asociadas directamente al mecanismo de apertura de fisura, por lo que representan una posible fuente de sesgo experimental en la estimación del parámetro de fractura.

En el marco del trabajo presentado en el artículo "Accurate experimental determination of rock fracture toughness under simulated reservoir confining pressure" [2] realizamos un análisis numérico de la influencia de los o-rings sobre el campo de tensiones en la punta de grieta. Considerando condiciones de no deslizamiento del sello y régimen de fricción estática, se observó que las deformaciones inducidas eran puramente elásticas y que su contribución sobre la estimación del factor de intensidad de tensiones (K_I) era inferior al 1%.

2.3 Efecto de múltiples entallas

Una ventaja de este método es que en un plug puede contener múltiples entallas, permitiendo realizar múltiples ensayos por muestra.

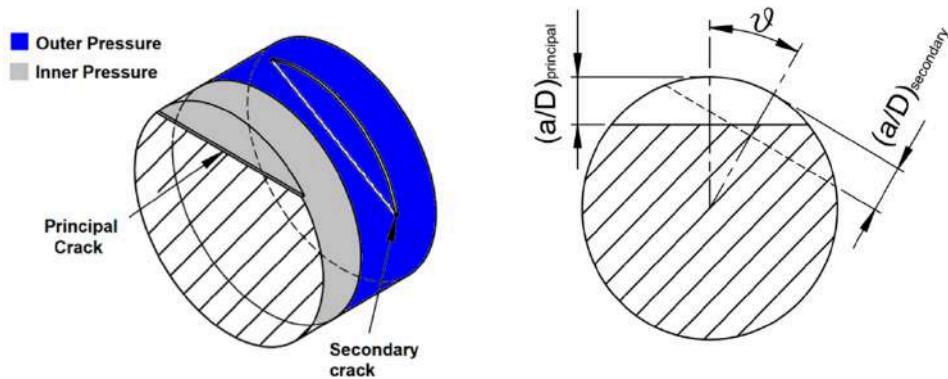


Figura 8: Plug con múltiples entallas.

En trabajos previos [2], se evaluó si la presencia de estas entallas adicionales podía afectar el campo de tensiones en la punta de la fisura principal. Para ello, se modeló el caso mediante FEM, considerando la fisura principal con espesor nulo y las fisuras secundarias con un espesor de 0,05 mm. Se emplearon relaciones de entalla de 0,1 y 0,25, y se analizaron ángulos de 0°, 90° y 180° entre la bisectriz perpendicular de las líneas de frente de la fisura principal y secundaria. Las diferencias máximas obtenidas fueron inferiores al 1 %, por lo que el efecto de las fisuras secundarias puede considerarse despreciable.

3. Simulación Numérica

En el Laboratorio IEA, las investigaciones combinan ensayos experimentales con modelos numéricos basados en el método de elementos finitos (FEM). Estos modelos permiten determinar parámetros fractomecánicos, así como caracterizar el campo de desplazamientos y tensiones durante el ensayo y en el instante previo a la propagación de la fractura, es decir, en el estado crítico.

3.1 Metodología FEM

Abaqus es un software de simulación numérica basado en el método de los elementos finitos (FEM), ampliamente utilizado en el ámbito de la ingeniería para el análisis de problemas estructurales, térmicos y de interacción multifísica. En el presente trabajo, Abaqus se emplea para la generación de modelos tridimensionales de los ensayos experimentales, con el fin de obtener el campo de tensiones resultante y parámetros fractomecánicos.

Una de las principales capacidades del software radica en su aptitud para modelar tanto la iniciación como la propagación de fisuras en sólidos, bajo diversas condiciones de carga y geometrías. En el contexto de análisis estáticos, ya sea en modelos bidimensionales o tridimensionales, el software permite evaluar parámetros clave de la mecánica de la fractura lineal elástica, tales como los factores de intensidad de tensiones K_I y el parámetro T-stress para determinado estado de carga. Estos parámetros son calculados en el software mediante la implementación de la integral-J [3].

El cálculo numérico de la integral-J en Abaqus se basa en los métodos de extensión virtual de la grieta y de integral de dominio, originalmente desarrollados por Parks (1977 [4]) y Shih, Moran y Nakamura (1986 [5]).

Esta metodología reformula la integral de línea original como una integral de volumen o dominio, lo que facilita su implementación en modelos de elementos finitos. En la práctica, Abaqus realiza este cálculo evaluando la integral en una serie de contornos concéntricos que rodean la punta de la grieta, definidos automáticamente en función del mallado tipo spider generado por el usuario.

Durante el posprocesamiento, el software ofrece la posibilidad de calcular los valores de J para cada uno de estos contornos, lo que permite evaluar la convergencia y estabilidad del resultado. Un valor constante de este entre los distintos contornos indica un mallado adecuado y una solución confiable.

Para garantizar una evaluación precisa de la integral- J en el contexto de sharp cracks (entallas de espesor nulo), es fundamental establecer un mallado adecuado en la vecindad de la punta de la fisura. Para ello, se debe emplear una malla tipo spider construida a partir de elementos estructurados y orientados radialmente alrededor de la entalla (como se puede visualizar en la Figura 9), esto permite definir múltiples contornos concéntricos sobre los cuales Abaqus evalúa la integral J .

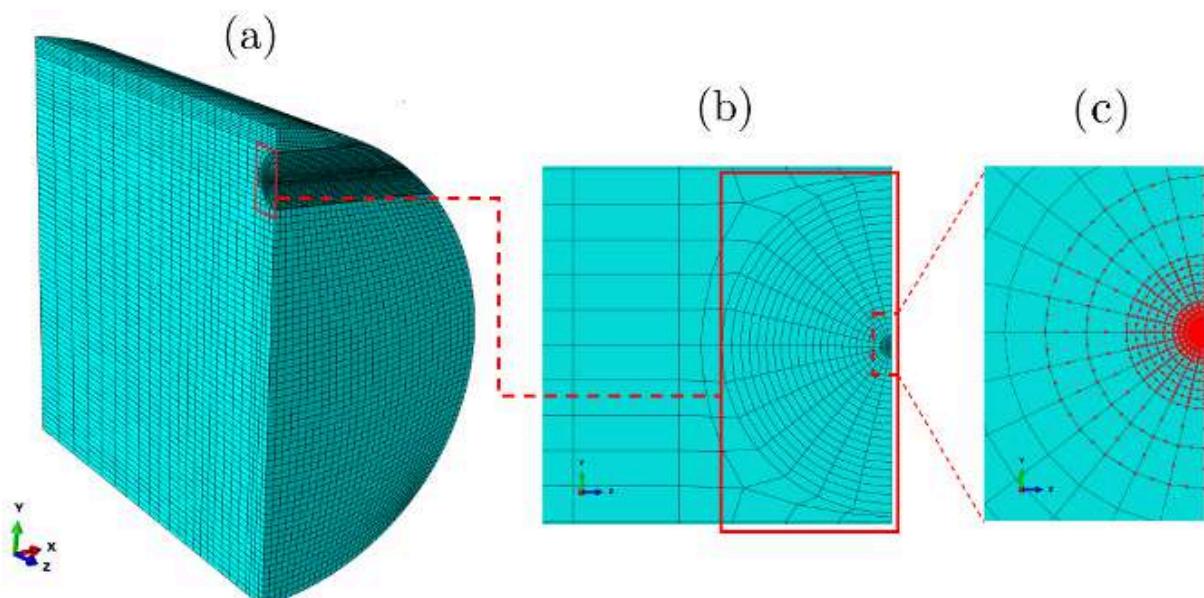


Figura 9: Malla tipo spider. **A)** Modelo tridimensional completo; **B)** Configuración de malla tipo spider; **C)** Contornos de la integral- J .

En los elementos que conforman el primer contorno, es decir, aquellos ubicados inmediatamente en la vecindad de la punta de fisura, se emplean elementos de tipo cuña (Figura 10). Este elemento es isoparamétrico de quince nodos, con uno de sus lados colapsado geométricamente, haciendo coincidir los nodos extremos sobre el frente de fisura. Adicionalmente, los nodos intermedios de los lados conectados a la punta se posicionan a una distancia equivalente a un cuarto de la longitud del lado, lo que permite reproducir adecuadamente el comportamiento singular del campo de deformaciones. Esta configuración de malla genera una singularidad del tipo $1/r^{0.5}$, coherente con la solución teórica esperada bajo el marco de la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM).

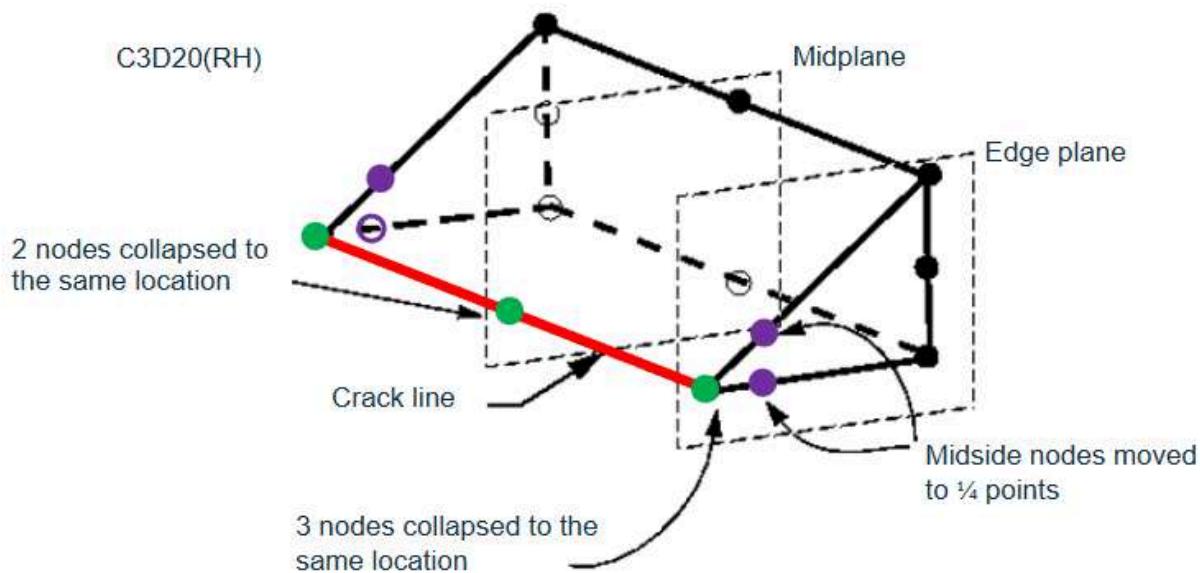


Figura 10: Elemento tipo cuña de 20 nodos (C3D20)[3].

Respecto al refinamiento del mallado, se requiere una densidad suficiente de elementos en la región próxima a la punta de fisura para capturar con precisión los gradientes de tensión y deformación. Si bien la integral-J puede evaluarse de manera razonable incluso con mallas relativamente gruesas, una resolución angular adecuada incrementa significativamente la fidelidad de los resultados. En este sentido, para obtener estimaciones precisas en el contexto de LEFM, la documentación del software [3] recomienda que los elementos que rodean la punta de la grieta tengan ángulos menores a $22,5^\circ$.

3.2 Descripción de modelo FEM

3.2.1 Geometría y material

La geometría de la probeta modelada corresponde a un cilindro de 37,4 mm de diámetro y 60 mm de longitud. No obstante, aprovechando las condiciones de simetría geométrica y de carga, se modela únicamente un cuarto de la probeta, tal como se muestra en la figura siguiente.

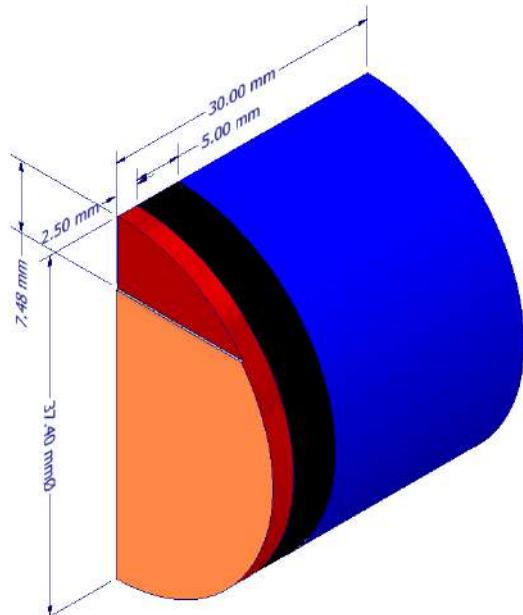


Figura 11: Cuarto de probeta modelada. Relación $a/D=0,2$.

Se aplicaron condiciones de borde que garantizan la representatividad de la simetría, imponiendo desplazamientos nulos en la dirección normal a la cara, así como las rotaciones en los ejes paralelos a dicha cara.

En la Figura 12 se ilustran las superficies sobre las cuales se aplicaron las condiciones de simetría. La superficie de color amarillo corresponde al plano de simetría en la dirección x, mientras que en la superficie de color naranja claro es el plano de simetría en la dirección z. Cabe destacar que, en esta última superficie, la región correspondiente a la entalla no fue incluida, ya que representa una superficie libre donde posteriormente se aplicará la carga.

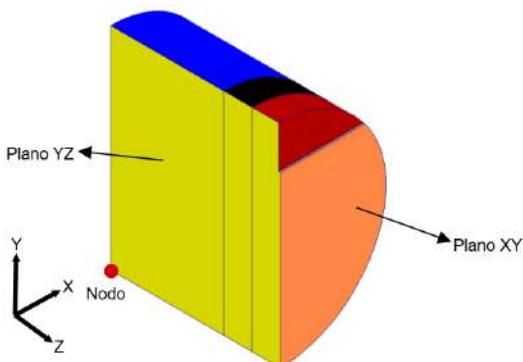
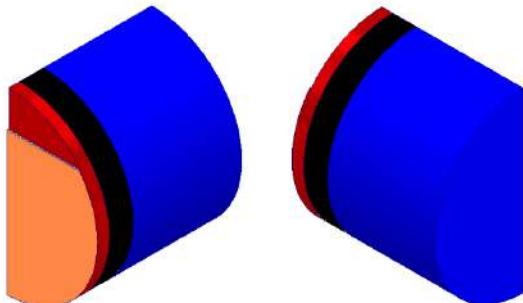


Figura 12: Probeta plug - superficies de simetría.

Adicionalmente, para garantizar la isostaticidad del modelo, se restringió el desplazamiento vertical en un nodo ubicado lejos de la zona de interés. Se realizó un análisis de sensibilidad variando la posición de dicho nodo, verificando que su ubicación no afecta los resultados obtenidos, asegurando así la independencia del modelo respecto a esta restricción.

El material asignado presenta un módulo de Young de 45 GPa y un coeficiente de Poisson de 0,18, valores que corresponden a las propiedades típicas de rocas del tipo

shale [1], [6].



3.2.2 Estado de cargas

En la Figura 13 se ilustran las superficies sobre las cuales se aplicaron estas cargas en el modelo de elementos finitos. La superficie roja representa la zona donde se aplica la presión interna, la superficie azul indica la región de aplicación de la presión de confinamiento, y la superficie negra corresponde a la zona de contacto con el oring.

Figura 13: Probeta plug - Superficies de carga.

Los valores de presión empleados corresponden a los registrados en el ensayo experimental en el instante inmediatamente anterior a la fractura de la probeta. A partir de ese estado, se determinan numéricamente el campo de tensiones y los parámetros fractomecánicos críticos, K_{IC} y T-stress.

3.2.3 Mallado

Como se mencionó previamente, para representar adecuadamente la singularidad en la punta de la fisura, se deben emplear elementos de tipo wedge en las inmediaciones del frente de grieta, generando una malla de tipo spider alrededor de la misma. La resolución angular adoptada fue de 12° (θ), generando un total de 14 elementos por contorno en dirección circunferencial (Figura 14), dado que el modelo se ha definido con simetría, en el modelo completo este contorno equivale a 28 elementos. El primer contorno se ubicó a una distancia radial (d) de 0,0024 mm, asegurando una adecuada captura del comportamiento local.

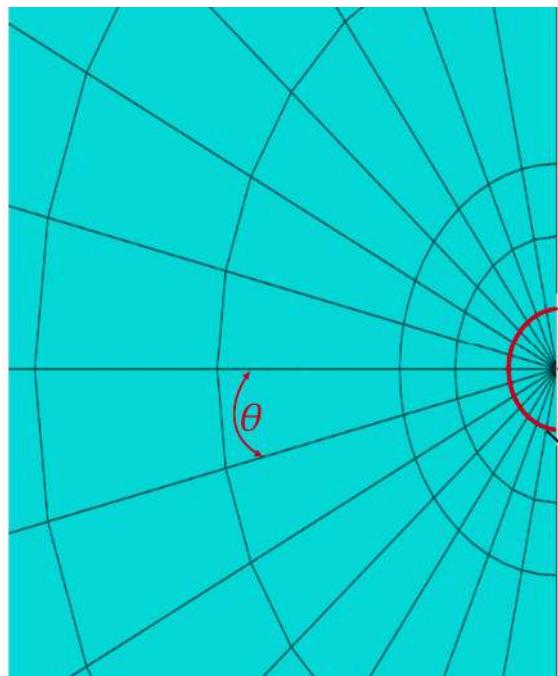


Figura 14: Detalle mallado tipo spider.

Fuera de este primer contorno, se emplearon elementos hexaédricos de 20 nodos (tipo C3D20), organizados en una malla estructurada con densidad variable de forma progresiva. Se utilizó un mallado más fino en la región de la punta de la entalla, mientras que en las zonas más alejadas las dimensiones de los elementos se incrementaron gradualmente, como lo indican las flechas de la Figura 15. Esta estrategia permitió reducir de manera significativa el número total de elementos sin comprometer la precisión en la región de interés, lo que resultó en una optimización eficiente del costo computacional del modelo.

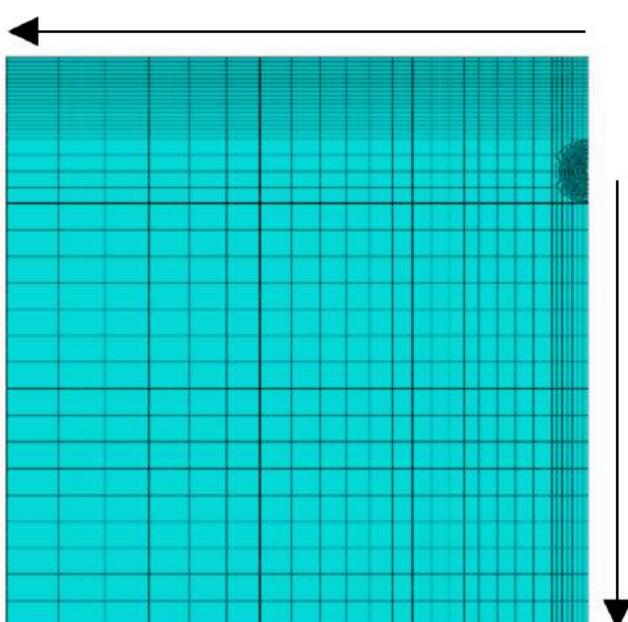


Figura 15: Estrategia de mallado con refinamiento localizado y crecimiento direccional.

El modelo completo, correspondiente a este caso de relación de entalla, tiene aproximadamente 34.000 elementos.

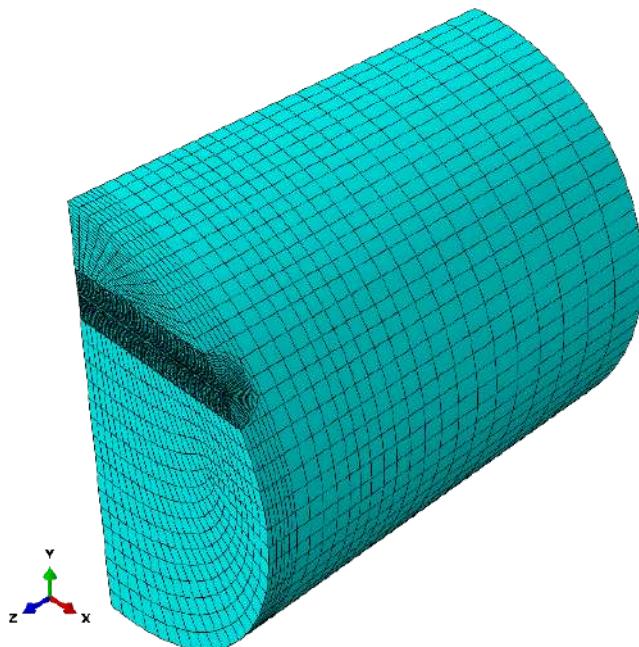


Figura 16: Vista general del mallado tridimensional del modelo.

4. Resultados obtenidos

Los ensayos experimentales y numéricos realizados evidencian que la presión de confinamiento influye de manera directa en los parámetros fractomecánicos, en las características superficiales de la fractura y en la extensión de la zona de proceso de fractura. Asimismo, estudios complementarios han demostrado que la composición y química del fluido de saturación también impactan significativamente en la tenacidad a la fractura.

En las siguientes subsecciones se presentan y analizan los resultados publicados previamente en [1], [2], [7], [8] donde se cuantifica la influencia combinada del confinamiento y de la interacción fluido-roca, así como sus implicancias en el comportamiento mecánico de las rocas bajo condiciones que simulan escenarios de fondo de pozo.

4.1 Efecto del confinamiento y del fluido sobre la tenacidad a la fractura (K_{IC})

La tenacidad a la fractura K_{IC} es un parámetro fundamental en el análisis de la fracturabilidad de rocas de reservorios no convencionales, ya que representa la resistencia intrínseca del material a la propagación inestable de una grieta. En formaciones tipo shale, como la Vaca Muerta, K_{IC} condiciona de forma directa la presión de iniciación y el crecimiento de fracturas hidráulicas, influyendo así en la eficiencia del estímulo y en el volumen de reservorio productivo generado.

Los ensayos realizados bajo diferentes presiones de confinamiento han demostrado que K_{IC} no es un valor constante, sino que depende de las condiciones de esfuerzo a las que se encuentra la roca (Figura 17). Un incremento en la presión de confinamiento aumenta el valor de K_{IC} , reflejando una mayor resistencia a la propagación de la grieta. Este efecto puede atribuirse a la restricción que el confinamiento impone sobre la apertura de la fisura y sobre el desarrollo de microfracturas secundarias, lo que limita los mecanismos de daño que, en condiciones no confinadas, facilitan la extensión de la fractura. Sin embargo, la magnitud de

este aumento varía según la litología, el grado de laminación y la orientación de la entalla respecto a la estructura interna de la roca.

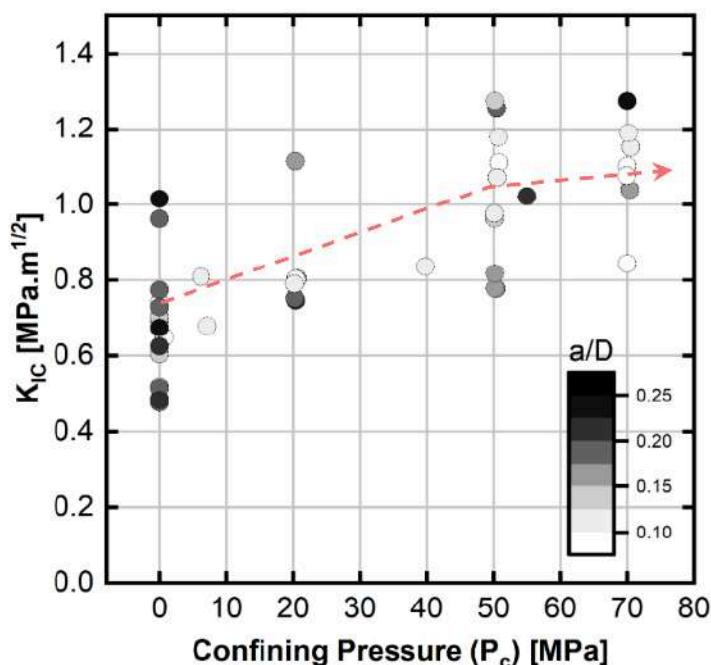


Figura 17: Tenacidad a la fractura en función de la presión de confinamiento.

Adicionalmente, la química del fluido en contacto con la roca es un factor determinante en la respuesta de K_{Ic} . Experimentos realizados con probetas saturadas en distintos fluidos y sin presión de confinamiento muestran reducciones significativas de este parámetro en comparación con el estado seco (Tabla 1). En particular, se han reportado disminuciones de hasta un 70 % en K_{Ic} al utilizar agua destilada o solución salina 2-API, y del orden del 25 % para fluidos orgánicos como alcohol isopropílico o kerosene. La interacción fluido-roca puede inducir cambios microestructurales y químicos que afectan la cohesión de la matriz mineral, incluyendo procesos como la corrosión bajo tensión, la disolución de fases carbonáticas y el hincharimiento de minerales arcillosos.

Condición	Cantidad de datos	K_{Ic} medido (MPa m ^{0.5})	Desvió estandar (MPa m ^{0.5})
Sin saturar (seca)	10	0,68	0,058
2-API	10	0,23	0,088
Agua destilada	9	0,20	0,107
Alcohol isopropílico	10	0,54	0,074
Kerosene	5	0,5	0,098

Tabla 1: Tenacidad a la fractura sin confinamiento bajo distintas condiciones de saturación. [7].

El confinamiento triaxial y el fluido de saturación tienen un impacto opuesto en K_{Ic} , mientras que el confinamiento mecánico tiende a aumentar la resistencia a la fractura, ciertos fluidos acuosos la reducen de forma marcada. Por lo tanto, para una correcta evaluación de K_{Ic} en condiciones representativas de fondo de pozo, es imprescindible considerar ambos factores de forma simultánea. Esta visión integrada es clave para el modelado de la fracturabilidad y para el diseño de operaciones de estimulación hidráulica, ya que permite anticipar cambios en la presión de iniciación y en la propagación de fracturas dependiendo de la presión de confinamiento y del tipo de fluido de trabajo empleado.

4.2 Efecto del confinamiento sobre la zona de proceso de fractura (FPZ)

Los resultados presentados en "Fracture toughness tests of shale outcrops: Effects of confining pressure" [8] muestran que la zona de proceso de fractura (FPZ) presenta variaciones significativas con la presión de confinamiento aplicada durante los ensayos. Esta región, ubicada alrededor de la punta de grieta, fue identificada a partir de simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos.

La Figura 18 presenta resultados numéricos obtenidos mediante el método FEM. Se puede observar que la distribución de tensiones principales a lo largo de la dirección Y- para condiciones de alto confinamiento (HC, High Confinement) y confinamiento medio (MC, Middle Confinement). Se deduce que a bajo confinamiento, la FPZ se caracteriza por una mayor extensión. En cambio, bajo altos niveles de confinamiento, la FPZ se reduce de manera notable.

En este gráfico, la resistencia a tracción (Tensile Strength, TS) se utiliza como límite en el eje de tensiones, y el tamaño de la FPZ se estima aplicando el criterio de Schmidt, que determina la extensión de la zona en la que las tensiones superan el umbral de resistencia a tracción del material, considerando dicho umbral como 0.

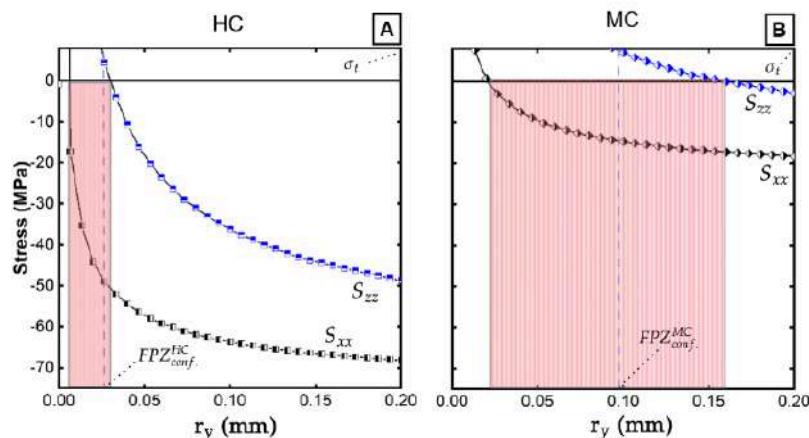


Figura 18: FPZ y distribución de tensiones principales para alto (HC) y medio confinamiento (MC) obtenida por FEM.

Estos resultados confirman que el tamaño de la FPZ depende directamente del nivel de confinamiento, lo que tiene implicancias relevantes al extraer los datos obtenidos en laboratorio a condiciones de campo.

4.3 Rugosidad de la superficie de fractura

El análisis visual de las superficies obtenidas tras los ensayos experimentales evidencia que la rugosidad depende de manera marcada del nivel de confinamiento aplicado.

A bajo confinamiento, las superficies presentan una rugosidad elevada, con relieves pronunciados y variaciones abruptas en altura, originadas por la propagación de la grieta a través de múltiples trayectorias irregulares. En condiciones de confinamiento intermedio, la rugosidad disminuye de forma notable; la superficie conserva algunas irregularidades, pero la topografía se vuelve más homogénea y con diferencias de altura más reducidas. Finalmente, bajo alto confinamiento, la rugosidad es considerablemente menor, con un relieve más plano y uniforme, lo que sugiere una propagación de la grieta más directa y con menor desviación respecto al plano principal de fractura.

La Figura 19 muestra de manera macroscópica estas diferencias, comparando las superficies resultantes para condiciones atmosféricas, 20 MPa y 50 MPa de confinamiento. Este comportamiento se correlaciona con el aumento de la tenacidad a la fractura y podría estar asociado al desarrollo de microfisuras de cizallamiento en la zona próxima a la punta de grieta, que actúan como un mecanismo adicional de resistencia y favorecen la formación de superficies más planas.



Figura 19: Evolución de la superficie de fractura frente a la presión de confinamiento. Las notaciones I, II y III corresponden a la condición atmosférica, 20 MPa y 50 MPa respectivamente.

Las superficies de fractura son caracterizadas mediante ensayos ópticos utilizando un interferómetro láser de baja coherencia desarrollado conjuntamente por IEA y el Grupo de Fotónica Aplicada de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional. De estos ensayos se deduce que la rugosidad de la superficie de fractura es inversamente proporcional a la presión de confinamiento del ensayo (Figura 20), y puede aproximarse con la siguiente relación:

$$R_q = \frac{R_{q|_{P_c=0}}}{(P_c + 1)^\alpha} \quad (1)$$

donde R_q la rugosidad cuadrática media, $R_{q|_{P_c=0}}$ la rugosidad cuadrática media para un ensayo de tenacidad en condiciones no confinadas, P_c la presión de confinamiento del ensayo (en megapascales), y α un parámetro que debe ser calibrado para cada tipo de roca. La Figura 20 ilustra la tendencia experimental y el ajuste de este modelo.

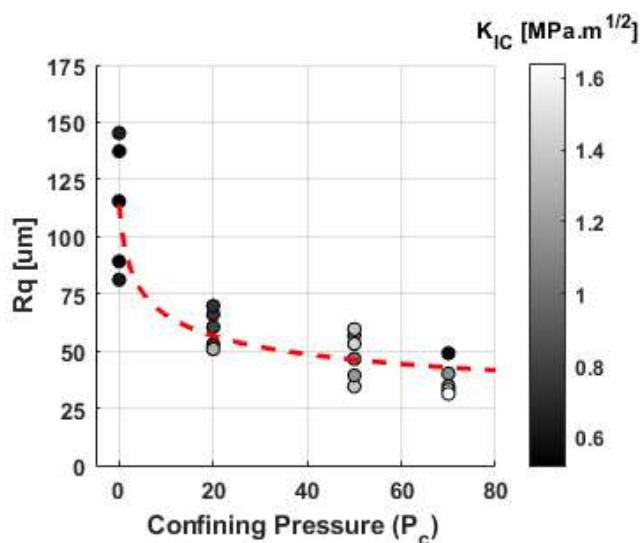


Figura 20: Comportamiento de R_q con el incremento de la presión de confinamiento (P_c). La escala de grises hace referencia a la tenacidad a la fractura (K_{IC}), y la línea punteada roja viene dada por la ecuación (1) para un $\alpha = 0.23$ y $R_{q|_{P_c=0}} = 114 \mu m$.

El parámetro α cuantifica el efecto de la presión de confinamiento sobre la rugosidad de la superficie de fractura y podría considerarse representativo del grado de defectos del material. En una muestra homogénea, isótropa y libre de defectos (sin microfisuras, poros ni huecos), la compactación que sufre la muestra debido a la presión de confinamiento sería mínima, dando lugar a cambios insignificantes en los parámetros elásticos y en la rugosidad de la superficie de fractura, correspondiente con un valor de α cercano a 0. A medida que aumenta el grado de heterogeneidad y defectos en la muestra, la compactación se vuelve más significativa, provocando mayores variaciones en los parámetros elásticos y en la rugosidad de la superficie de fractura. La Figura 21 presenta la estimación de R_q para distintos valores de α .

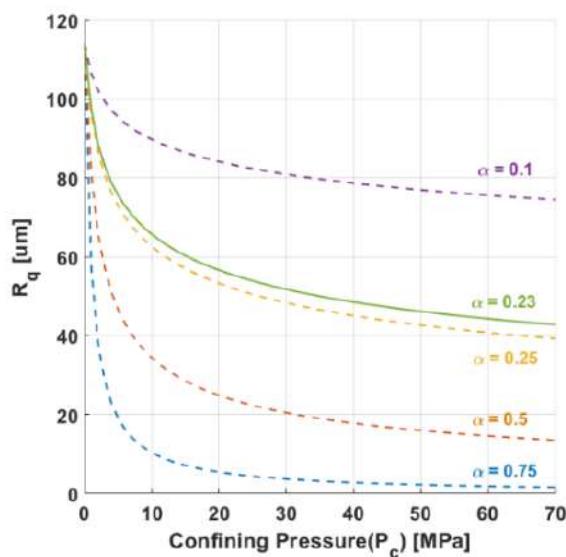


Figura 21: Estimación de R_q a partir del modelo basado en P_c (ec. 1) para diferentes exponentes α . Suponemos $R_{q|_{(P_c=0)}} = 114$ constante para todo valor de α . La línea verde sólida corresponde al modelo ajustado para nuestras pruebas.

Conclusiones

Los resultados experimentales y numéricos muestran que la presión de confinamiento y la química del fluido de saturación influyen de manera decisiva en la tenacidad a la fractura K_{IC} y en la morfología de la superficie de fractura en rocas shale. En particular, el aumento del confinamiento desde condiciones atmosféricas hasta valores representativos de fondo de pozo puede incrementar K_{IC} hasta aproximadamente el doble, evidenciando un endurecimiento mecánico significativo.

El análisis numérico de la zona de proceso de fractura (FPZ) revela que esta se reduce de forma notable con el confinamiento, concentrando el daño en una región más próxima a la punta de grieta y favoreciendo mecanismos de propagación más directos.

La influencia de la química del fluido sobre K_{IC} también es relevante: en ausencia de confinamiento, las condiciones secas producen los valores más altos de tenacidad, mientras que la saturación con fluidos acuosos u orgánicos puede reducir significativamente la resistencia a la fractura, dependiendo de la composición y de las interacciones fluido-roca.

El estudio de la rugosidad superficial confirma una relación inversa entre este parámetro y la presión de confinamiento, la cual puede describirse mediante un modelo empírico que asocia el parámetro α con la sensibilidad del material a la compactación.

En conjunto, estos resultados aportan evidencia clara de que el confinamiento no solo incrementa K_{IC} , sino que también modifica la extensión de la FPZ y la morfología de la superficie de fractura, mientras que la química del fluido actúa como un factor modulador de la resistencia.

Los resultados obtenidos por el Laboratorio de Innovación Energética y Ambiental (IEA) en la caracterización de reservorios no convencionales demuestran el desarrollo e implementación de herramientas experimentales y metodologías que fortalecen el estudio integral de estos sistemas, en particular de la Formación Vaca Muerta. Actualmente, el grupo de trabajo investiga la sensibilidad de la tenacidad a la fractura y de otros parámetros fractomecánicos frente a la fatiga, utilizando el equipo de fractura RTT-C. Paralelamente, se analiza el efecto de la química del fluido bajo condiciones de confinamiento, obteniendo resultados que permitirán medir la velocidad de propagación de la fractura y correlacionar la energía de fractura durante los ensayos.

Referencias

- [1] F. J. Antinao Fuentealba, J. J. Romero, J. L. Otegui, and G. L. Bianchi, "Device for rock fracture toughness testing under hydrocarbon reservoir conditions", "Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 109, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102718.
- [2] F. J. Antinao Fuentealba, L. N. Bianchi, J. L. Otegui, and G. L. Bianchi, "Accurate experimental determination of rock fracture toughness under simulated reservoir confining pressures," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 120, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.tafmec.2022.103425.
- [3] Dassault Systèmes, "Documentation | Support - Dassault Systèmes." Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/support/documentation>
- [4] D. M. Parks, "The virtual crack extension method for nonlinear material behavior," Comput Methods Appl Mech Eng, vol. 12, no. 3, pp. 353-364, Dec. 1977, doi: 10.1016/0045-7825(77)90023-8.
- [5] C. F. Shih, B. Moran, and T. Nakamura, "Energy release rate along a three-dimensional crack front in a thermally stressed body," Int J Fract, vol. 30, no. 2, pp. 79-102, Feb. 1986, doi: 10.1007/BF00034019/METRICS.
- [6] A. M. Pakdaman, M. Moosavi, and S. Mohammadi, "Experimental and numerical investigation into the methods of determination of mode I static fracture toughness of rocks," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 100, pp. 154-170, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.tafmec.2019.01.001.
- [7] F. J. Antinao Fuentealba, G. L. Bianchi, A. Sánchez Camus, and R. Ramos, "Fracture toughness experiments in shale rocks, effect of fluid chemistry on K_{IC} ," 10th Hydrocarbon Exploration and Development Congress (CONEXPLO), pp. 1-17, 2018.
- [8] F. J. Antinao Fuentealba, G. Blanco, L. N. Bianchi, J. L. Otegui, and G. L. Bianchi, "Fracture toughness tests of shale outcrops: Effects of confining pressure," Geoenergy Science and Engineering, vol. 232, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.geoen.2023.212454.

AUTORES

Leandro N. Bianchi

:: Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
leandro.bianchi@ing.unlp.edu.ar

Pedro I. Lescano

:: Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Sebastian A. Alé

:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
:: Centro de Investigaciones Geológicas (CIG-CONICET), Facultad de Naturales de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Gonzalo Blanco

:: Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
:: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Carlos Selva

:: Innovación Energética y Ambiental, Instituto Malvinas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Caracterización litológica y granulométrica de agentes de sostén recuperados mediante flujos de retorno y su comportamiento en el tiempo en reservorios no convencionales

Juan Ignacio Cresta

Resumen

Este trabajo realiza la caracterización litológica y granulométrica de muestras de agentes de sostén obtenidas por flujos de retorno (flowback). La fracturación hidráulica aplica presión mediante la inyección de un fluido viscoso para fracturar la roca, transporta un agente de sostén (arena de fractura) que mantiene abiertas las fracturas, creando canales de alta conductividad que conectan a la formación con el pozo. En yacimientos no convencionales, esta técnica busca generar un volumen de roca estimulado (SRV) que permita producir hidrocarburos de forma rentable.

El estudio se centra en el análisis de 17 muestras de agente de sostén recuperadas del flowback de un pozo en la Cuenca Neuquina, se evalúa cómo varía el tamaño de grano a lo largo del tiempo. Los resultados muestran que las presiones ejercidas sobre las muestras provocan modificaciones granulométricas: los granos disminuyen su tamaño y pierden esfericidad. Además, gran parte de los agentes cerámicos aparecen fragmentados, forman semiesferas. Estas alteraciones reducen la permeabilidad y, por tanto, afectan negativamente la conductividad de la fractura hidráulica.

Se considera un estudio innovador que aporta información valiosa para la industria, contribuye al desarrollo y optimización de técnicas de fracturación en reservorios no convencionales.

Palabras clave: Agentes de sostén; Fractura hidráulica; Flujos de retorno; Formación Vaca Muerta; No convencionales.

Abstract

This work carries out the lithological and granulometric characterization of proppant samples obtained from flowback. Hydraulic fracturing applies pressure by injecting a viscous fluid to fracture the rock, transporting a proppant (commonly known as frac sand) that keeps the fractures open, thereby creating high-conductivity channels that connect the formation with the well. In unconventional reservoirs, this technique aims to generate a stimulated rock volume (SRV) that enables the profitable production of hydrocarbons. The study focuses on the analysis of 17 proppant samples recovered from the flowback of a well in the Neuquén Basin, evaluating how grain size changes over time. The results show that the pressures exerted on the samples cause granulometric modifications: the grains decrease in size and lose sphericity. Furthermore, a large portion of the ceramic proppants appear fragmented, forming hemispheres. These alterations reduce permeability and thus negatively impact the conductivity of the hydraulic fracture. This is considered an innovative study that provides valuable information for the industry, contributing to the development and optimization of fracturing techniques in unconventional reservoirs.

Keywords: proppant; Hydraulic fracturing; Flowback; Vaca Muerta Formation; Unconventional reservoirs.

1. Introducción

El objetivo de este estudio es evaluar la evolución litológica y granulométrica del agente de sostén a lo largo del tiempo, se toma como caso de referencia un pozo horizontal estimulado en la Formación Vaca Muerta, el *shale play* no convencional más importante de la Cuenca Neuquina y de la República Argentina. Debido a que la misión primaria del material propante es mantener abierta la fractura hidráulica y garantizar su conductividad, cualquier modificación de sus propiedades físicas tamaño, forma o integridad mecánica puede mermar la eficiencia del estímulo y, en consecuencia, la producción de hidrocarburos.

La novedad del presente trabajo radica en el análisis seriado de propantes recuperados mediante *flowback* en distintos momentos del ciclo productivo, lo que permite documentar, bajo condiciones reales de fondo de pozo, los procesos de degradación que afectan al material y su impacto potencial sobre la productividad.

Para contextualizar el caso de estudio, la introducción se organiza en los apartados siguientes: 1.1 Reservorios no convencionales, con énfasis en los sistemas tipo *shale*; 1.2 Formación Vaca Muerta; 1.3 Otros *shales* argentinos; y 1.4 Fracturación hidráulica, que incluye una síntesis de fluidos de fractura y características de los agentes de sostén.

1.1 Reservorios no convencionales

Para entender los reservorios no convencionales, tendremos de se toma como referencia los convencionales (Figura 1).

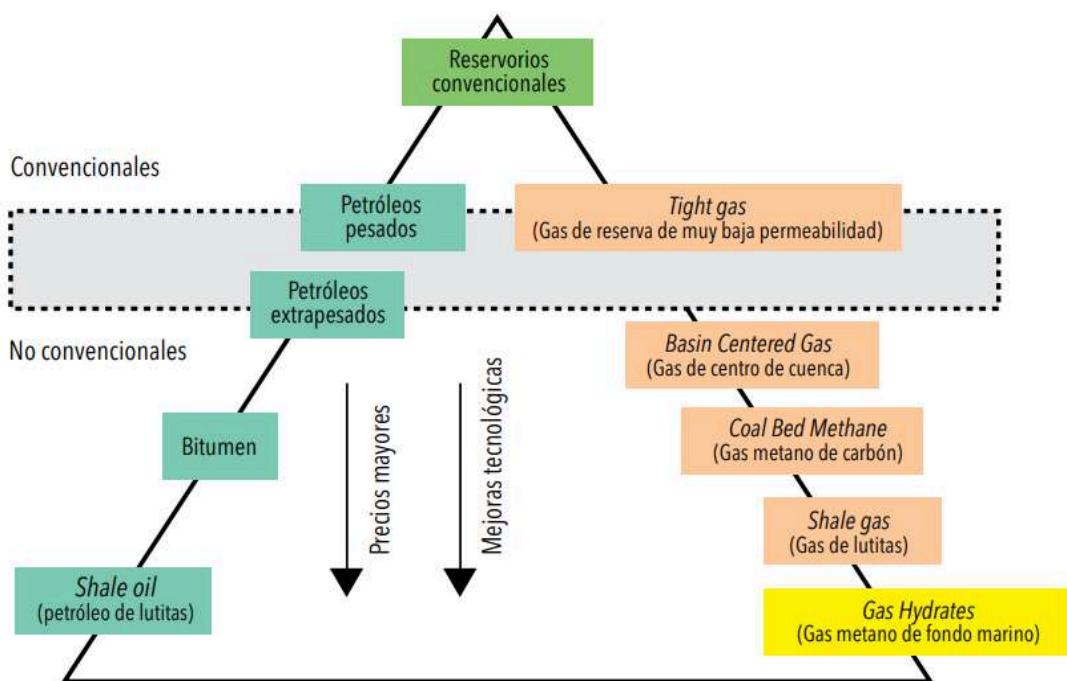


Figura 1. Diagrama triangular de reservorios convencionales y no convencionales. Las líneas punteadas demarcan lo considerado como transicional entre las dos clases de reservorios, según Cabanillas et al. (2015).

El reservorio convencional es un reservorio de buena calidad petrofísica, principalmente alta permeabilidad donde todo lo que se debe hacer es perforar un pozo vertical y punzar el intervalo productivo. En términos generales, el hidrocarburo fluirá espontáneamente con recuperación de volúmenes comerciales sin que se

requiera una estimulación importante. En cambio, un reservorio no convencional es un sistema de baja calidad que debe ser estimulado para producir y recuperar volúmenes comerciales de hidrocarburos. La baja calidad puede estar vinculada principalmente a la baja permeabilidad y porosidad o un hidrocarburo muy pesado. La fracturación hidráulica en perforaciones horizontales de gran extensión es muy eficaz en la estimulación de reservorios no convencionales. Para petróleo pesado o esquisto bituminoso, necesitamos calor para reducir la viscosidad del hidrocarburo (Holditch, 2006).

En resumen, los reservorios no convencionales son aquellos reservorios que no tienen la capacidad de producir hidrocarburos de forma rentable sin asistencia de tratamientos masivos de estimulación o tecnologías y procesos especiales de recuperación (Holditch, 2013).

El material de estudio de este trabajo se aplica sobre la Formación Vaca Muerta. Y este es el reservorio no convencional tipo shale más importante en Argentina, en tal sentido, se desarrollan los siguientes conceptos.

1.2 Shales como reservorios

Los shales son rocas sedimentarias de grano fino y alto contenido orgánico que actúan simultáneamente como roca generadora, reservorio y sello; sólo producen volúmenes comerciales tras estimulación artificial (Jarvie et al., 2007). Una caracterización rigurosa de: espesor, extensión, contenido y madurez de carbono orgánico, mineralogía, sistema poral, fracturas naturales, presión, temperatura y propiedades geomecánicas, permite optimizar perforación, completación y fractura, reduciendo costos e impacto ambiental (Holditch, 2013). La porosidad total proviene de poros inter- e intracristalinos, poros en materia orgánica (hasta 25 %) y microfracturas (< 1 %), lo que confiere permeabilidades microdarcy que exigen crear fracturas hidráulicas (Wang & Reed, 2009; Ambrose et al., 2012). Las fracturas naturales controlan el flujo inicial y, al presentar permeabilidades de una a tres veces mayores que la matriz, condicionan el espaciamiento de pozos (King, 2010). Finalmente, cuanto menor es la permeabilidad de la matriz, mayor área de contacto y presión de fractura, así como mayores volúmenes de propante, se requieren para mantener caudales rentables (Bello & Wattenbarger, 2008).

1.3 Formación Vaca Muerta

La Formación Vaca Muerta (Weaver, 1931) es una de las unidades litoestratigráficas con mayor extensión areal de la Cuenca Neuquina. Esta cuenca se ubica en el centro-oeste de Argentina, entre los 32° y 40°S de latitud. Su superficie es de aproximadamente 120.000 km². La deposición de más de 7 km de sedimentos del Jurásico y Cretácico tuvo lugar en un depocentro de transarco, parcialmente cerrado sobre el sector occidental de la placa Sudamericana convergente sobre el Océano Pacífico (Uliana y Legarreta 1993).

La Formación Vaca Muerta representa una transgresión regional y drástica que favorece condiciones anóxicas asociadas a secciones condensadas capaces de preservar la materia orgánica. Una vez que se alcanza un mayor equilibrio entre la entrada de sedimentos y el espacio de acomodación, las facies calcáreas y clásticas de aguas someras comienza a progradar hacia el centro de la cuenca (Legarreta y Uliana 1991). Por ello, es habitual denominar a este intervalo como Vaca Muerta-Quintuco representando una unidad depositacional sincrónica. Los análisis secuenciales estratigráficos realizados permitieron definir secuencias progradacionales que colmaron sucesivamente la cuenca de Este a Oeste. Los depósitos que constituyen esta formación abarcan las edades Tithoniano, Berriasiano y Valanginiano temprano (Mitchum y Uliana 1985). Su espesor alcanza un valor máximo de más de 600 metros en el depocentro (geográficamente ubicado en la confluencia del río Neuquén y el arroyo Covunco). En términos sedimentológicos, consiste en ciclos constituidos por margas, lutitas negras y limolitas calcáreas oscuras, con lutitas y wackestones intercaladas, ricas en materia orgánica, depositadas en un ambiente marino desde la rampa exterior hasta la rampa media, en condiciones mayoritariamente anóxicas a disaeróbicas (Kietzmann et al. 2013).

Con el desarrollo de nuevas tecnologías y el éxito de producción de reservorios tipo shale en EE.UU., la Formación Vaca Muerta ha pasado a ser un objetivo exploratorio no convencional, que se destaca por su gran extensión, espesores y altos valores de carbono orgánico total. Según el reporte de la EIA en 2013

(Energy Information Administration de EE.UU.) los recursos técnicamente recuperables estimados para esta formación están en el orden de 300 Tcf de gas y de 16 Bbbl de petróleo. Sin dudas es un atractivo económico que merece ser estudiado para optimizar al máximo su producción.

1.4 Otros shales en Argentina

Existen otras rocas generadoras con potencial hidrocarburífero, como Vaca Muerta. Son ejemplo de ello las formaciones Agrio y Los Molles (Cuenca Neuquina), Pozo D-129 y Aguada Bandera (en la Cuenca del Golfo de San Jorge); Palermo Aike (Cuenca Austral); Cacheuta (Cuenca Cuyana); y Yacoraite y Los Monos (Cuenca del Noroeste), entre otras. Cada una, con determinadas características es atractiva para su desarrollo. Presentan gran variabilidad en espacio, tiempo y calidad como rocas generadoras. Considerando sus características se determina que en tiempos del Jurásico Tardío y Cretácico Temprano, se acumularon las rocas madre que suministraron alrededor del 76 % de los hidrocarburos conocidos. Algunos puntos en común de estas unidades radican en que se acumularon bajo condiciones anóxicas en ambientes marinos y lacustres, en sintonía con posiciones altas del nivel eustático global y bajo condiciones paleogeográficas y climáticas propicias para la generación, acumulación y preservación de la materia orgánica (Uliana et al., 2014).

1.5 Fracturación hidráulica

Como se mencionó anteriormente estos tipos de reservorios necesitan ser estimulados a través de fracturas hidráulicas. Esta metodología se aplica desde hace más de 60 años. En sus inicios esta técnica se utilizaba en reservorios convencionales de permeabilidades medias o con petróleos pesados, en reactivación de campos maduros, o para eliminar la zona dañada (durante la perforación) en las inmediaciones de los pozos. Estas consisten principalmente en generar fracturas mediante la inyección de fluidos a una gran presión y alto caudal. Otro componente esencial son los agentes de sostén que favorecen la conductividad para los fluidos. Hacia 1970 en la Cuenca Neuquina era un tratamiento de rutina en la completación de pozos, pero de un altísimo costo, sólo justificable por notables incrementos en la productividad (figura 2).

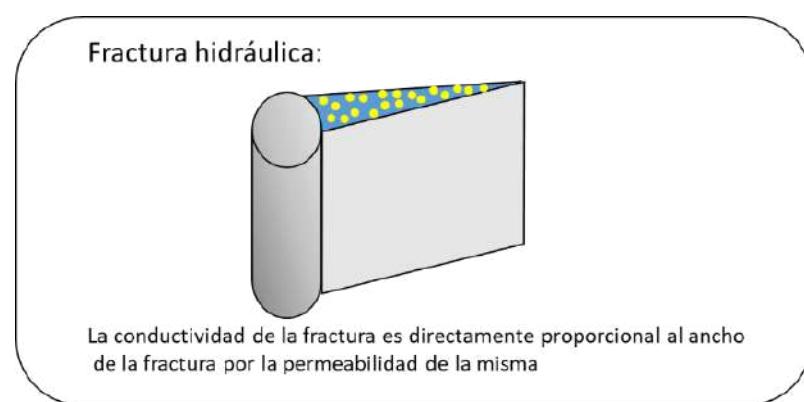


Figura 2. Ejemplificación de una fractura hidráulica.

Cuando las rocas son sometidas a esfuerzos que alcanzan su punto crítico, estas se fracturan. El comportamiento mecánico de las rocas se define por

mediciones a partir de ensayos de laboratorio. Estas mediciones se realizan en tres direcciones perpendiculares entre sí para tener en cuenta la variabilidad de las propiedades que representa la anisotropía de las rocas. La presión necesaria para romper una roca se denomina presión de fractura y es una función de la profundidad y del tipo de roca.

La maniobra para fracturar un reservorio comienza con los punzados de la zona a estimular, a través de estos se inyecta el fluido hacia la unidad. La presión del flujo es transmitida a todo el sistema poral. En reservorios no convencionales tipo shale es frecuente la presencia de fracturas naturales y planos de debilidad. El sistema resultante de la fracturación hidráulica es una red principal de fracturas creadas en contacto con una gran área activa de fracturas naturales preexistentes, cuya extensión y forma dependen tanto de los parámetros de diseño de la fractura como de las tensiones actuantes y las heterogeneidades

locales (Cipolla et al., 2008). Justamente el objetivo es generar un volumen de roca estimulado (SRV: Stimulated Rock Volume) que, cuanto más eficaz sea, mayor será la superficie de fracturas conectadas con los diminutos poros de la roca generadora y, por lo tanto, mayor será la producción del pozo. El SRV es entonces el parámetro clave para maximizar la productividad y es quizás el más difícil de estimar, por eso diferentes compañías aplican distintas estrategias de adquisición de datos para su estimación (Achilli et al., 2019).

La inyección que genera las fracturas está compuesta con fluidos y aditivos, que son detallados más adelante. La función principal del fluido injectado es ejercer la potencia hidráulica sobre la cara de la roca para fracturarla. Además, transporta el agente de sostén desde la boca de pozo, pasando por los punzados hasta la punta de la fractura creada. En sistemas no convencionales se recomienda utilizar geles muy livianos, conocidos como sistemas slickwater para minimizar el residuo de agentes de sostén. La tendencia en Vaca Muerta es usar un sistema híbrido con slickwater para los volúmenes iniciales con menor concentración y granulometría del agente de sostén y pasar a geles más consistentes (sistemas reticulados) a medida que aumentan ambos.

En general los aditivos de los fluidos de fracturas están compuestos por un 99,5% de agua y agente de sostén. El 0,5% restante comprende una serie de productos químicos con diferentes funciones. Estos últimos pueden ser: agentes gelificantes (derivados de polímeros naturales como goma guar o celulosa, por su estructura molecular son muy eficientes en sostener el material de soporte), ácido clorhídrico (para disminuir la presión de fractura, la cual se gasta en la vecindad del pozo y no retorna como tal a superficie sino como dióxido de carbono y sales), inhibidores de corrosión (productos orgánicos, algunos son tóxicos y se usan en bajas proporciones para reducir el ataque ácido a la cañería), biocidas (o desinfectantes, previenen la contaminación por bacterias y otros microrganismos presentes en el material o instalaciones de superficie) y tensioactivos (productos químicos semejantes a los detergentes que previenen la formación de espumas y emulsiones que pueden interferir en la producción, Riavitz et al., 2015).

Uno de los principales protagonistas en las fracturas son los agentes de sostén o agentes propantes ya que tienen una importancia crítica en el éxito de la fractura. La efectividad de este determina la productividad del pozo tratado. Por eso mismo, la utilización de un agente inadecuado puede generar impactos muy negativos en la operación. La caracterización del mismo está normalizada, siguiendo las especificaciones de la norma Práctica Recomendada ANSI/API API 19 C, o su idéntica, la ISO 135032/2. Las propiedades requeridas de los agentes de sostén para una fracturación hidráulica eficiente solicitadas por norma consideran tamaño, densidad, solubilidad, turbidez, redondez y esfericidad y resistencia a la compresión. Más allá de sus características físicas y composicionales, un factor crítico es el económico. Es decir, que el precio del mismo y su calidad deben considerarse a la par en el momento de la selección (Peñaranda, 2014).

Se reconocen distintos tipos de agentes de sostén.

:: Arenas naturales: son el agente de sostén más convencional, pionero y de mayor uso. Además, es el más económico y generalmente provee suficiente conductividad de fractura para presiones de cierre menores a 8.000 psi, según sea la malla designada para la fractura hidráulica. Su densidad específica es cerca de 2,65. En general presentan formas irregulares y diversos tamaños, con una redondez y esfericidad que varían entre 0,5-0,7.

:: Arenas resinadas: son arenas con granos recubiertos por una película muy fina de resina que mejora la calidad del material debido a una mejor distribución de los esfuerzos entre granos, lo que incrementa la resistencia del empaque a la compresión y que los finos generados por la rotura de grano queden entramados dentro de la resina y, por ese motivo, no tapan los poros del empaque y no reducen su conductividad. Son denominadas como agentes de resistencia intermedia ya que son más resistentes que las arenas naturales, pero menos que los agentes artificiales. Presentan una conductividad similar a la de la arena convencional y pueden aumentar entre 1.000 psi a 2.000 psi la resistencia de la arena inicial.

:: Artificiales: bauxitas y cerámicos. Son de alta resistencia y se usan en pozos profundos en general, donde se necesita una mayor resistencia a la presión. Pero su desventaja es el alto costo comparado con los otros agentes de sostén. Otro de sus inconvenientes es su alta densidad (3,6 g/cm³ para la bauxita y 2,9 g/cm³ para los cerámicos aproximadamente). Esto implica fluidos de fracturación de mayor capacidad de acarreo, incrementando las necesidades de potencia, caudal y presión; puede resultar difícil operativamente teniendo en cuenta el tiempo de sedimentación de las partículas, ocasionando fuertes incrementos de costos. Son los más uniformes en tamaño y forma, con alta redondez y esfericidad 0,8-0,9 (Kullman 2011).



Figura 3. Tipos de agentes de sostén. **A)** arenas naturales. **B)** arenas resinadas. **C)** artificiales.

2. Metodología

Las muestras se reciben en el laboratorio, en bolsas plásticas debidamente etiquetadas, donde se consigna la fecha de toma. Luego se procede al lavado. Cada muestra se coloca en un vaso de plástico para la limpieza porque están contaminadas con fluidos de perforación (lodo e hidrocarburos). El lavado consiste en agregar agua corriente con detergente biodegradable, agitar la muestra y dejar decantar el material. Luego se retira el líquido del vaso y se repite el procedimiento hasta que no queden rastros de hidrocarburos y/o contaminantes. Posteriormente se dejaron secar las muestras a temperatura ambiente.

Se realiza la descripción litológica sobre 21 muestras bajo lupa binocular (Leica S8AP0). Se utilizaron patrones de comparación granulométricos de la "American Canadian Stratigraphic" y para determinar el color de las diferentes litologías la tabla de color "Geological Society of America". Todas las muestras fueron fotografiadas bajo lupa con cámara (Leica DFC295) y escaladas. Las muestras son atacadas con ácido clorhídrico al 10% para evaluar su reacción. En cada muestra se describe: tamaño de grano (Udden, 1914 y Wentworth, 1922), componentes (granos, minerales accesorios, esfericidad, redondez, matriz, cemento y elementos con propiedades magnéticas). La redondez, se determina por comparación visual de acuerdo con la Escala de Powers para arenas (1953). La selección se estima de acuerdo con Compton (1962).

Se realiza el análisis granulométrico sobre todas las muestras. Se trabaja con imágenes digitales tomadas con diferentes aumentos, se seleccionan las más representativas. Estas son procesadas con los softwares Image-Pro y Excel. Se sugiere incluir en alguna de ellas una descripción sintética del aporte del artículo. Figura 4.

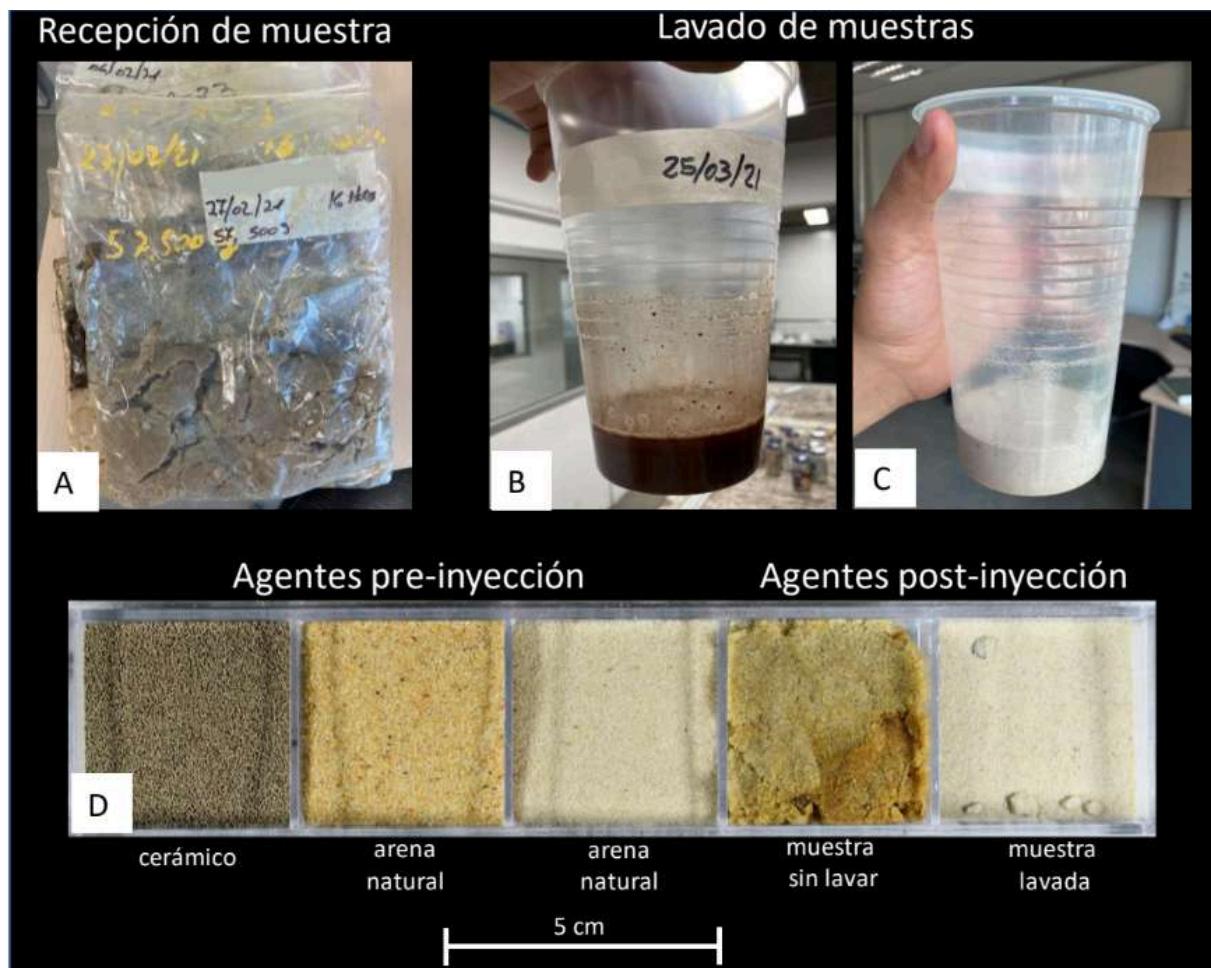


Figura 4. a) Muestra recibida del campo. b) Muestra con agua y detergente. c) Muestra lavada. d) Agentes de sostén pre-inyección y post-inyección.

3. Evaluación de resultados

A continuación, se presentan las descripciones individuales de cada muestra.

3.1.1 Agentes de sostén pre-inyección:

Cerámico A: la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por material cerámico de tamaño arena mediana (0.25-0.50 mm). Los granos son esféricos y bien redondeados. Presenta muy buena selección. No se observan minerales accesorios. El color en seco castaño amarillento moderado (10YR 5/4) castaño amarillento oscuro (10YR 4/2). Media: 0.370 mm. Mediana (percentil 50): 0.371 mm.

Arena natural B: la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo hialino, naranja pálido y naranja amarillento. El tamaño dominante es arena mediana inferior (0.25-0.35 mm), subordinada arena fina superior (0.17-0.25 mm), y muy subordinada arena mediana superior (0.35-0.50 mm). Los granos son subesféricos y subredondeados. Presenta buena a moderada selección. No se observan minerales accesorios. El color en seco es naranja muy pálido (10YR 8/2). Media: 0.270 mm. Mediana (percentil 50): 0.261 mm.

Arena natural C: la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo hialino, naranja pálido y naranja amarillento. El tamaño dominante es arena fina superior (0.177-0.25 mm), subordinada arena fina inferior (0.125-0.177 mm), y muy subordinada arena mediana inferior (0.25-0.35 mm). Los granos son subesféricos y subredondeados. Presenta buena a moderada selección. No se observan minerales accesorios. El color en seco es naranja muy pálido (10YR 8/2). Media: 0.211 mm. Mediana (percentil 50): 0.207 mm.

El siguiente gráfico muestra la moda (tamaño de grano que corresponde a la mayor frecuencia) de cada muestra pre-inyección:



Figura 5. Este gráfico muestra la moda (tamaño de grano que corresponde a la mayor frecuencia) de cada muestra pre-inyección.

3.1.2 Agentes de sostén post-inyección:

Flowback sample 1 (08/01/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Muy escasos líticos castaños. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm), subordinada arena fina superior (0,177-0,250 mm). Muy subordinada arena muy fina superior y media inferior. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos. La selección de la muestra es moderada. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 7/2). Se observan granos fracturados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Se reconocen posibles cerámicos partidos. Media: 0.170 mm. Mediana (percentil 50): 0.166 mm.

Flowback sample 2 (12/01/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Muy escasos líticos castaños. El tamaño de grano en la población dominante arena fina superior (0,177-0,250 mm), subordinada arena media inferior (0,250-0,350 mm) y arena fina inferior (0,125-0,177 mm). Muy subordinados arena muy fina. Muy subordinada arena muy fina superior y media inferior. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos. La selección de la muestra es moderada. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 7/2). Se observan granos fracturados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Se reconocen posibles cerámicos partidos. Media: 0.203 mm. Mediana (percentil 50): 0.202 mm.

Flowback sample 3 (16/01/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Muy escasos líticos castaños. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm), subordinada arena muy fina superior (0,088-0,125 mm). Muy subordinada arena muy fina inferior (0,062-0-088 mm). Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 7/2). Se observan granos fracturados, microfracturas internas y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Se reconocen posibles cerámicos partidos. Media: 0.136 mm. Mediana (percentil 50): 0.132 mm.

Flowback sample 4 (21/01/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Muy escasos líticos castaños. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm) y muy fina superior (0,088-0,125 mm), subordinada arena media inferior (0,250-0,350 mm), muy subordinada arena muy fina inferior y fina superior. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 7/2). Se observan granos fracturados, microfracturas internas y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Se reconocen posibles cerámicos partidos. Media: 0.134 mm. Mediana (percentil 50): 0.128 mm.

Flowback sample 5 (28/01/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Muy escasos líticos castaños. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm), subordinada muy fina superior (0,088-0,125 mm). Subordinada arena muy fina inferior y fina superior. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos a subredondeados. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 7/2). Se observan granos fracturados, con microfracturas y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Se reconocen posibles cerámicos partidos. Media: 0.155 mm. Mediana (percentil 50): 0.156 mm.

Flowback sample 6 (04/02/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Muy escasos líticos castaños. El tamaño de grano en la población dominante es arena muy fina superior (0,088-0,125 mm) y muy fina inferior (0,062-0,088mm), subordinada arena fina inferior (0,125-0,177 mm). Escasos granos tamaño limo. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos a subredondeados. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 7/2). Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.114 mm. Mediana (percentil 50): 0.102 mm.

Flowback sample 7 (06/02/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Muy escasos líticos castaños. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm) y muy fina superior (0,088-0,125 mm), subordinada arena fina superior (0,177-0,250 mm), presencia de arena muy fina y limo. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos a subredondeados. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 8/1). Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.133 mm. Mediana (percentil 50): 0.128 mm.

Flowback sample 8 (08/02/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 95% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Subordinados agentes cerámicos, tamaño arena mediana. Muy escasos líticos castaños. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm). Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos a subredondeados. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es amarillento pálido (10YR 6/2). Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.120 mm. Mediana (percentil 50): 0.127 mm.

Flowback sample 9 (23/02/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 97% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Subordinados agentes cerámicos, tamaño arena mediana inferior. Muy escasos líticos castaños. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm) y muy fina superior (0,088-0,125 mm), subordinada arena fina superior y muy fina inferior. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos a subredondeados. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 8/1). Se

observan abundantes esquirlas de las cañerías de perforación. Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.125 mm. Mediana (percentil 50): 0.125 mm.

Flowback sample 10 (25/02/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 97% de la muestra (hialino y muy subordinados anaranjado amarillento). Subordinados agentes cerámicos, tamaño arena mediana inferior. Muy escasos líticos castaños. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm), subordinada arena muy fina superior (0,088-0,125 mm) y arena fina superior (0,177-0,250 mm). Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos a subredondeados. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 8/1). Se observan abundantes esquirlas de las cañerías de perforación. Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.149 mm. Mediana (percentil 50): 0.144 mm.

Flowback sample 11 (27/02/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino). Muy subordinados agentes cerámicos, parcialmente fracturados (partidos), tamaño arena fina-muy fina. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina (0,125-0,250 mm), muy subordinada arena muy fina superior y mediana inferior. Los granos son subprismáticos a subesféricos y subangulosos a subredondeados. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 8/1). Se observan abundantes esquirlas de las cañerías de perforación. Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.176 mm. Mediana (percentil 50): 0.177 mm.

Flowback sample 12 (04/03/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino). Muy subordinados agentes cerámicos, parcialmente fracturados (partidos), tamaño arena fina-muy fina. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena muy fina superior (0,088-0,125 mm) y fina inferior (0,125-0,177 mm), subordinada fina superior (0,177-0,250 mm). Los granos son subprismáticos y subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 8/1). Se observan abundantes esquirlas de las cañerías de perforación. Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.139 mm. Mediana (percentil 50): 0.132 mm.

Flowback sample 13 (07/03/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino). Muy subordinados agentes cerámicos, parcialmente fracturados (partidos), tamaño arena fina-muy fina. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena muy fina superior (0,088-0,125mm) subordinada arena fina inferior (0,125-0,177 mm), muy subordinada arena muy fina inferior (0,062-0,088mm) y fina superior (0,177-0,250 mm). Los granos son subprismáticos y subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 8/1). Se observan abundantes esquirlas de las cañerías de perforación. Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.126 mm. Mediana (percentil 50): 0.122 mm.

Flowback sample 14 (10/03/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 98% de la muestra (hialino). Muy Subordinados agentes cerámicos, parcialmente fracturados (partidos), tamaño arena fina-muy fina. Se observan minerales pesados no identificados. El tamaño de grano en la población dominante es arena muy fina superior (0,088-0,125mm) subordinada arena fina inferior (0,125-0,177 mm), y fina superior (0,177-0,250 mm). Presencia de arena muy fina inferior. Los granos son subprismáticos y subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris amarillento (5Y 8/1). Se observan abundantes esquirlas de las cañerías de perforación. Se observan granos fragmentados y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.135 mm. Mediana (percentil 50): 0.126 mm.

Flowback sample 15 (11/03/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 70% de la muestra y un 30% de cerámicos. No se observan minerales accesorios. El tamaño de grano en la población dominante es arena fina inferior (0,125-0,177 mm), subordinada fina superior (0,177-0,250 mm) y muy subordinada arena mediana inferior y presencia de arena muy fina. Los granos son subesféricos y subredondeados a subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es gris claro (N7). Media: 0.188 mm. Mediana (percentil 50): 0.191 mm.

Flowback sample 16 (25/03/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 85% de la muestra (hialino y anaranjado amarillento) y 15% cerámicos. No se observan minerales accesorios. El tamaño de grano en la población dominante de las arenas es arena muy fina inferior (0,062-0,088mm y muy fina superior (0,088-0,125 mm), subordinada arena fina inferior (0,125-0,177 mm) y granos tamaño limo. Los cerámicos presentan tamaño de arena mediana. Los granos son subprismáticos y subredondeados a subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es naranja grisáceo (10YR 7/4). Media: 0.100 mm. Mediana (percentil 50): 0.090 mm.

Flowback sample 17 (26/04/21): la textura general de la muestra es grano suelto. Está compuesta por granos de cuarzo predominantes, representando un 90% de la muestra (hialino y anaranjado amarillento) y 10% cerámicos. No se observan minerales accesorios. El tamaño de grano en la población dominante es limo (0,004-0,062 mm) y arena muy fina inferior (0,062-0,088mm), subordinada arena muy fina superior (0,088-0,125 mm). Los granos cerámicos presentan tamaño de arena mediana a fina. Los granos son subprismáticos y subredondeados a subangulosos. La selección de la muestra es buena. El color de la muestra es naranja muy pálido (10YR 8/2). Se observan abundantes esquirlas de las cañerías de perforación, granos desagregados. Se observan granos partidos y rasgos de abrasión. Sin reacción al HCl. Media: 0.066 mm. Mediana (percentil 50): 0.064 mm.

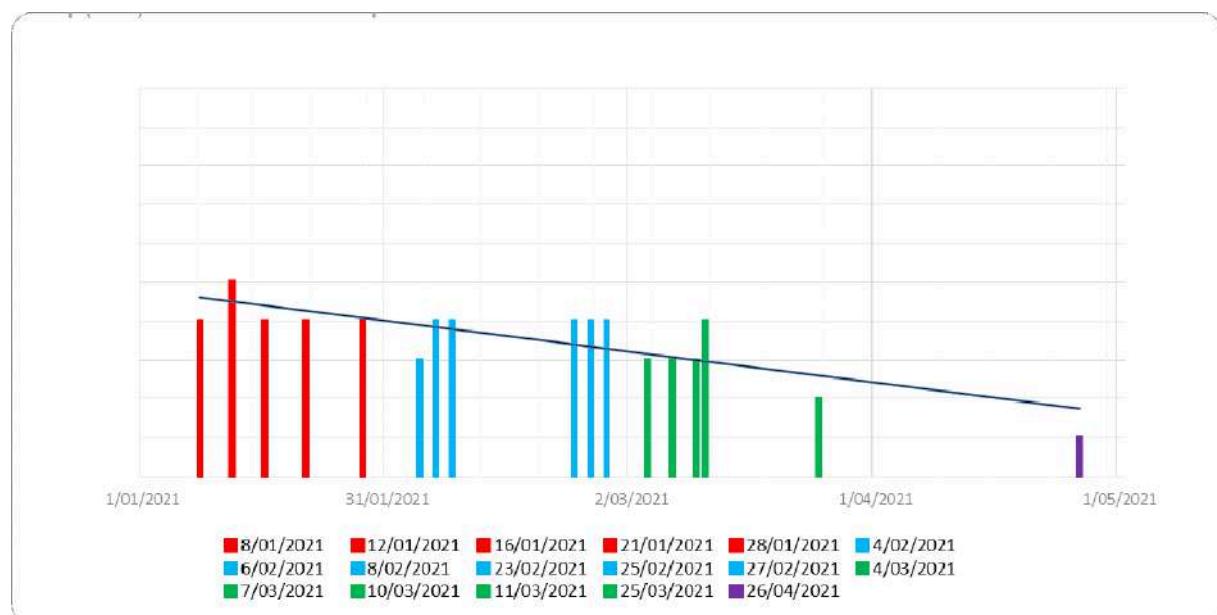


Figura 6. Este gráfico presenta la variación de la moda de cada muestra a lo largo del tiempo. El eje de las ordenadas representa la moda (tamaño de grano que corresponde a la mayor frecuencia) de cada muestra post-inyección. Mientras que el eje de abscisas corresponde al tiempo.

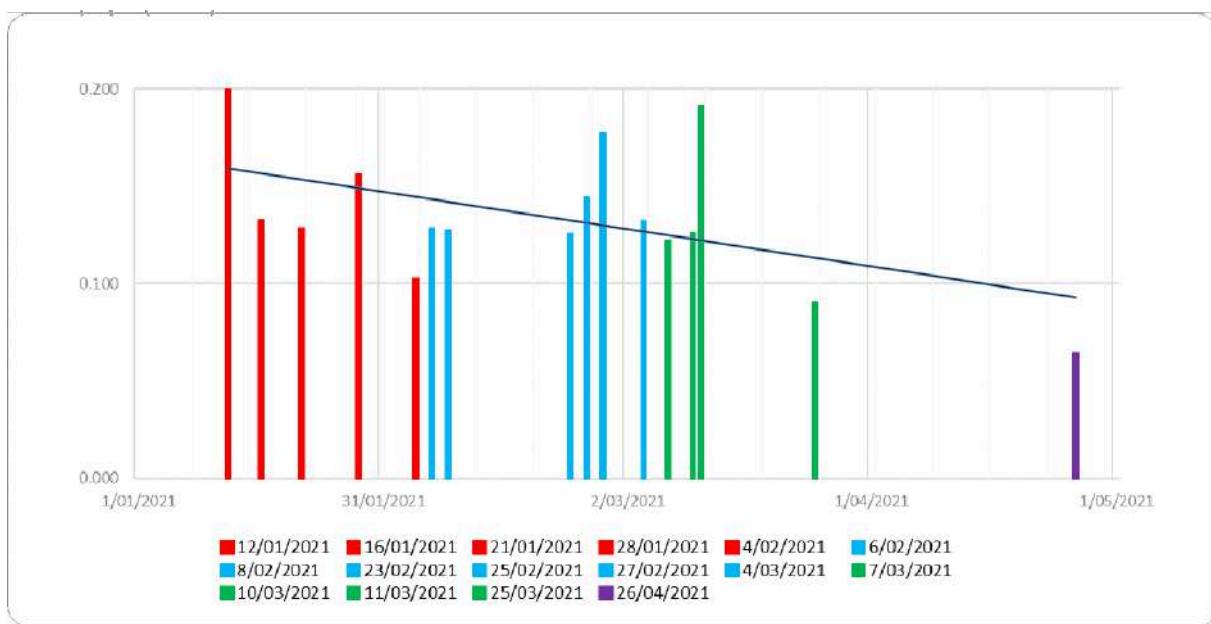


Figura 7. Este gráfico gráfico presenta la variación de la mediana (percentil 50 de la distribución del tamaño de grano) de cada muestra a lo largo del tiempo. El eje de las ordenadas representa la mediana (mm) de cada muestra post-inyección. Mientras que el eje de abscisas corresponde al tiempo.

Se observa una disminución de la moda y mediana de esta población de muestras a lo largo del tiempo.

La malla de tamiz estimada para estas muestras varía de 100 a 270 (ASTM).

En la siguiente figura se puede observar el impacto de la presión en los agentes de sostén:

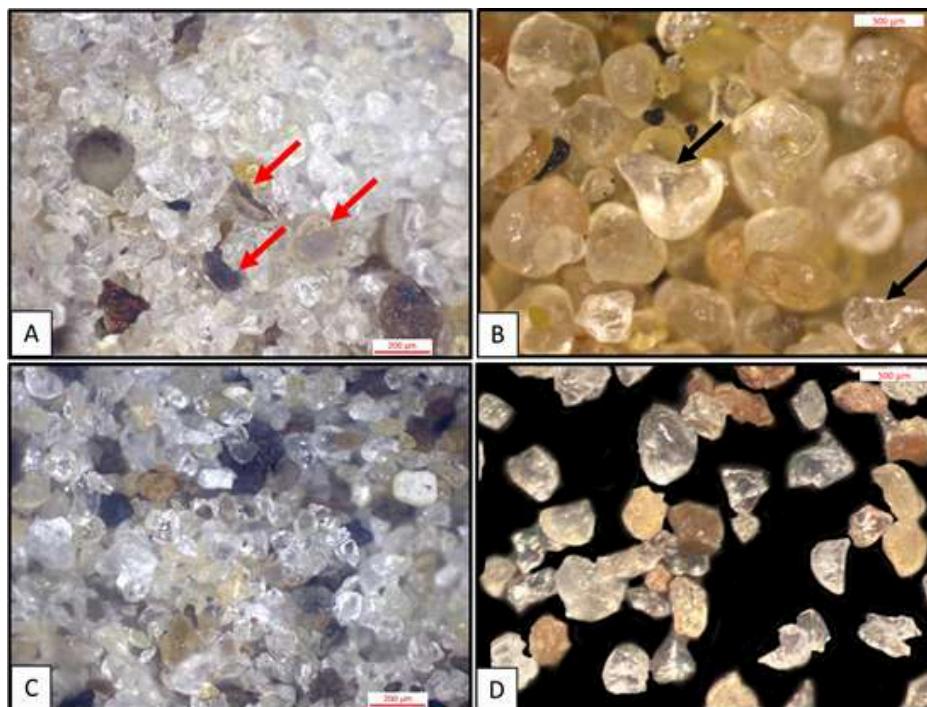


Figura 8. **A)** agentes cerámicos fragmentados en semiesferas (flechas rojas). **B)** granos de cuarzo fracturados (flechas negras). **C y D)** granos fragmentados.

Conclusiones

Del análisis de los resultados de este trabajo se surgen las siguientes conclusiones y consideraciones a futuro.

La moda y la mediana (percentil 50) granulométrica de cada muestra refleja una ligera disminución de esta variable a lo largo del tiempo. Los agentes de sostén pre-inyección presentan modas de arena mediana a arena fina y una mediana de 0.371 a 0.207 mm. Mientras que las muestras recuperadas más recientes presentan modas de arena muy fina a limo y la mediana varía entre 0.166 a 0.064 mm. En tal sentido, se observa que el efecto de las presiones a las que se somete el material genera modificaciones en el tamaño de grano.

A su vez, la disminución de tamaños se refleja en el tamaño de las mallas de tamices estimadas a partir de la granulometría. Para los agentes de sostén las mallas ASTM varían de 30 a 100. Mientras que las muestras recuperadas de 100 a 270.

Además de observar cambios en el tamaño de los granos. Se reconoce una variación en la forma de estos, particularmente en la redondez y esfericidad. Los agentes de sostén utilizados son esféricos a subesféricos y redondeados a subredondeados. En cambio, las muestras recuperadas más recientes presentan formas subprismáticas y subangulosas. Esto refleja un alejamiento de las formas esféricas a lo largo del tiempo.

Con respecto a los agentes de sostén artificial utilizados, se observa que la mayoría de los granos cerámicos recuperados se encuentran fragmentados, conformando semiesferas. Estos rasgos se observan desde la primera muestra utilizada.

Se observa que los agentes de sostén utilizados van perdiendo parcialmente las condiciones originales.

En resumen, los cambios observados en los agentes de sostén utilizados reflejan la aparición de granos más pequeños, lo cual conlleva una peor selección granulométrica, que impacta de manera negativa en la permeabilidad generada inicialmente. En consecuencia, la conductividad de la fractura hidráulica disminuye.

Se destaca la importancia de estudiar el comportamiento de los agentes de sostén a lo largo del tiempo.

El continuo estudio de esta temática permitirá conocer y entender de mejor manera el comportamiento de los agentes de sostén utilizados para la fracturación hidráulica, con el objetivo de mejorar la eficiencia en los procesos. Esto podría generar no solo una mejora en la producción de hidrocarburos sino una producción más limpia. De esta manera si el material utilizado es más eficiente se podría requerir menores cantidades. Por lo tanto:

La explotación de agentes de sostén naturales sería más eficiente y el impacto ambiental menor. Se generaría beneficios económicos ya que podrían reducir parcialmente costos de producción asociados (consumo, transporte, etc.)

Aumentaría la eficiencia en producción de hidrocarburos. Sin dudas, resulta desafiante alcanzar la excelencia de optimización de las prácticas aplicadas.

Por esto mismo, este trabajo innovador tiene la intención de ser un puntapié inicial para estudiar y contribuir al desarrollo energético eficiente de la Formación Vaca Muerta, considerando la importancia de esta para el crecimiento de Argentina.

Agradecimientos

Se agradece en particular al Licenciado Carlos Hernández, gran profesional, por brindar las muestras y permitir estudiarlas. a LCV S.R.L por darme un espacio de trabajo y brindar a mi disposición las herramientas necesarias. Un agradecimiento muy especial a mis directores, María L. Rodríguez Schelotto y Juan Manuel Reynaldi por su gran predisposición y colaboración desde el primer momento. Por último, a la dirección de la Especialización de Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos por haberse adaptado y sobrellevado de manera eficiente a la situación pandémica.

Referencias

- [1] S. A. Holditch, "Tight gas sands," *J. Petrol. Technol.*, vol. 58, no. 6, pp. 86-93, 2006.
- [2] S. A. Holditch, "Unconventional oil and gas resource development-Let's do it right," *J. Unconv. Oil Gas Resour.*, vol. 1, pp. 2-8, 2013.
- [3] L. Cabanillas, G. Carstens, J. P. Lovecchio, P. A. Marshall, L. Rebori, J. C. Soldo, and G. Vergani, "Hidrocarburos convencionales y no convencionales," *Asoc. Arg. Geól. Geof. Petróleo*, vol. 23, no. 134, pp. 41-48, 2013.
- [4] D. M. Jarvie, R. J. Hill, T. E. Ruble, and R. M. Pollastro, "Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment," *AAPG Bull.*, vol. 91, no. 4, pp. 475-499, 2007.
- [5] F. P. Wang et al., "Pore networks and fluid flow in gas shales," in *SPE Annu. Tech. Conf. Exhib.*, New Orleans, LA, USA, Oct. 2009.
- [6] R. J. Ambrose, R. C. Hartman, M. Diaz-Campos, I. Y. Akkutlu, and C. H. Sondergeld, "Shale gas-in-place calculations part I: new pore-scale considerations," *SPE J.*, vol. 17, no. 1, pp. 219-229, 2012.
- [7] G. E. King, "Thirty years of gas shale fracturing: what have we learned?," in *SPE Annu. Tech. Conf. Exhib.*, Florence, Italy, Sep. 2010.
- [8] R. O. Bello and R. A. Wattenbarger, "Rate transient analysis in naturally fractured shale gas reservoirs," in *CIPC/SPE Gas Technology Symp. Joint Conf.*, Calgary, AB, Canada, Jun. 2008.
- [9] C. E. Weaver, *Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina*, vol. 1. Seattle, WA, USA: Univ. Washington, 1931.
- [10] L. Legarreta and M. A. Uliana, "Jurassic—marine oscillations and geometry of Back-arc basin fill," in *Sedimentation, Tectonics and Eustasy: Sea-Level Changes at Active Margins*, IAS Spec. Publ. 12, pp. 429-450, 1991.
- [11] M. A. Uliana and L. Legarreta, "Hydrocarbons habitat in a triassic-to-cretaceous sub-andean setting," *J. Petrol. Geol.*, vol. 16, no. 4, pp. 397-420, 1993.
- [12] R. M. Mitchum Jr. and M. A. Uliana, "Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences," in *Seismic Stratigraphy*, AAPG Memoir 26, ch. 15, 1985.
- [13] D. A. Kietzmann and V. V. Vennari, "Sedimentología y estratigrafía de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Berriasiano)," *Andean Geol.*, vol. 40, no. 1, pp. 41-65, 2013.
- [14] M. A. Uliana et al., "Estratigrafía y Geoquímica de las Facies Generadoras de Hidrocarburos," in *9º Congr. Explor. Desarroll. Hidrocarburos*, IAPG, Mendoza, Argentina, Nov. 2014, pp. 3-92.
- [15] C. L. Cipolla, N. R. Warpinski, M. J. Mayerhofer, E. Lolom, and M. C. Vincent, "The relationship between fracture complexity, reservoir properties, and fracture treatment design," in *SPE Annu. Tech. Conf. Exhib.*, Denver, CO, USA, Sep. 2008.
- [16] F. Achilli, G. Chao, D. R. Arce, Y. S. Perl, C. Hubans, and A. Lafram, "Método para calcular el volumen de roca estimulado (SRV) en la Fm. Vaca Muerta," 2019.
- [17] L. Riavitz et al., *Recursos hidrocarburíferos no convencionales shale y el desarrollo energético de la Argentina*. Buenos Aires, Argentina: EUDEBA, 2015.
- [18] V. F. Peñaranda, "Arenas más allá del acatamiento a las normas," *Petrotecnia*, vol. 3/14, pp. 66-81, 2014.
- [19] J. Kullman, "The complicated world of propante selection," *South Dakota Sch. Mines Technol.*, vol. 65, 2011.
- [20] J. Udden, "Mechanical composition of clastic sediments," *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 25, pp. 655-744, 1914.
- [21] C. K. Wentworth, "A scale of grade and class terms for clastic sediments," *J. Geol.*, vol. 30, pp. 377-392, 1922.
- [22] M. C. Powers, "A new roundness scale for sedimentary particles," *J. Sediment. Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 117-119, 1953.
- [23] R. R. Compton, *Manual of Field Geology*. New York, NY, USA: Wiley, 1962

AUTOR

Juan I. Cresta

Quilmes, Buenos Aires, Argentina.

juanicresta@gmail.com

<https://www.linkedin.com/in/juanignacio-cresta/>

Juan Ignacio Cresta es geólogo por la Universidad Nacional de La Plata, con especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Actualmente trabaja como geólogo semi-senior en GRUPO LCV, abocado al análisis y modelado de reservorios convencionales y no convencionales en Argentina, Perú, Ecuador y Colombia. Ha dictado cursos y talleres sobre sedimentología de subsuelo y caracterización de núcleos en Argentina, Perú y Ecuador, y cuenta con diversas publicaciones científicas enfocadas en la caracterización litológica y lito-mecánica de reservorios. Fue distinguido con el Premio Joaquín V. González a mérito académico y con una beca de terminalidad por YPF.

Caracterización petrofísica de la Formación Centenario como formación sumidero en un bloque de cuenca Neuquina

Marcia J. Faviana

Resumen

El presente artículo tiene como principal objetivo realizar una caracterización petrofísica de la Formación Centenario con la finalidad de analizar cuáles son sus aptitudes como formación disposal. En otras palabras, se pretende identificar los niveles reservorios más adecuados para recibir las aguas residuales provenientes de la producción de la actividad petrolera desarrollada en el área de estudio.

Palabras clave: Modelo petrofísico; Formación Centenario; Pozo sumidero.

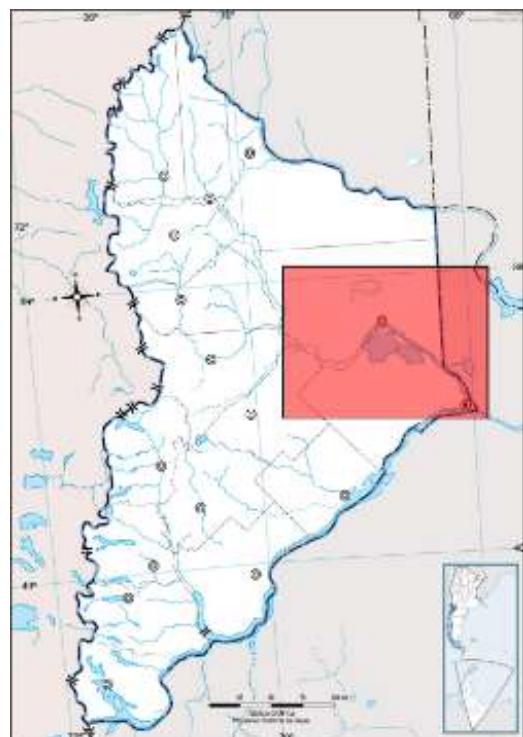
Abstract

The main objective of this article is to perform a petrophysical characterization of the Centenario Formation in order to analyze its suitability as a disposal formation. In other words, the objective is to identify the most suitable reservoir levels for receiving wastewater from the oil production activities carried out in the study area.

Keywords: Petrophysical model; Centenario Formation; Disposal well.

1. Introducción

El área de estudio, con una superficie de 148 km², corresponde a un bloque de concesión de la cuenca Neuquina, ubicado en la provincia de Neuquén (Figura 1. Ubicación del área de estudio).



El bloque de concesión de interés cuenta con más de 130 pozos activos en producción y, actualmente, presenta un amplio plan de desarrollo. Como se sabe, la producción de hidrocarburos tiene agua asociada, principalmente vinculada con los volúmenes utilizados para realizar las fracturas hidráulicas. Este agua, conocida en la industria petrolera como agua de flowback, requiere de una disposición final. El presente trabajo evalúa a la Formación Centenario como posible formación sumidero, de manera de constituir una alternativa frente al futuro incremento de agua de flowback en este bloque de explotación.

Figura 1: Ubicación del área de estudio. El bloque de concesión de interés se encuentra dentro del polígono rojo.

Debido a que la Formación Centenario no reviste interés hidrocarburífero -no se sacrificarían reservas, sumado a la buena calidad de reservorios comprobada en otras posiciones de la cuenca [5], representa un buen candidato para funcionar como formación disposal. A su vez, el agua de formación, en la zona de estudio, posee alto tenor salino (más de 130000 ppm) por lo que no resulta apta para consumo humano, ganadero ni uso agrícola.

2. Marco Geológico

La cuenca Neuquina, limitada al oeste por el cordón andino y al este por el Bloque de la Sierra Pintada (noreste) y el Macizo Nordpatagónico, registra una columna sedimentaria de más de 6000 metros de espesor de rocas marinas y continentales que abarcan desde el Triásico Superior al Paleoceno [16].

La Formación Centenario surgió en los 80' como una unidad conformada mayormente por depósitos clásticos continentales, que abarcaba cronológicamente un intervalo más amplio que la Formación Agrio [13]. Di Gregorio y Uliana [11] propusieron que la sucesión "detritica" de la Formación Centenario era equivalente a gran parte del Ciclo Ándico y por lo tanto incluía desde depósitos tan antiguos como el actual Grupo Mendoza Inferior (Loma Montosa y equivalentes) hasta tan jóvenes como la Formación Rayoso. Sin embargo, posteriores investigaciones limitaron a la Formación Centenario como equivalente lateral de la Formación Agrio [26] (Figura 2: Esquema cronoestratigráfico para las formaciones Mulichinco, Agrio, Huitrín y Rayoso).

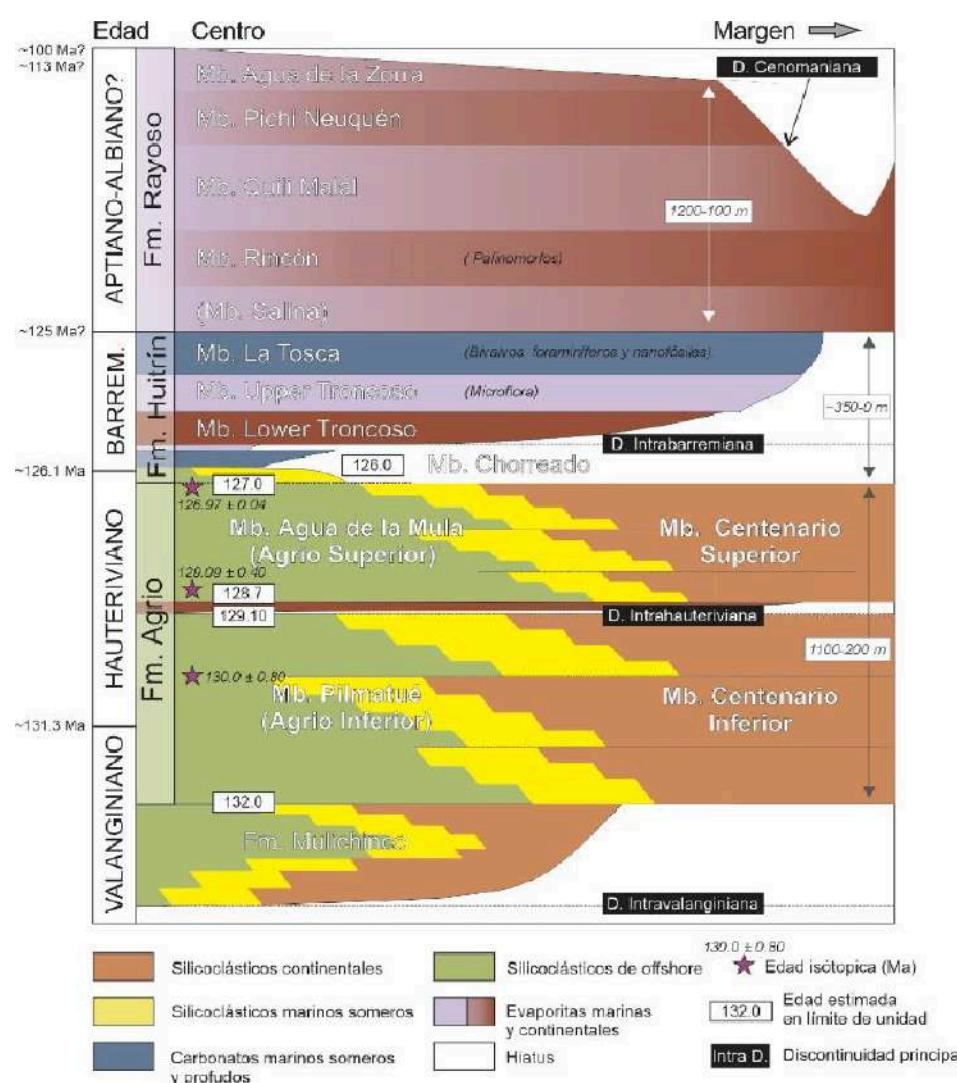


Figura 2: Esquema cronoestratigráfico para las formaciones Mulichinco, Agrio, Huitrín y Rayoso (y sus respectivas unidades internas) modificado de Schwarz et al. [24]. Se indica también las principales discontinuidades y una estimación de espesores máximos en centro de cuenca y su reducción hacia los márgenes. Tomado de Echeverría et al. [13].

2.1 Litoestratigrafía

La Formación Centenario integra la sección superior del Grupo Mendoza, abarcando la sedimentación del intervalo Valanginiano superior-Aptiano inferior. Constituye una unidad netamente de subsuelo, de hasta 1000 metros de espesor, definida por Di Gregorio [12] para englobar a potentes secuencias de sedimentos terígenos clásticos rojizos distribuidos ampliamente en los sectores Central y de Plataforma de la Cuenca Neuquina.

La Formación Centenario está subdividida en dos miembros (Mb). Por un lado, el Mb Inferior (Valanginiano superior-Hauteriviano inferior) se caracteriza por una alternancia de areniscas y pelitas. Echeverría et al. [13] establecen que, en base a la integración de perfiles y cutting, gran parte de las sucesiones arenosas pueden corresponder a rellenos de canales ya netamente fluviales o porciones bien proximales de las planicies deltaicas, en tanto los intervalos finos podrían corresponder a depósitos de planicies fluviales de inundación. El tope del Mb Inferior está marcado por una importante caída del nivel del mar en el Hauteriviano, representada como una discordancia regional (Figura 3: Transecta de correlación entre Rincón del Mangrullo por el este y la localidad Agrio del Medio (ADM) por el oeste). En otras posiciones de la cuenca, fuera del área de estudio, esta discordancia está evidenciada por la presencia de los depósitos eólicos del Mb Avilé de la Formación Agrio.

Por su parte, el Mb Superior (Hauteriviano Inferior), ubicado por encima de la discordancia intra-hauteriviana, está formado por paquetes de areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados intercalando con sucesiones pelíticas abundantes, que se traducen en una disminución del NTG (Net to Gross) de oeste a este. Se inicia con un nivel pelítico, consecuencia de una transgresión marina, lo que hace sencilla su identificación en los registros eléctricos. Sin embargo, esa situación no puede trasladarse hacia los sectores orientales, ya que las facies finas equivalentes representan depósitos marinos marginales o netamente continentales [13]. Desde el punto de vista paleoambiental, estos autores plantean que se habrían dado las condiciones para disparar la generación de sistemas aluviales con mayor disponibilidad, o posibilidad de transportar y acumular, material gravoso.

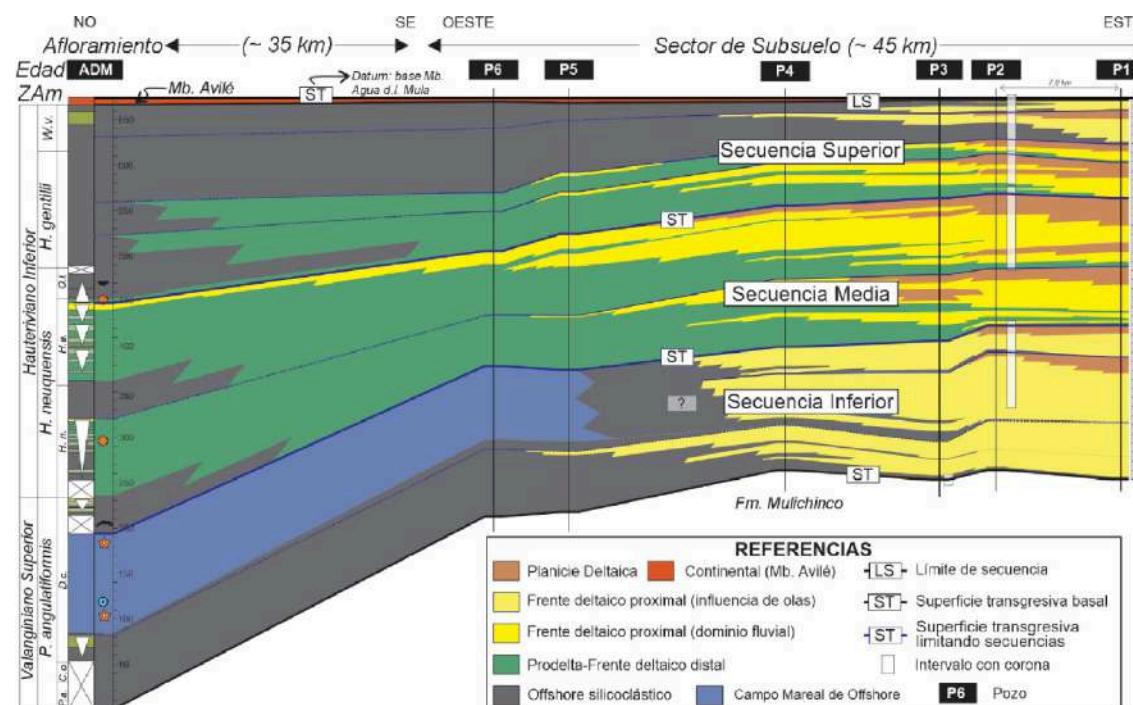


Figura 3: Transecta de correlación entre Rincón del Mangrullo por el este y la localidad Agrio del Medio (ADM) por el oeste, mostrando la distribución de asociaciones de facies, principales sistemas de acumulación interpretados y las tres secuencias principales identificadas dentro del intervalo de estudio Mb Pilmatué-Agrio Inferior- Centenario Inferior. Tomado de Schwarz y Veiga [23].

2.2 Marco Estructural

La evolución estructural de la cuenca Neuquina está marcada por numerosas fases diastróficas de diferente magnitud, cambios del nivel de base vinculados al eutanismo global o desvinculaciones temporales de la cuenca con el mar abierto [18]. Particularmente, este trabajo se enfocará en aquellas que pudieran afectar a la Formación Centenario.

Este capítulo está orientado a buscar la estabilidad estructural, ya que el principal objetivo de este trabajo es localizar zonas en las que, además de sus aptitudes como roca reservorio, la Formación Centenario tenga cualidades estructurales que le confieran continuidad lateral a los sellos y desvinculación con niveles someros con interés hidrogeológico (Grupo Neuquén y depósitos cenozoicos). En otras palabras, se hace foco en encontrar ausencia de fallas que pudieran romper los sellos pelíticos y comunicar la Formación Centenario con niveles más jóvenes.

Maretto et al. [18] analizaron, desde el punto de vista estructural, la sísmica del Dorso de los Chihuidos, el Alto de Sauzal Bonito-Loma La Lata y Sierra Barrosa-Barrosa Norte; los dos últimos resultan de interés por encontrarse cercano al área de estudio. Los autores no detectaron variaciones de espesor en la Formación Centenario (y Formación Rayoso) que evidencien actividad tectónica intensa durante su depositación, conservando ambas su geometría de cuña hacia el centro de cuenca. Para la zona de Sierra Barrosa, mencionan que, aunque la deformación continúa hasta la base del Gr. Rayoso [9], ésta fue de menor velocidad y mucho más sutil que la observada para las formaciones del Grupo Cuyo, ya que tanto la Formación Centenario como la Formación Rayoso mantienen una tabularidad y espesores casi constantes. En este sentido, concluyen que es muy posible que no existiesen estructuras con cierre en cuatro direcciones para las unidades del Cretácico Superior (Formaciones Centenario/Agrio, Rayoso y Gr. Neuquén) al momento de expulsión desde la Formación Vaca Muerta, y que se debería principalmente a la escasa actividad tectónica que caracterizó este lapso de tiempo, por lo que el entrampamiento en estas unidades sería altamente dependiente de condiciones estratigráficas. Aunque el análisis de estos autores está orientado a la localización de potenciales trampas para albergar el hidrocarburo expulsado desde la roca madre (Formación Vaca Muerta), se destaca la falta de estructuración y ausencia de fallas que atraviesen la formación de interés en el sector analizado.

Por su parte, Aregui [2] describe que los movimientos Intrasenonianos representan una importante reactivación tectónica, que clausura definitivamente la conexión con el océano Pacífico. Los viejos lineamientos heredados vuelven a activarse con variado grado de inversión tectónica de acuerdo con la intensidad y orientación de los vectores de deformación en cada área.

Por otro lado, es reconocido que los últimos pulsos de estructuración tendrían lugar durante el Terciario (Neógeno), relacionados a la tectónica andina, por lo que las mineralizaciones documentadas en la Formación Centenario, se encuentran vinculadas a posiciones donde se desarrollan yacimientos en unidades jurásicas y cretácicas subyacentes, y su carga está relacionada con la rotura de sellado por fallamiento terciario que permitió la migración de hidrocarburos de los reservorios profundos a estos niveles [18]. Este es el caso del área Río Colorado [7], en donde las fallas actuaron como carriers desde las formaciones Loma Montosa y Mulichinco hacia la Formación Centenario, y que además, en contadas ocasiones las fallas afectan a las sedimentitas continentales del Grupo Neuquén [6]. En contraparte, Berdini et al. [3] señalan que, en posiciones más australes (cercanas a la zona de estudio del presente trabajo), no se han identificado registros que permitan documentar la influencia de las etapas ulteriores de la Orogenia Andina. Sin embargo, Arregui [2] no descarta que los movimientos Andinos hayan alcanzado a las estructuras del flanco oriental de la cuenca, de manera más atenuada, produciendo solo suaves modificaciones en el relieve de las trampas y contribuyendo probablemente a la remigración y fuga parcial

en acumulaciones previamente constituidas y/o a la creación de una nueva fase de expulsión y migración que alimentó las trampas generadas o contribuyó al llenado de otras. No obstante, en el área de estudio no se han detectado evidencias de hidrocarburos por encima de la Formación Mulichinco, lo que refutaría en cierta medida, la presencia de fallas tipo carriers.

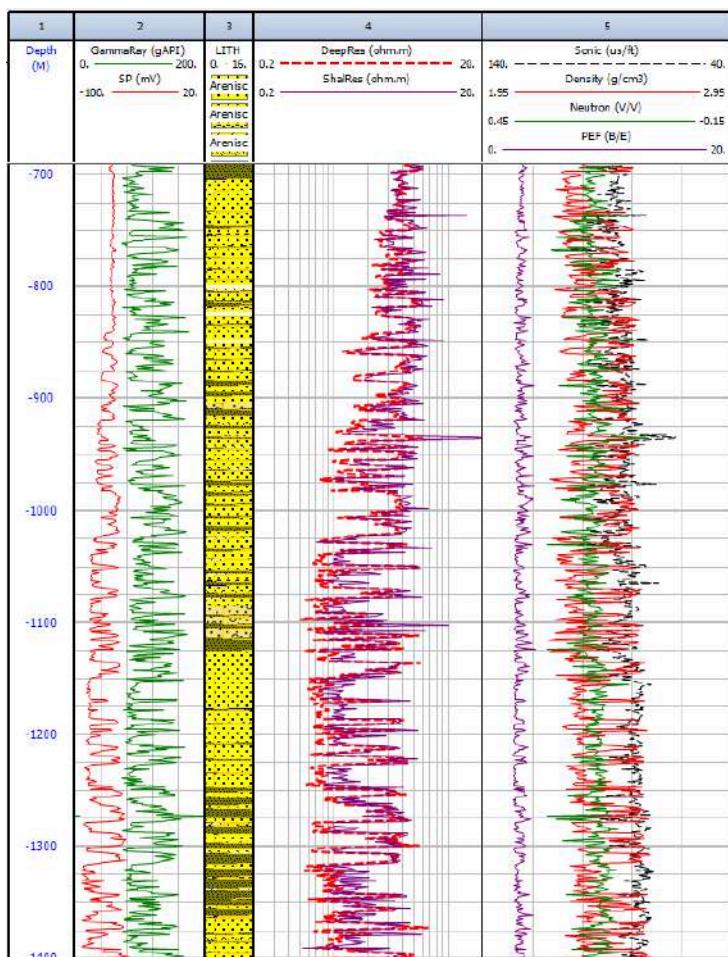
Cristallini y Olmos [10] observan dos poblaciones principales de fallas normales (NO-SE y NNE-SSO) con rechazos que pueden llegar a algunas decenas de metros, y que atraviesan las unidades jurásicas y cretácicas inferiores. Si bien el alcance de este estudio está enfocado para los niveles reservorio de las formaciones Punta Rosada y Lajas, queda claro que se encuentran íntimamente controladas por reactivaciones (desde el Jurásico Inferior hasta el Cretácico Inferior) de estructuras antiguas precuyanas. Dicho esto, se abre la posibilidad de encontrar fallas que pudieran afectar a la Formación Centenario.

Los antecedentes recabados indican que la Formación Centenario estuvo sometida a una baja intensidad tectónica, debido a la preservación de los espesores y continuidad lateral observada a escala regional. Sin embargo, existen sectores de la cuenca en los que la inversión tectónica de estructuras antiguas y la Orogenia Andina generaron fallamiento que afectaron localmente a la Formación Centenario.

Por su parte, Ranalli [21] visualiza tabularidad de los reflectores sísmicos identificados de la Fm. Centenario y escasa a nula presencia de fallas en el área de estudio. De todas formas, sería conveniente profundizar el análisis, enfocándolo en la identificación de sellos, poniendo énfasis en la relación entre las fallas, los sellos regionales y las formaciones suprayacentes, que excede los alcances del presente trabajo.

3. Modelo petrofísico de la Formación Centenario

La construcción del modelo petrofísico se basó en la interpretación a través de perfiles a pozo abierto, apoyándose en las descripciones de cutting del control geológico y soportada por datos de roca (testigos laterales rotados) de un campo análogo cercano al área de estudio.



3.1 Información disponible

El área de estudio cuenta con más de 300 pozos perforados en total, de los cuales solo 73 de ellos cuentan con perfiles registrados en la Formación Centenario. En la figura 4 (Figura 4: Perfil tipo en el área de estudio) se muestra un pozo-perfil tipo.

Figura 4: Perfil tipo en el área de estudio. Track 1, profundidad en metros referidos al nivel del mar. Track 2, Potencial espontáneo SP (rojo) y rayos gamma GR (verde). Track 3, litología interpretada del control geológico. Track 4, resistividad profunda (rojo punteado) y somera (morada). Track 5, densidad (rojo), neutrón (verde), factor fotoeléctrico PEF (morado) y sónico (negro punteado).

En base a la distribución y tipo de set de perfiles disponibles, se jerarquizaron los pozos que conformaron el input para el modelo petrofísico. De esta manera, se priorizó aquellos pozos con el set más completo, y así, poder seleccionar la mejor opción en el caso de locaciones múltiples (2 o más pozos muy cercanos entre sí). Considerando lo expuesto previamente, se seleccionaron 50 pozos (de los 73) en los que se aplicó al modelo petrofísico.

3.1.1 Pozo llave

Se dispuso de un perfil de resonancia magnética nuclear y datos de laboratorio medidos en 11 testigos laterales en un área vecina. Se contó con datos de porosidad estándar y NOBP, presiones capilares por inyección de mercurio, petrografía y cortes delgados, y DRX (difracción de rayos X) en roca total y fracción arcilla. Esta información está consolidada en un único pozo, al que se llamará en adelante “pozo llave”, que cuenta además un set de perfiles completo (GR+SP+RES+DT+DEN+NEU) (Figura 5: Set de perfiles disponibles en el pozo llave).

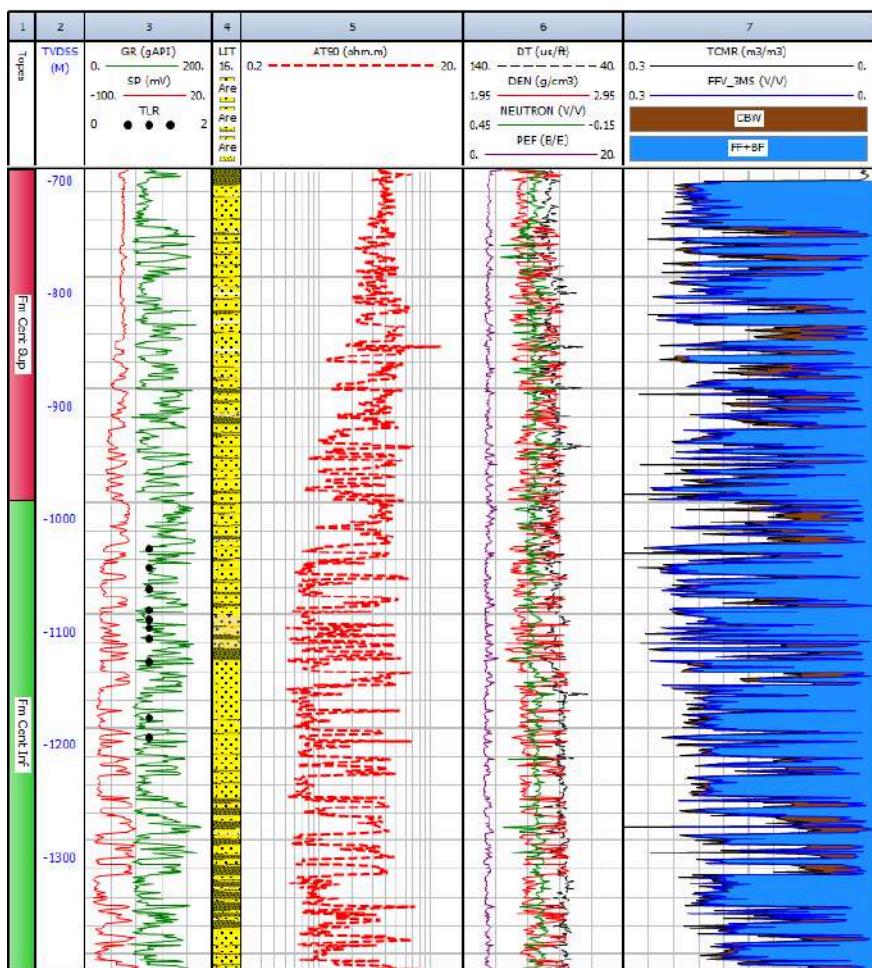


Figura 5: Set de perfiles disponibles en el pozo llave. Track 1, pasos formacionales. Track 2, profundidad en referidos al nivel del mar. Track 3, rayos gamma (verde), potencial espontaneo (rojo) y posición de los testigos rotados (puntos negros). Track 4, litología interpretada del control geológico. Track 5, resistividad profunda. Track 6, densidad (rojo), neutrón (verde), sónico (negra punteada) y factor fotoeléctrico (morado). Track 7, resonancia magnética nuclear; fluido libre (FF) + fluido capilar (BF) sombreado en celeste y fluido adherido a las arcillas en marrón.

Modelo litológico de la Formación Centenario

El modelo litológico se definió a partir de las descripciones de cutting de 20 pozos identificados en el área de estudio, y fue contrastada con petrografía, DRX y cortes delgados en muestra de roca del pozo llave.

Los perfiles de control geológico de los pozos analizados describen a la Formación Centenario como alternancia de conglomerados, areniscas, areniscas conglomerádicas y areniscas arcillosas, que intercalan con limoarcilitas con inclusiones arenosas finas.

Los conglomerados son de color gris a castaño claro, fino, compuestos por cuarzo, abundantes líticos anaranjados, verdosos, castaños y grisáceos. Se observa pobre selección y poco consolidado.

Las areniscas medianas también son grises a castañas claras, mayormente cuarzosas, con líticos anaranjados y verdes, de regular a mala selección. La matriz es arcillosa y presenta escaso cemento calcáreo, ocasionalmente silíceo.

Las areniscas arcillosas tienen color castaño rojizo, grano fino a muy fino, buena selección y abundante matriz arcillosa.

Las areniscas conglomerádicas se ubican principalmente en el Miembro Superior de la Formación Centenario. Son de color castaño rojizo, presentan clastos partidos de cuarzo y líticos anaranjados. Presentan mala selección, y escasos cemento calcáreo y matriz arcillosa.

Por su parte, los resultados de laboratorio de los testigos laterales rotados obtenidos en el pozo Ilave muestran correspondencia con lo observado a través del cutting. En términos generales, se identificaron areniscas finas a gruesas, de moderada a buena selección, con bajo contenido de matriz (entre 1 y 4), bajo contenido de cemento (entre <1 y 8%, promedio 5%, excepcionalmente supera el 10%) y bajo contenido de arcillas (entre 3 y 9%, promedio 5%, excepcionalmente supera el 10%) (Fig. 11).

Los conglomerados identificados por control geológico no fueron muestreados por el sacatestigos a pozo abierto, por lo que no se cuentan datos de laboratorio para estas litofacies.

Desde el punto de vista composicional (Figura 6: Composición litológica y diagrama de QFL), se tratan de feldarenitas líticas (o litoarenitas feldespáticas). Similar composición fue descripta por Cabaleiro [4] para el

yacimiento Señal Cerro Bayo, donde identificó niveles reservorios compuestos por arenitas lítico-feldespáticas de granulometría fina y media, bien seleccionadas y con clastos subangulosos a subredondeados.

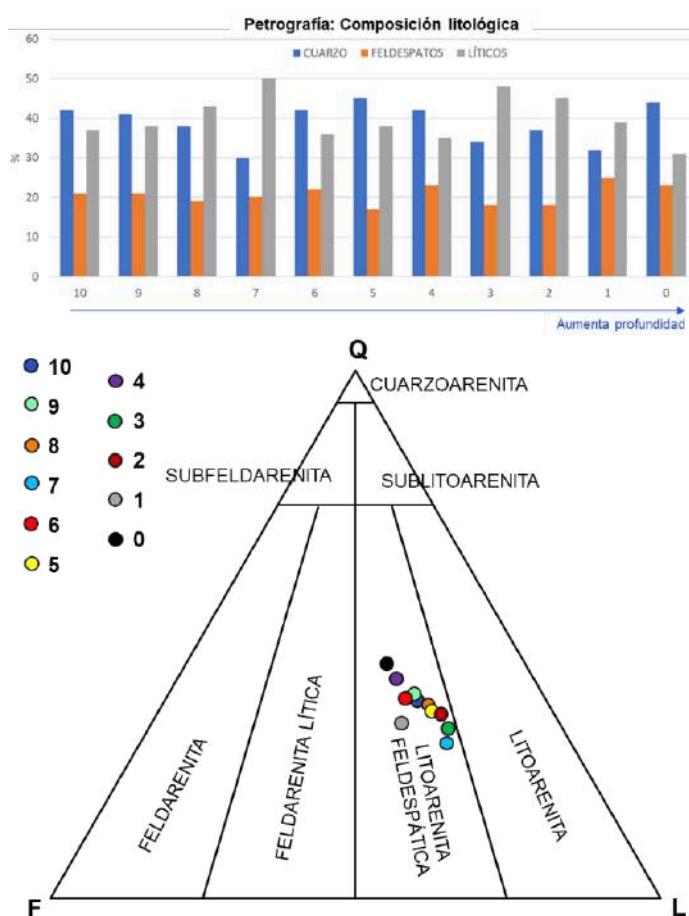


Figura 6: Composición litológica y diagrama de QFL (Folk et al. [15]). Los puntos de colores representan las muestras de roca de la Formación Centenario. Nótese que todas caen

dentro del campo de la "Litoarenita feldespática".

En concordancia con lo observado por petrografía, los ensayos de DRX en roca total muestran que predomina el cuarzo por sobre los feldespatos. Los feldespatos potásicos y las plagioclásas están presentes en semejante proporción. La calcita se encuentra en muy bajo porcentaje y predomina el cemento arcilloso. En cuanto al tipo de arcilla, predomina la caolinita por sobre illita y esmectita. En base a los datos analizados, se estima que la arcilla no es estructural ni forma parte de la matriz, sino que se encuentra en forma de cemento.

En conclusión, el modelo petrofísico se puede simplificar de la siguiente manera:



Dado que la Formación Centenario no presenta una complejidad litológica ni composicional, se plantea un modelo de roca arena-arcilla, en donde todo el sistema poral está saturado de agua.

Modelo de volumen de finos (Vsh)

El modelo de volumen de finos (Vsh) se generó a partir de las curvas de GR, SP y Densidad-Neutrón, en los casos que así fuera posible. Se generó una curva de salida por cada indicador de "arcillosidad" disponible, utilizándose el mínimo valor obtenido. Considerando que la Formación Centenario se caracteriza por una muy baja participación arcillosa (entre el 1% y el 8%, con valores máximos de 16%), se buscó el máximo acercamiento de la línea "clay" y de "clean" a los polos de las curvas utilizadas según cada modelo para poder replicar este rasgo litológico.

El modelo obtenido fue calibrado en el pozo Ilave, por un lado, con los datos de DRX de fracción arcilla, y por el otro, con una curva de volumen de arcilla (Vclay) calculada a partir de la curva de porosidad total y la curva de porosidad efectiva de la resonancia magnética nuclear (Figura 7: Calibración del modelo de volumen de finos en el pozo Ilave).

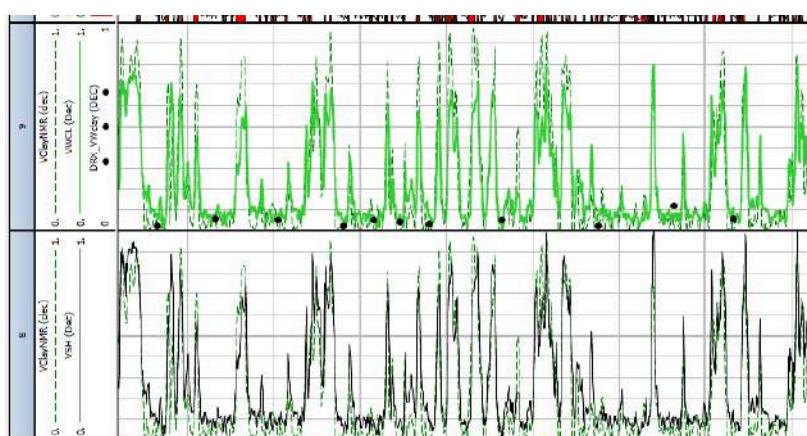


Figura 7: Calibración del modelo de volumen de finos en el pozo Ilave. Track 1, VSh volumen de finos (curva negra) y VClay volumen de arcillas calculado a partir de la resonancia (verde punteada). Nótese que VSh \geq VClay, aunque el modelo de finos no representa bien las capas con más de 70% de arcillosidad.

Track 2, volumen de arcillas calculado a partir de la resonancia (verde punteada), volumen de arcilla del modelo petrofísico (verde línea llena) y volumen de arcillas de los DRX de roca (puntos negros). Nótese la buena correlación entre los datos de laboratorio y el cálculo petrofísico.

En la figura 8 (Figura 8: Histograma de Volumen de finos) se muestra un histograma comparativo de la curva de volumen de finos calculado en los 50 pozos que conforman el modelo petrofísico, para la Formación Centenario Superior (arriba) e Inferior (abajo).

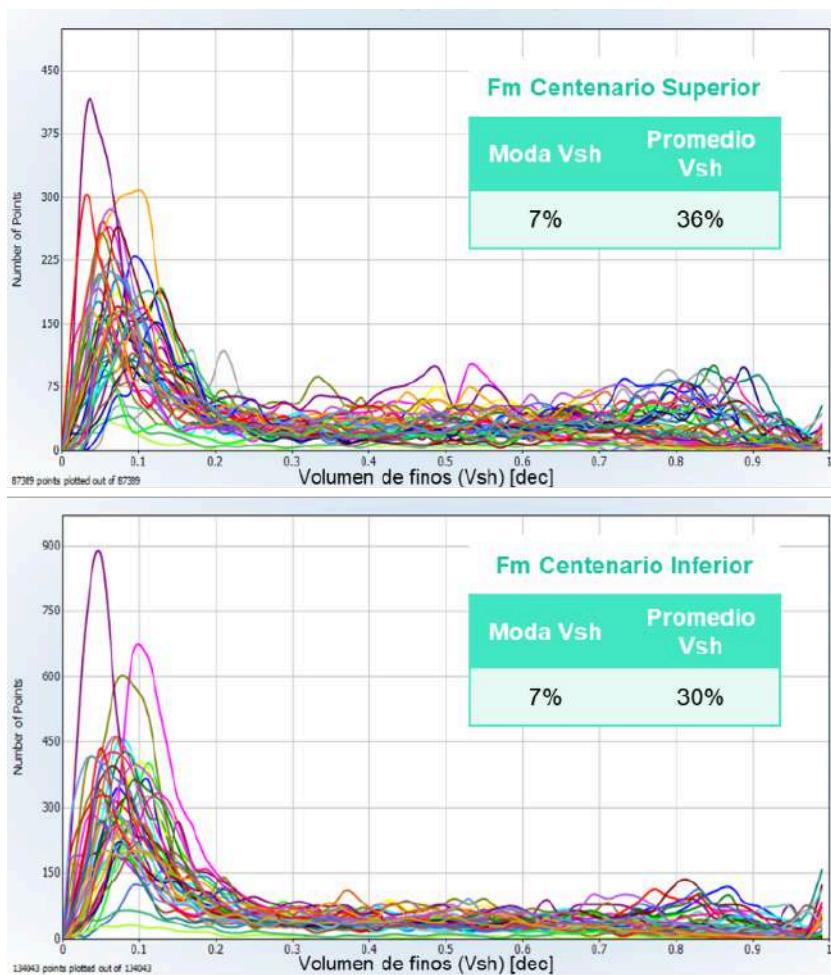


Figura 8: Histograma de Volumen de finos para la Formación Centenario Superior (arriba) e Inferior (abajo). Cada curva de color representa la curva del Vsh de un pozo del modelo.

3.4 Modelo de porosidad (PhiT y PhiE)

Se generaron dos modelos de porosidad según la disponibilidad y calidad de los registros, estableciendo en orden de prioridad:

1. Densidad
2. Sónico

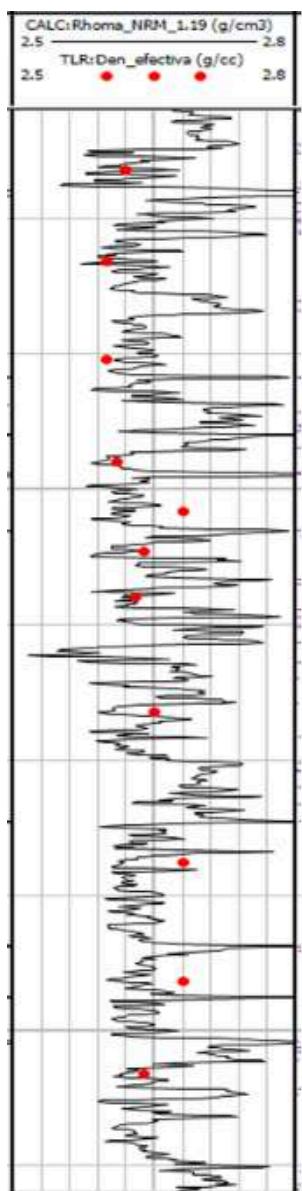
Tomando de referencia el pozo llave, el modelo sónico fue calibrado con el modelo de densidad y a su vez, este último fue calibrado con los datos de roca disponibles y con la curva de la porosidad total de la resonancia magnética nuclear.

Para establecer el valor de la densidad de matriz (ρ_{ma}) se contaron con los datos de laboratorio medidos en los testigos laterales del pozo llave. En la tabla N°1 (Tabla N°1: Densidad de grano medida en laboratorio) se

reportan los datos analizados. Por otro lado, se calculó la densidad de grano a partir de la curva de porosidad de la resonancia magnética (Figura 9: Estimación de la densidad de matriz). Los resultados del cálculo son congruentes con las mediciones de laboratorio, por lo que decidió utilizar un valor promedio de 2.63 gr/cm³ para la Formación Centenario (Figura 9: Estimación de la densidad de matriz).

Muestra	Densidad de grano (gr/cm ³)	Muestra	Densidad de grano (gr/cm ³)
10	2.62	4	2.63
9	2.6	3	2.65
8	2.6	2	2.68
7	2.61	1	2.68
6	2.68	0	2.64
5	2.64		
Promedio		2.639 g/cm ³	

Tabla N°1: Densidad de grano medida en laboratorio en los testigos laterales rotados obtenidos en el pozo llave.



$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{fl}}$$

Donde

ρ_b = densidad *bulk* (del registro)

ρ_{ma} = densidad de matriz (grano)

ρ_{fl} = densidad del fluido

$$\text{Se despeja } \rho_{ma}, \text{ quedando: } \rho_{ma} = \frac{(\phi \cdot \rho_{fl}) - \rho_b}{\phi - 1}$$

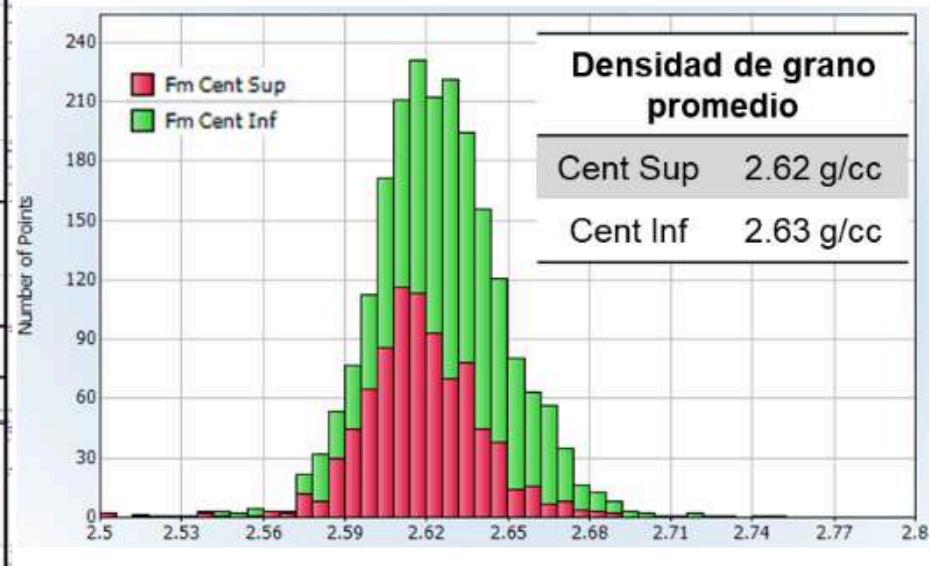


Figura 9: Estimación de la densidad de matriz (grano) con la curva de porosidad total de la resonancia (curva negra). pb corresponde a la lectura del perfil de densidad. pfl es la densidad del filtrado equivalente a 1.19 g/cm³. Comparación con los datos de laboratorio (puntos rojos). Se muestra el histograma de la curva de densidad de grano calculada, aplicando un discriminador (filtro) de Vsh < 20%.

En el caso del modelo sónico, se utilizó la ecuación Raymer-Hunt [22]. El tiempo de tránsito del “shale” se ajustó para cada pozo a partir de histogramas.

Para determinar el valor del tiempo de tránsito de la matriz (DT matriz), se buscó aquella que resultara en un mejor ajuste con la porosidad obtenida con el modelo de densidad y con la curva de porosidad de la resonancia magnética. Ello se logró utilizando un DT matriz de 54 $\mu\text{s}/\text{ft}$ para todo el intervalo de interés.

En la figura 10 (*Figura 10: Ajuste de modelo de porosidad*) se muestra la comparación de la porosidad del modelo de densidad con los datos de laboratorio, la curva de porosidad de la resonancia y la porosidad del modelo sónico. Nótese que se logró una muy buena correlación entre las cuatro medidas de porosidad, aunque salta a la vista que las muestras 10 y la 1 son las que presentan mayor desvío. Podrían ser intercalaciones o heterogeneidades que los perfiles eléctricos no logran resolver debido a su resolución vertical. En este sentido, las dos muestran presentan las menores porosidades de laboratorio, y a su vez, presentan mayor porcentaje de cemento. Resulta extraño que la muestra haya obtenido un 12% de porosidad medida, cuando ópticamente se ve muy cerrada. En el caso de la muestra 10 (*Figura 11: Corte delgado y detalle de la porosidad por petrografía, izquierda*), la petrografía, cortes y mediciones de porosidad son relativamente coherentes. Aunque quizás, viendo el corte delgado y la distribución de gargantas porales, uno esperaría menor porosidad. Resulta extraño que la muestra haya obtenido un 12% de porosidad medida, cuando ópticamente se ve muy cerrada. En el caso de la muestra 10 (*Figura 11: Corte delgado y detalle de la porosidad por petrografía, derecha*), llama mucho la atención que no se corresponda con el modelo de porosidad con perfiles eléctricos. Sería conveniente remediar esta muestra para asegurarse de que no sea un error del laboratorio.

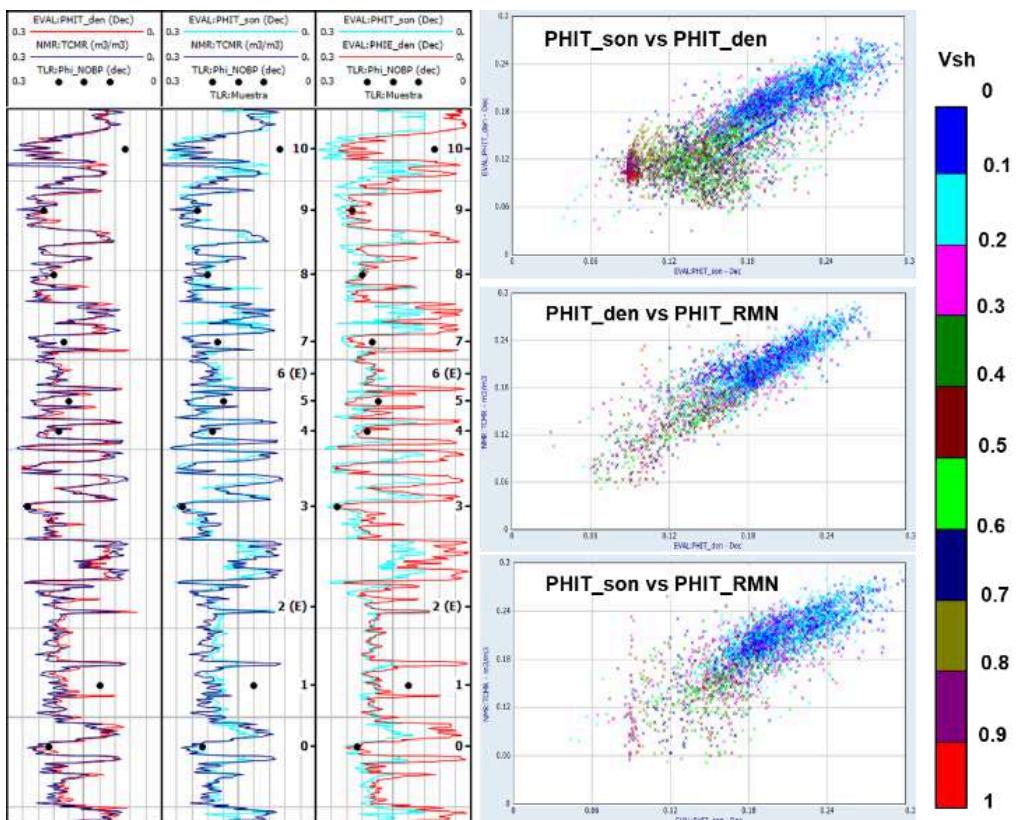


Figura 10: Ajuste de modelo de porosidad. De izquierda a derecha, curva de porosidad de la resonancia “TCMR” (azul) y porosidad total del modelo de densidad “PHIT_den” (roja); TCMR y porosidad total del

modelo sónico "PHIT_son" (celeste); y PHIT_den y PHIT_son. Datos de porosidad NOBP de laboratorio (puntos negros) en todos los tracks. Los crossplots de la derecha combinan los modelos de porosidad entre sí y con la porosidad de la resonancia. Se observa una buena correlación (1:1).

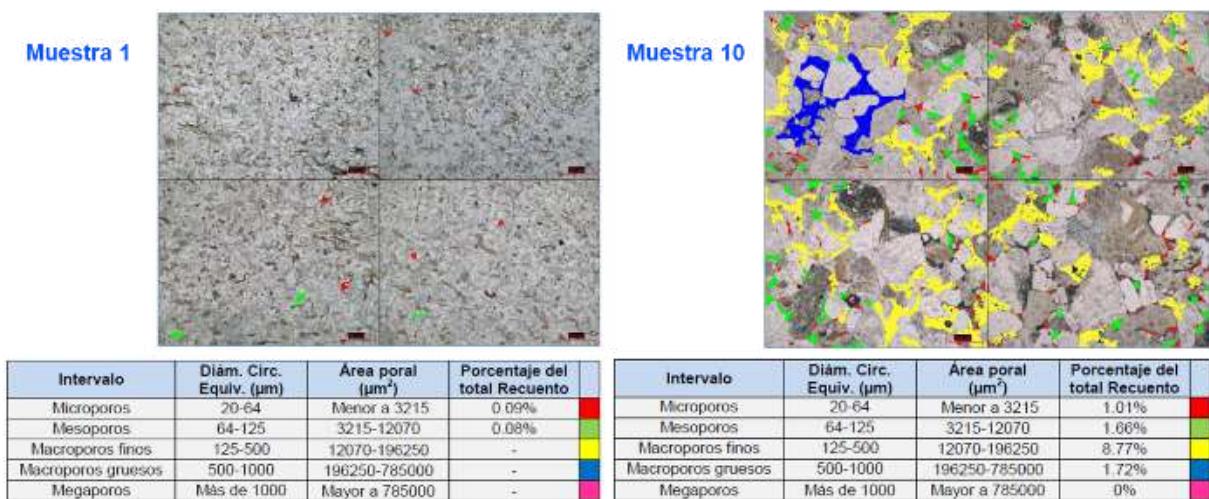


Figura 11: Corte delgado y detalle de la porosidad por petrografía de las muestras 1 (izquierda) y muestra 10 (derecha).

En la figura 12 (Figura 12: Histograma de porosidad efectiva para los niveles con $V_{sh} < 20\%$) se muestra un histograma comparativo de la curva de volumen de finos calculado en los 50 pozos que conforman el modelo petrofísico, para la Formación Centenario Superior (arriba) e Inferior (abajo).

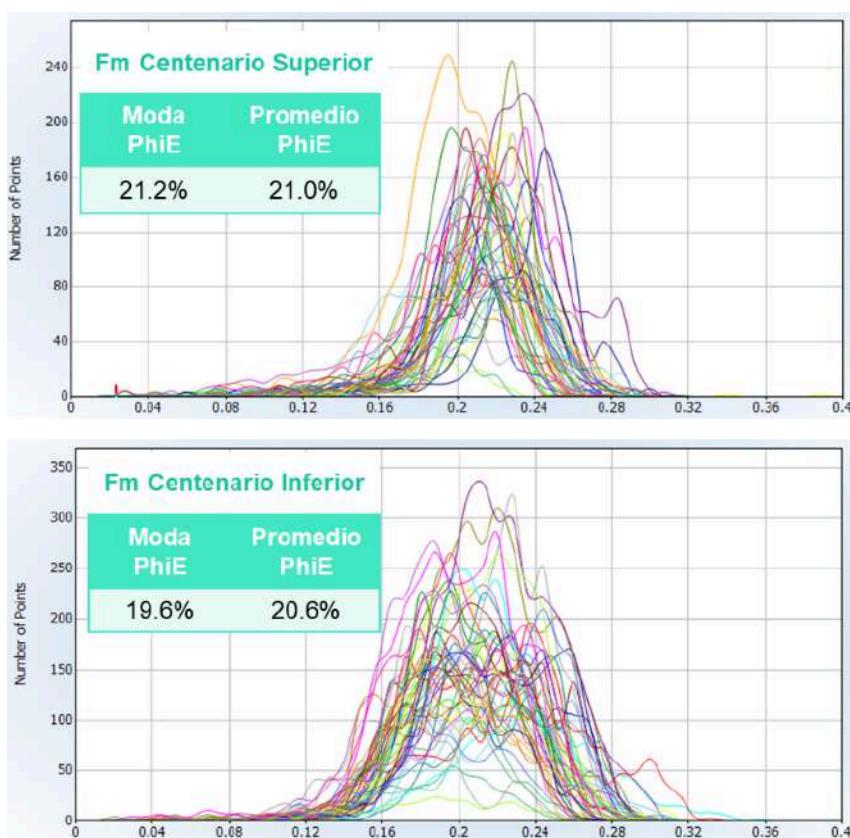


Figura 12: Histograma de porosidad efectiva para los niveles con $V_{sh} < 20\%$ de la Formación Centenario Superior (arriba) e Inferior (abajo). Cada curva de color representa la curva del PhiE de un pozo del modelo.

3.5 Sensibilidad de Cutoffs

Para establecer con mayor solidez cuáles son los valores de corte o cutoffs que se deberían aplicar al volumen de finos (V_{sh}) y porosidad efectiva (Φ_{ie}) para diferenciar las zonas reservorio de aquellas que no lo son, se realizó una sensibilidad de estos valores. Por supuesto que se entiende que los cutoffs no son valores arbitrarios, sino que parten de consensos o acuerdos que responden a la experiencia empírica de los parámetros de producción (o inyección en este caso particular). Pensando en un pozo sumidero, lo ideal sería poder asociar ciertas características petrofísicas (o combinación de estas) a un valor de caudal admitido, o definir cuál es el valor mínimo de V_{sh} y/o Φ_{ie} a partir del cual un reservorio tiene baja inyectividad. Este análisis se puede complementar con los perfiles de tránsito de fluido (inyección de trazadores, spinner o similares), que permiten conocer cuál es la distribución vertical de la inyección, es decir, miden cuánto caudal admite cada zona o nivel punzado. Lamentablemente, el área de estudio no tiene suficientes perfiles de este tipo para que tengan valor estadístico.

Igualmente se realizó una sensibilidad de cutoff para previsualizar cómo se modifica el espesor neto y poroso de reservorio según qué valor de corte se utilice. En la figura 13 (Figura 13: Sensibilidad de cutoffs) se observa un gráfico de variación del volumen de finos (arriba) y otro de la porosidad efectiva (abajo). Para el primer caso, la curva no es completamente asintótica, aunque a partir de $V_{sh} = 0.3$ (30%) el cambio de espesor neto no es significativo. Por otro lado, como se mencionó en secciones anteriores, la Formación Centenario tiene muy baja arcillosidad (< 5% promedio), por lo que un valor de corte de 30% resulta excesivamente elevado. Adicionalmente, hay cierta incertidumbre en la determinación de la cantidad de fluido capilar, como se explica más adelante, por lo que se considera que un cutoff de 26% de V_{sh} resulta conservador.

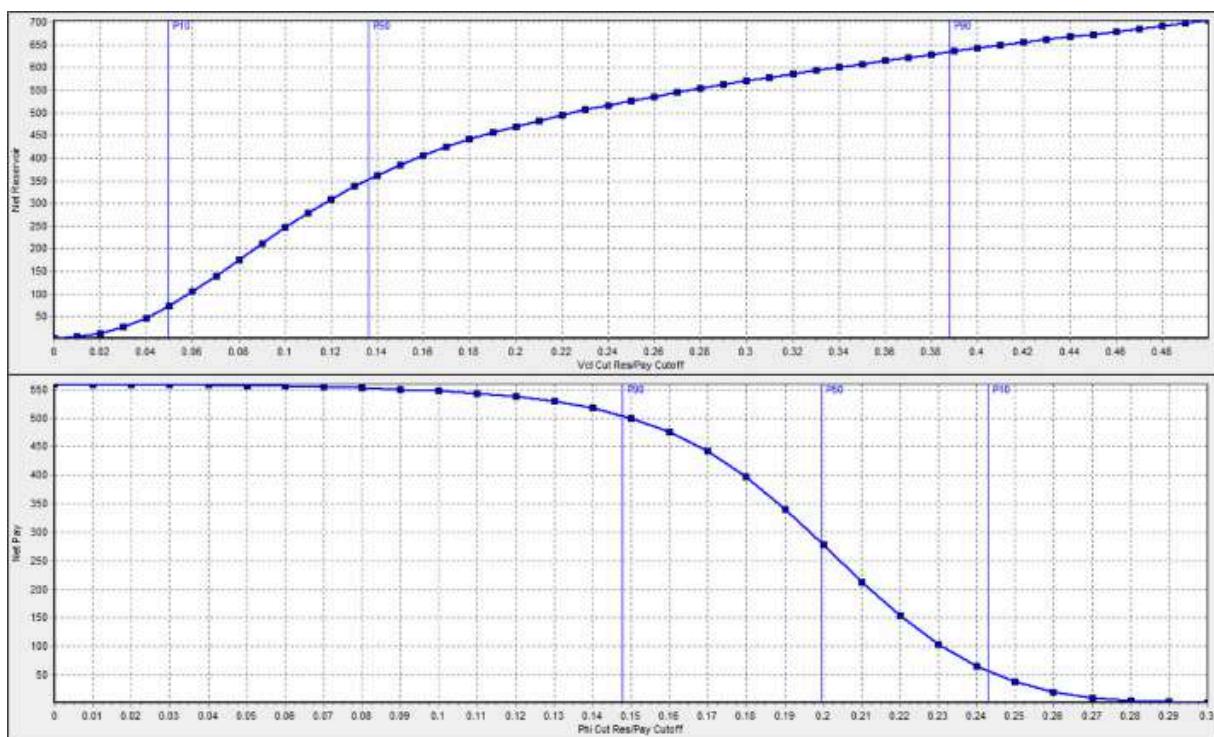


Figura 13: Sensibilidad de cutoffs. Arriba, impacto del valor de corte del volumen de finos en el espesor neto de reservorio (NetRes). Abajo, impacto del valor de corte de la porosidad efectiva en el espesor poroso de reservorio (NetPay).

En cuanto a la porosidad efectiva, la curva se hace asintótica en 12%, por lo que utilizar un cutoff de 15% parece razonable.

A modo de referencia, Carrizo et al. [6], para la Formación Centenario Inferior del yacimiento Volcán Auca Mahuida, ajustaron los valores de corte en 12% Phie y 50% de Vsh a través de datos de producción. En contraparte, Cabaleiro [4] menciona que, dada la escasa matriz arcillosa presente en las areniscas de la Formación Centenario en el yacimiento Señal Cerro Bayo, los cutoffs por “arcillosidad” empleados son bajos e incluso muchas veces descartados. La situación del área de estudio se parecería más a este último caso.

3.6 Resistividad del agua de formación - Modelo de Salinidad

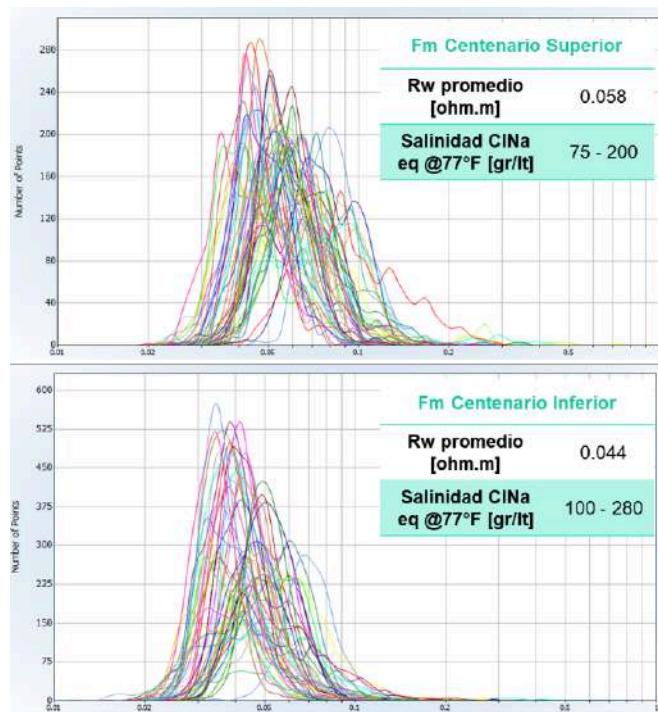
La resistividad del agua de formación es un parámetro que se puede estimar a través de la ecuación de saturación de Archie [1].

$$Sw = \sqrt[n]{\frac{a^*Rw}{\Phi^m * Rt}} \text{ en un medio 100% saturado en agua la fórmula queda como: } Rw = Rt * \Phi^m$$

Donde Sw es la saturación de agua,
 a = coeficiente de tortuosidad = 1,
 m = coeficiente de cementación = 2,
 n = exponente de saturación = 2,
 Rw = resistividad del agua de formación
 Rt = resistividad total (sistema roca).

Dado que no se cuentan con mediciones de laboratorio de los parámetros a (coeficiente de tortuosidad), m (coeficiente de cementación) y n (exponente de saturación), se utilizaron los valores estándar.

De esa manera, utilizando el módulo de cálculo del software de interpretación, se obtuvieron valores de resistividad del agua de formación a 77°F. La curva resultante se denomina “RwApp” (resistividad del agua de formación aparente). Se trata de una curva continua, es decir, el módulo de cálculo arroja valores de Rw sin discriminar zonas reservorios de las que no lo son: por eso es “aparente”. Frente a las capas que se interpretan “limpias” (bajo % de volumen de finos), la $RwApp$ será la resistividad real del agua de formación a la temperatura dada.



En términos generales, se observa un aumento natural de la resistividad del agua de formación conforme incrementa la profundidad, lo que se traduce en un suave gradiente de salinidad. Los histogramas de las figura 14 (Figura 14: Histograma de resistividad del agua) reflejan la variación de Rw para cada miembro de la Formación Centenario. Nótese la elevada salinidad del agua de formación, la cual varía entre 75 y 200 gr/lt para el miembro Superior, y entre 100 y 280 gr/lt para el miembro Inferior.

Figura 14: Histograma de resistividad del agua (Rw) de la Formación Centenario Superior (arriba) e Inferior (abajo), para los niveles con $Vsh < 26\%$ y $\Phi_{IE} > 15\%$. Cada curva de color representa la curva de Rw de un pozo del modelo. Los datos de la tabla se consideran a 77°F.

Modelo de permeabilidad

La permeabilidad es uno de los parámetros que va a condicionar la capacidad de admisión de un sumidero. En esta sección se hace el esfuerzo de obtener la ecuación (o ley) que permita obtener valores de permeabilidad en todos los pozos, partiendo de una porosidad estimada a partir de perfiles eléctricos.

En primera instancia, se buscó una relación entre la porosidad y la permeabilidad, sólo utilizando los datos laboratorio del pozo Ilave (Tabla N°2: Mediciones de porosidad y permeabilidad absoluta al gas), considerando los valores en condiciones NOPB, es decir, en condiciones de reservorio.

Tabla N°2: Mediciones de porosidad (Φ) y permeabilidad absoluta al gas (K) en condiciones estándar y de reservorio (NOBP).

Muestra	Φ [%]	K [mD]	Φ @NOBP [%]	K @NOBP [mD]
10	8.3	0.0777	7.1	0.00242
9	24.9	136	23.3	110
8	22.1	68.1	21.1	46.4
7	19.1	608	18.5	425
5	19.4	147	17.8	122
4	21.8	86.2	20.1	76.3
3	26.8	216	25.5	183
1	12.9	2.36	11.5	1.79
0	23.4	38.2	21.8	29.3

* Las muestras 2 y 6 no pudieron medirse (esquivirlas).

En la figura 15 (Figura 15: Gráfico de la porosidad NOPB (Φ) vs la permeabilidad (K) al gas NOBP) se observa la ecuación potencial K [mD] = $5 \times 10^7 \times \Phi^{8.4118}$ que mejor se ajusta a los datos, aunque puede resultar poco confiable debido a la escasa cantidad de puntos que alimentan esa línea de tendencia.

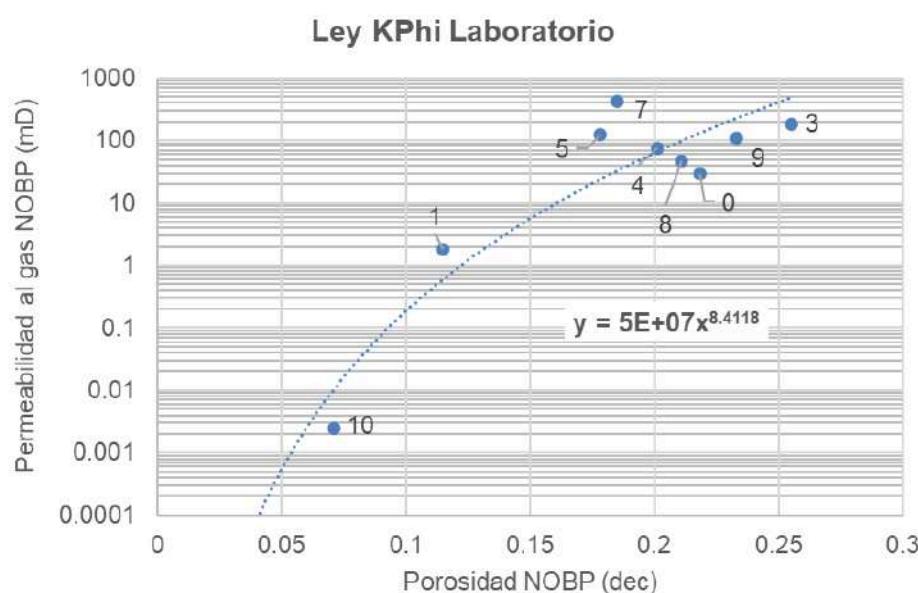


Figura 15: Gráfico de la porosidad NOPB (Φ) vs la permeabilidad (K) al gas NOBP. Se plantea una tendencia exponencial (mejor ajuste con datos), donde K [mD] = $5 \times 10^7 \times \Phi^{8.4118}$.

Por otro lado, se contó con la curva de permeabilidad de la resonancia (KTIM), también conocida como permeabilidad de Timur-Coates ([8] y [25]). Surge de una ecuación empírica desarrollada por los autores mencionados y es una de las curvas entregadas por parte de la compañía de perfilaje que realizó el registro en el pozo. Se observó que la KTIM es muy superior a las mediciones de laboratorio: en general, el salto es de un ciclo logarítmico. Si se presta atención a la ecuación de Timur-Coates (Figura 16: Distribución T2 teórica), entendiendo que el FF y BF surgen de cutoffs teóricos ideales para rocas clásticas, el hecho de que la KTIM sobreestime la permeabilidad de la roca indicaría que esos cortes de la distribución T2 de la resonancia no aplican para la Formación Centenario. En otras palabras, estos cutoffs teóricos subestimarían la cantidad de fluido capilar (BF), y en consecuencia, la permeabilidad es mayor. También existen otras variables de ajuste: los coeficientes a, b y c de la ecuación de Timur-Coates, aunque su relación con la red poral es menos clara.

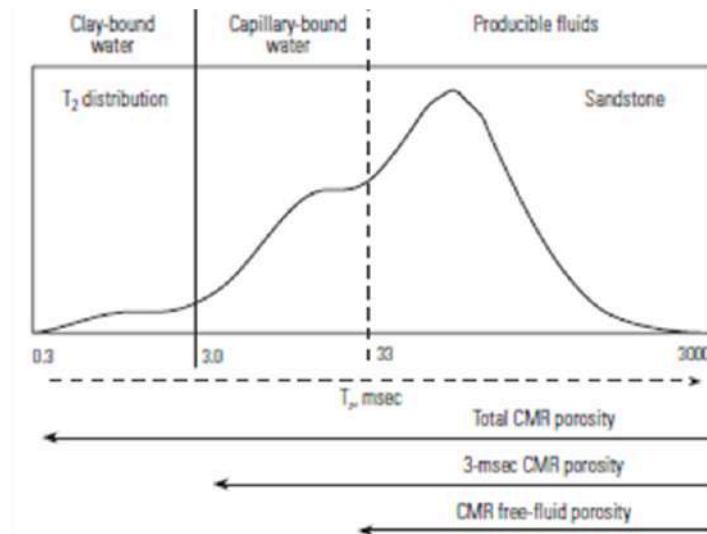
Se buscó una alternativa para resolver la incógnita de la permeabilidad: se plantea usar la relación entre la KTIM con la porosidad total de la resonancia. Así, se llega a la relación KPhi de la figura 17 (Figura 17: Relación o ley kPhi potencial para la Formación Centenario). Se trata de una ecuación potencial que expresa que $K \text{ [mD]} = 2 \times 10^{10} \times \Phi^{12.312}$.

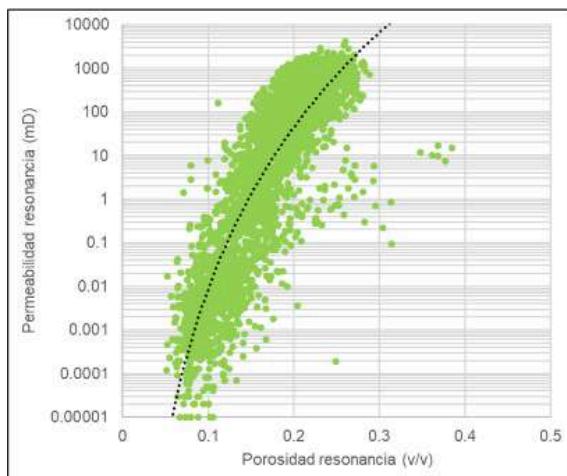
Ecuación de Timur-Coates

$$K = a \times \left(\frac{FF}{BF} \right)^b \times \Phi^c$$

Donde
 $a = 10000$
 $b = 2$
 $c = 4$
 FF = free fluid (fluido libre)
 BF = bound fluid (fluido capilar)
 Phi = porosidad total de la resonancia

Figura 16: Distribución T2 teórica. Los fluidos móviles (producibles) se encuentran por encima de 33 μs (FF). El fluido capilar se encuentra entre 3 y 33 μs (BF). El fluido adherido a las arcillas se ubica por debajo de los 3 μs . Tomado de Ellis y Singer [14].





Ley KPhi potencial de la Fm Centenario

$$K [mD] = 2E + 10 \cdot \text{Phi} [\text{dec}]^{12.312}$$

Donde
K es la permeabilidad, y
Phi es la porosidad

Figura 17: Relación o ley kPhi potencial para la Formación Centenario en base a la porosidad total y permeabilidad del perfil de resonancia.

La última ley KPhi obtenida logra representar mejor los datos de laboratorio en el pozo llave. En la figura 18 (Figura 18: Permeabilidad obtenida con la ley KPhi versus permeabilidad NOBP medida en laboratorio) se observa un detalle del ajuste logrado. En el crossplot de la misma figura se destaca el acercamiento a la línea 1:1, lo que indica una buena correlación entre los datos comparados.

La ley KPhi potencial a partir de la resonancia se aplica a todos los pozos del modelo y se obtienen valores entre 100 y 500 mD para el miembro Superior, y entre 20 y 200 mD para el miembro Inferior.

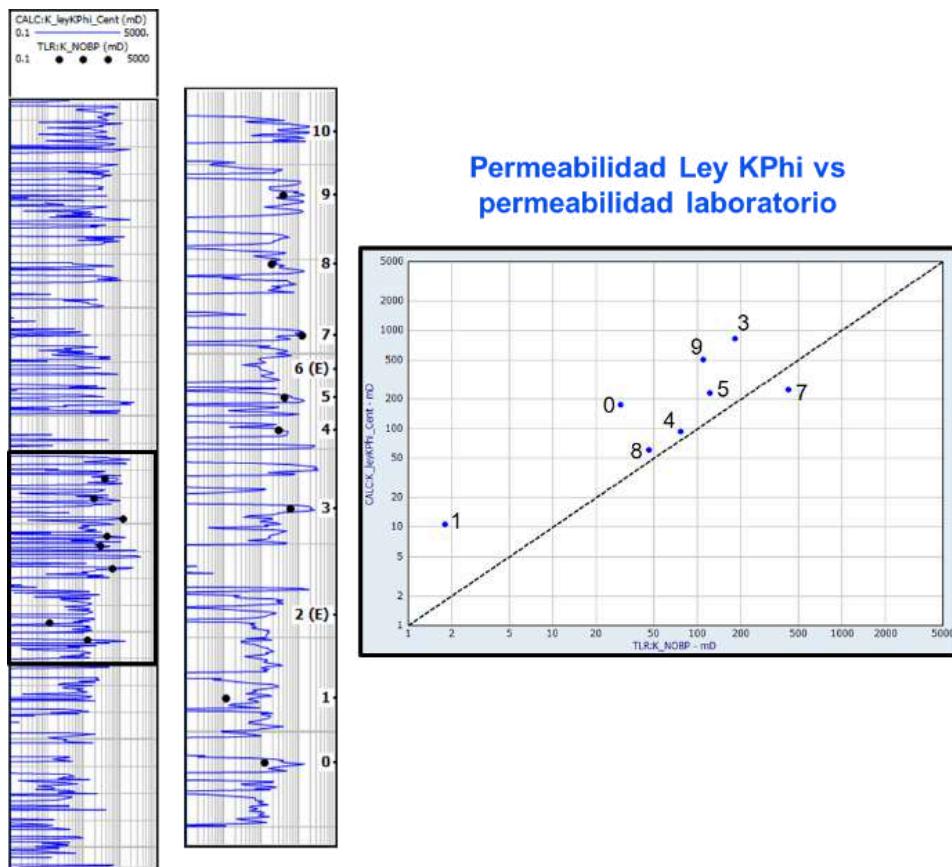


Figura 18:
Permeabilidad obtenida con la ley KPhi (curva azul) versus permeabilidad NOBP medida en laboratorio (puntos negros). A la derecha se muestra el crossplot para comparar estas dos permeabilidades. Nótese el acercamiento de la relación 1:1 (línea punteada negra).

Modelo de garganta poral

La interpretación de las mediciones de presión capilar a través de la inyección de mercurio es una herramienta ampliamente aplicada en la industria petrolera para caracterizar el espacio poral de la roca y predecir la distribución de los fluidos, cuya metodología fue desarrollada por Winland [en 17] y Pittman [19]. La presión capilar se define como la diferencia de presión entre la fase no-mojante y la fase mojante, y puede expresarse de la siguiente forma [27]:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{R}$$

Donde P_c es la presión capilar

σ es la tensión interfacial de la fase no mojante

θ es el ángulo de contacto de la fase no mojante, y

R es el radio de garganta de poros.

A partir de esta ecuación, se observa que la presión capilar es inversamente proporcional al radio de garganta poral. El numerador de la fórmula dependerá de las características del fluido no mojante. En el caso de las mediciones de laboratorio, la muestra de roca, previamente lavada y secada, se somete a la inyección de mercurio, en donde éste es la fase no mojante [20].

En la figura 19 (Figura 19: Presiones capilares) se muestran las presiones capilares del pozo llave graficadas según los 3 principales gráficos diagnósticos [19].

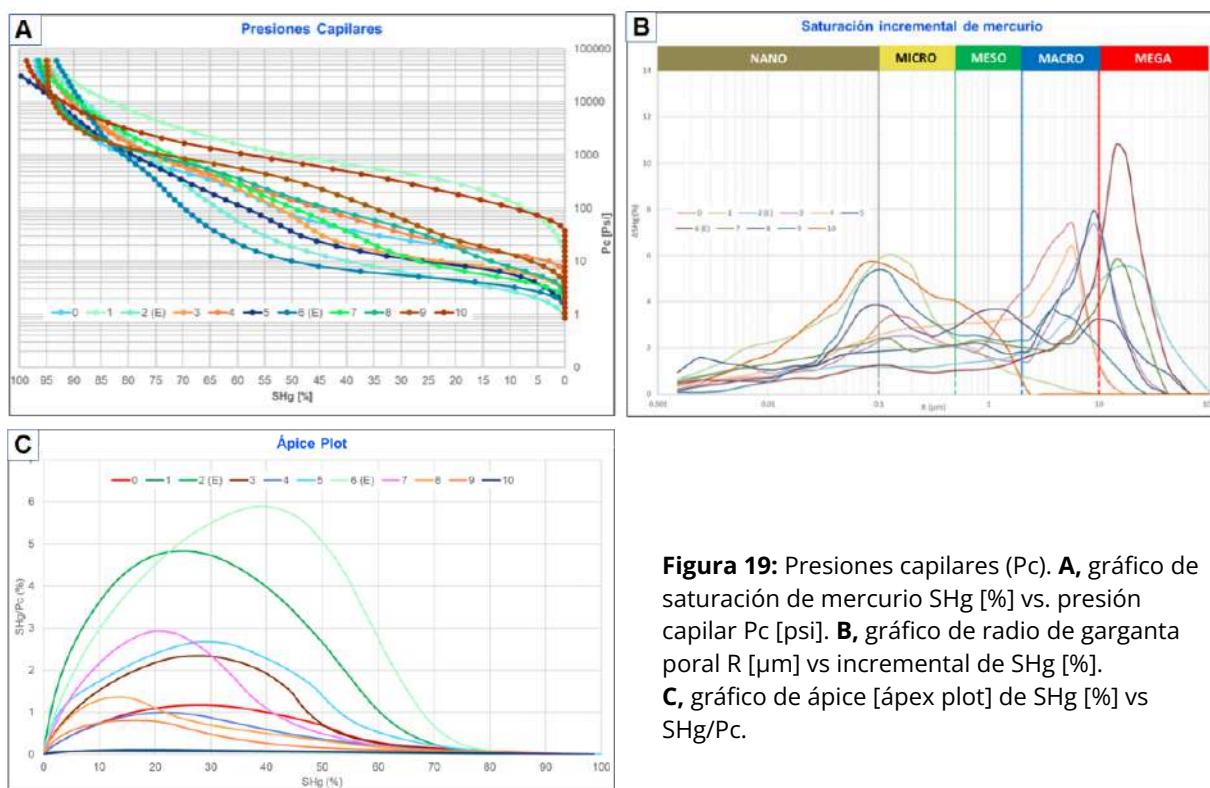


Figura 19: Presiones capilares (P_c). **A**, gráfico de saturación de mercurio SHg [%] vs. presión capilar P_c [psi]. **B**, gráfico de radio de garganta poral R [μm] vs incremental de SHg [%]. **C**, gráfico de ápice [ápex plot] de SHg [%] vs SHg/ P_c [%].

Haciendo una interpretación visual de las curvas, se pueden plantear las siguientes presunciones:

- Las muestras 10 y 1 corresponden a las peores calidades de roca, ya que tienen las presiones de entrada más altas, es decir que se necesitó mayor presión para que el mercurio empezara a

penetrar el espacio poral (figura 19A, gráfico de saturación de mercurio SHg [%] vs. presión capilar P_c [psi]).

- La mayoría de las muestras con bimodales: se observan dos o tres modas de radios de gargantas porales que son las que condicionan el flujo (figura 19B gráfico de radio de garganta poral R [μm] vs incremental de SHg [%]). Este aspecto añade complicación a la interpretación ya que la metodología parte de la premisa de que existe un único radio de garganta poral que domine el flujo [19].
- El gráfico de ápice (figura 19C, gráfico de ápice [ápex plot] de SHg [%] vs SHg/ P_c) no muestra un claro pico de SHg. Este aspecto está relacionado con la bimodalidad de la roca, y que no hay un único radio de garganta poral que domine el flujo.

Se hizo el esfuerzo de alcanzar un modelo de garganta poral, que requiere de alimentarlo -a futuro- con más muestras de roca de la formación de interés. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se expresaron los valores de medidos de presión capilar (psi) correspondientes a 10%, 15%, 20%, 24%, 30% y 35% de saturación de mercurio, en términos de radio de gargantas porales R (μm), utilizando la ecuación de Washbum [27].
2. Se calculó el radio de garganta poral, utilizando las ecuaciones de Winland [en 17] y Pittman [19], utilizando los valores de permeabilidad al gas y porosidad de laboratorio, ambos en condiciones estándar (ya que el ensayo de inyección de mercurio se realizó en condiciones estándar).
3. Se graficaron los resultados (gráficos 1:1): en el eje x se plotean los valores de R (μm) obtenidos en el paso 1, y en el eje y se colocan los valores de R (μm) obtenidos en el paso 2. Por ejemplo, los resultados de paso 1 para una SHg = 10% se grafica vs los resultados obtenidos en el paso 2 con la ecuación de Pittman R10.

La fórmula que mejor se ajuste a una línea de 45° en los gráficos 1:1, considerada la que mejor representa los datos de núcleo, y por ende el modelo de garganta poral, es la ecuación R20 de Pittman (Figura 20: Gráfico 1:1 utilizando la ecuación de Pittman R20).

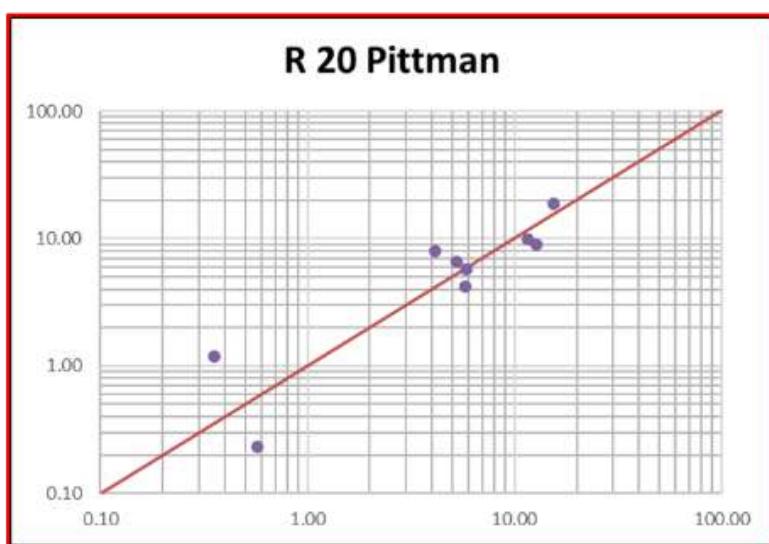


Figura 20: Gráfico 1:1 utilizando la ecuación de Pittman R20 con los datos de roca y las presiones capilares del pozo llave. K_a = permeabilidad. Φ porosidad.

$$\log R_{20} = 0.218 + 0.519 * \log K_a - 0.303 * \log \Phi$$

En la figura 21 (Figura 21: Gráfico KPhi en condiciones estándar) se muestra un gráfico KPhi, se plotean líneas de iso-radio de garganta poral calculadas con la ecuación de Pittman R20. Se observa que casi todas

las muestras son macroporosas, es decir que el radio de gargantas que dominan el flujo se encuentra entre 2 y 10 μm . Sin embargo, el arreglo poral, la textura de la roca y la curva de presión capilar de las muestras (por ejemplo, las muestras 4 y 8), hablan de tipos de roca distintas.

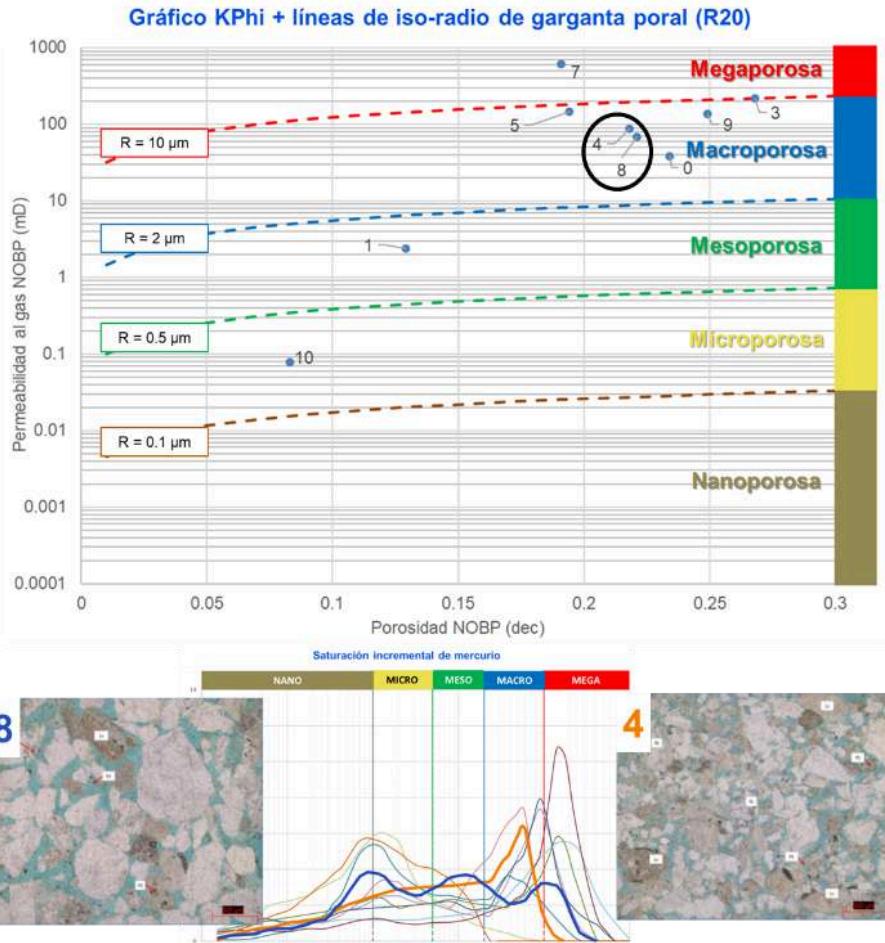


Figura 21: Gráfico KPhi en condiciones estándar con líneas de iso-radio de garganta poral utilizando la ecuación R20 de Pittman. Abajo, se muestra gráfico de radio de garganta poral R [μm] vs incremental de SHg [%], resaltando las muestras 4 y 8, con sus respectivos cortes delgados.

A pesar de que el proceso de determinación de la ecuación que relaciona la porosidad y la permeabilidad con el radio de gargantas porales, y los gráficos 1:1 parecieran indicar claramente que la ecuación de Pittman R20 es la que mejor representa los datos de roca, al integrarlo con la petrografía queda evidente que eso no se cumple.

Por otro lado, se esperaba que el modelo de garganta poral tuviera una implicancia directa en la capacidad de admisión de los nivel reservorios de la Formación Centenario, y de esa manera, que pudiera ser una herramienta para definir/predecir con mejor criterio las zonas reservorios con mayor potencial inyectividad. Sin embargo, al menos con la información disponible hasta el momento (Figura 22: Ejemplo de modelo de garganta poral.), esa relación no se comprueba. Las zonas punzadas en el pozo del ejemplo fueron seleccionados en base a la petrofísica básica, es decir, según las curvas de volumen de finos (Vsh) y porosidad efectiva (Phie), utilizando los cutoffs de <26% y >15%, respectivamente. Luego de poner en marcha la inyección en el pozo en cuestión, se realizó un perfil de tránsito de fluidos, muy común en la industria petrolera, con lo que se obtuvo la distribución de inyección por capa (track 6, Figura 22: Ejemplo de modelo de garganta poral.). Se puede apreciar que el 85% de los punzados realizados en el pozo corresponden a capas “megaporosas” (track 4, Figura 22: Ejemplo de modelo de garganta poral.) y, sin

embargo, la inyección está concentrada en 4 punzados. Más aún, la capa "d" admite más que la capa "c", cuando uno esperaría lo contrario basándose en los resultados del modelo petrofísico.

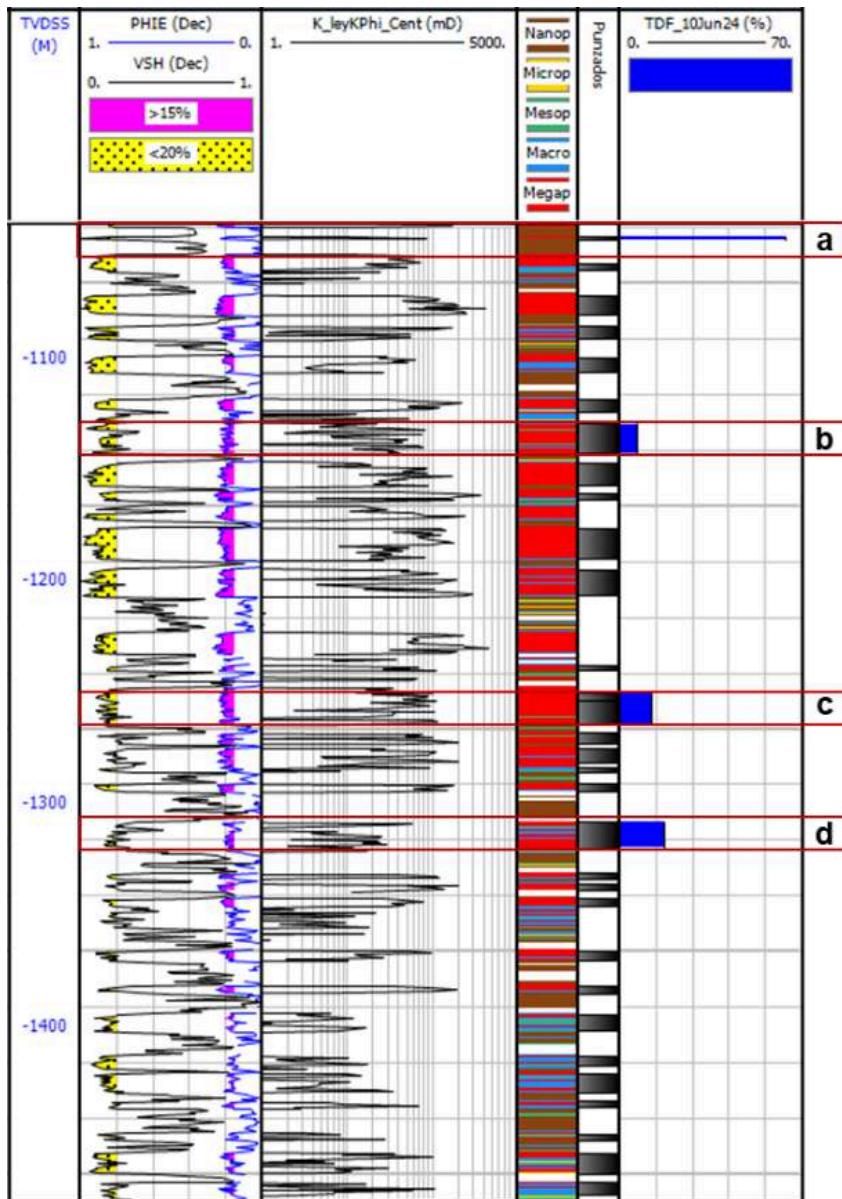


Figura 22: Ejemplo de modelo de garganta poral. Track 1, profundidad en metros bajo el nivel del mar. Track 2, volumen de finos (negra), sombreado en amarillo <20%, y porosidad efectiva (azul), sombreada en fucsia >15%. Track 3, permeabilidad calculada con la ley KPhi. Track 4, modelo de garganta poral; rojo = megaporosa, azul = macroporosa, verde = mesoporosa, amarillo = microporosa y marrón = nanoporosa. Track 5, punzados. Track 6, perfil de tránsito de fluido.

Conclusiones

El puntapié inicial de este artículo consistió en la necesidad de disponer de una alternativa frente al futuro incremento de agua de flowback en el área de estudio. Por ello, se evaluó a la Formación Centenario, a partir de registros eléctricos de pozos (rayos gamma, resistividad, densidad, neutrón y sónico) y mediciones de laboratorio en testigos laterales rotados (petrografía, mediciones de porosidad y permeabilidad, presiones capilares por inyección de mercurio), con la finalidad de conocer cuáles son sus características petrofísicas a través de la confección de un modelo petrofísico determinístico, y verificar su viabilidad para funcionar como formación sumidero.

En el área de estudio, la Formación Centenario presenta un espesor total entre 550 y 770 m. Se subdivide en dos miembros: el Superior, con un espesor total promedio de 250 m; y el inferior, con un espesor total promedio de 370 m.

Desde el punto de vista litológico, se identificaron areniscas finas a gruesas, de moderada a buena selección, con bajo contenido de matriz (entre 1 y 4), bajo contenido de cemento (entre <1 y 8%, promedio 5%, excepcionalmente supera el 10%) y bajo contenido de arcillas (entre 3 y 9%, promedio 5%, excepcionalmente supera el 10%).

En referencia al marco estructural, no hay indicios de que la Formación Centenario haya estado sometida a grandes deformaciones. La literatura consultada resalta la continuidad lateral, la falta de estructuración y la ausencia de fallas. Algunos autores aducen que la conservación de espesores de O a E sugiere que la formación no estuvo sometida a una actividad tectónica intensa durante su deposición. Sin embargo, existen sectores de la cuenca en los que la inversión tectónica de estructuras antiguas y la Orogenia Andina generaron fallamiento que afectaron localmente a la Formación Centenario. Por su parte, Ranalli [21] visualiza la tabularidad de los reflectores sísmicos identificados de la Fm. Centenario y escasa a nula presencia de fallas en el área de estudio. De todas formas, sería conveniente profundizar el análisis, enfocándose en la identificación de sellos, poniendo énfasis en la relación entre las fallas, los sellos regionales y las formaciones suprayacentes, que excede los alcances del presente trabajo.

A partir de los modelos de volumen de finos (V_{sh}) y de porosidad (Φ_{hie}) aquí propuestos, se comprueba que la Formación Centenario representa un buen candidato para inyectar agua de disposición final. Los niveles reservorios presentan muy bajos porcentajes de arcillosidad (7% moda de V_{sh}), aspecto calibrado con datos de DRX en roca total y arcillas. Por su parte, el modelo de Φ_{hie} , ajustado con la porosidad total de la resonancia magnética y las mediciones de laboratorio de porosidad en condiciones NOBP en el pozo Ilave, arroja muy buenas porosidades: entre 16% y 25% para ambos miembros de la Formación Centenario.

Respecto al modelo de permeabilidad, se encontró una ley $K\Phi_i$ que surge de la relación entre la permeabilidad (K_{TIM}) con la porosidad total, ambas curvas de la resonancia magnética nuclear del pozo Ilave. La ley $K\Phi_i$ resultante logra un ajuste aceptable con los datos de roca de laboratorio, aunque contar con mayor densidad de puntos de control permitiría quizás mejorar la calibración. Con este modelo de permeabilidad se obtuvieron valores entre 100 y 500 mD para el miembro Superior, y entre 20 y 200 mD para el miembro Inferior.

En base al análisis de las presiones capilares por inyección de mercurio se determinó que la ecuación de Pittman R20 es la que mejor representa los datos de laboratorio. Sin embargo, se observa que casi todas las muestras son macroporosas, es decir que pertenecen al mismo "tipo de roca". Esta clasificación no se condice con la petrografía de las muestras de roca, o al menos, no representa el arreglo poral que se puede observar en los cortes delgados. Se esperaba que el modelo de garganta poral tuviera una implicancia directa en la capacidad de admisión de los niveles reservorios de la Formación Centenario, y de esa manera, que pudiera ser una herramienta para definir/predecir con mejor criterio las zonas reservorios con mayor potencial inyectividad. Sin embargo, al menos con la información disponible hasta el momento, esa relación no se comprueba.

Las propiedades petrofísicas de los niveles reservorios de la Formación Centenario (V_{sh} y Φ_{hie}) muestran valores muy homogéneos. Cuando se aplican los cutoffs seleccionados en la sección "3.5 Sensibilidad de cutoff", se observa que prácticamente todos los niveles arenosos superan esos valores de corte. Sin embargo, como se mostró en la figura 22, no hay correspondencia con la distribución de inyección. Esto pone en evidencia que existe un aspecto que controla la inyectividad que no es posible dilucidar a partir del análisis de registros eléctricos. En ese sentido, las presiones capilares por inyección de mercurio y el modelo de radio de gargantas porales, tampoco logran esclarecer qué es lo que gobierna la distribución de inyección dentro del pozo. Lógicamente, hay variables ajenas a la geología y a la petrofísica que pudieran interferir en el análisis de inyectividad (presión poral, daño de formación, condiciones de presión de inyección, flujo cruzado entre capas, etc.). Resulta complicado poder aislar el efecto que puede tener cada una de esas variables en la capacidad de admisión de los niveles reservorios, aunque no debería descartarse realizar un análisis multivariado para conseguir la respuesta a la pregunta ¿qué aspectos controlan la inyectividad en la Formación Centenario?.

Referencias

- [1] Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some reservoir characteristics. Trans. AIMME. 146: 54-62.
- [2] Arregui, C. D., 2005. Trampas asociadas con rasgos de basamento en la cuenca Neuquina. 6º Congreso de Exploración Y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas digitales.
- [3] Berdini, O., Rodríguez, J. F., Matheos, S. D., Spalletti, L. A., y Villar, H. J., 2011. Evolución de los procesos diagenéticos y modelado bidimensional del sistema petrolero Los Molles - Lajas/Punta Rosada en el yacimiento Río Neuquén, cuenca Neuquina, Argentina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (IAPG), p.549-566.
- [4] Cabaleiro, A., 2012. Yacimiento Señal Cerro Bayo, en M. Schiuma, G. Hinterwimmer y G. Vergani (eds.), Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina, 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (IAPG). Mar del Plata, p. 415-420.
- [5] Cabaleiro, A., Cazau, L., Lasalle, D., Penna, E., Robles, D., 2002. Los reservorios de la Formación Centenario, en M. Schiuma, G. Hinterwimmer y G. Vergani (eds.), Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina, 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (IAPG). Mar del Plata, p. 407-414.
- [6] Carrizo, N., Ribas, S., Ghiglione, F., Mallimaci, D., Pioli, O., 2018. Los reservorios de la Formación Centenario, en: Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina, 2da edición actualizada. 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (IAPG). Mendoza, p. 685-696.
- [7] Cevallos, M.F., Vaamonde, D., Rivero, M., Rojas, C., Kim, H., Galarza, T. y Legarreta, P., 2011. Exploración y Desarrollo del Tren de Petróleo Pesado del Río Colorado, Margen Nororiental de la Cuenca Neuquina, Argentina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p: 27-52, Mar del Plata, Argentina.
- [8] Coates G.R, Dumanoir, J.L., 1978. A new approach to improved log-derived permeability. Paper R, SPWLA 14th Annual Logging Symposium, Lafayette, Louisiana, May 1973.
- [9] Cristallini, E., 2004. Panorama estructural de la región de Sierra Barrosa. Informe Inédito Repsol YPF.
- [10] Cristallini, E y Olmos, M.de la C., 2016. Caracterización estructural y evolución tectónica del bloque Río Neuquén, Provincias del Neuquén y Río Negro. Informe inédito LA.TE. ANDES.
- [11] Di Gregorio J.H. y Uliana M.A., 1980. Cuenca Neuquina. En: J.C.M. Turner (ed.), Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias, 2: 985-1032. Córdoba.
- [12] Di Gregorio, J.H. (1972). Neuquén en A.F. Lanza (Dir. y Ed.) Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencia. Córdoba. p. 439-505. Rep. Argentina.
- [13] Echevarría C., Schwarz E., Suárez M., Montenegro S., Ferreyro R., Giménez B., Montagna A., Martin, F., 2022. Caracterización Sismo-estratigráfica y Sedimentológica del intervalo Agrio-Centenario en el sector central de la Cuenca Neuquina. 11º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- [14] Ellis D.V. y Singer J.M., 2007. Well Logging For Earth Scientists. Second edition. Published by Springer. ISBN 978-1-4020-4602-5 (e-book). Dordrecht, The Netherlands. Pág. 41-59, 91-177, 247-348, 415-477, 531-568.
- [15] Folk, R. L., Andrews, P. B., & Lewis, D. W., 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 13(4), 937-968.
<https://doi.org/10.1080/00288306.1970.10418211>
- [16] Howell, J. A., Schwarz, E., Spalletti, L. A. y Veiga, G. D. 2005. The Neuquén Basin: an overview. En: Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J. A. y Schwarz, E. (eds.). The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics. Geological Society, London, Special Publications. 252: 83-107.
- [17] Kolodzie Jr, S., 1980. Analysis of Pore Throat Size and Use of the Waxman-Smits Equation to Determine OOIP in Spindle Field, Colorado. Paper SPE-9382-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, September 1980.
- [18] Maretto, H., & Pangaro, F., 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: actividad tectónica durante la deposición de la Fm. In Quintuco. 6º Congreso de exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mar del Plata), CD-ROM.
- [19] Pittman, E.D., 1992. Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone. The American Association of Petroleum Geologists, v 76, n°2, p. 191-198.
- [20] Purcell W.R., 1949. Capillary pressures – their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom. American Institute of Mechanical Engineers. Petroleum Transactions. Feb. p 39-48.
- [21] Ranalli, J.N., 2022. Interpretación sismoestratigráfica y estructural de la Fm Centenario. Inédito YPF.

- [22] Raymer L.L, Hunt E.R. y Gardner J.S., 1980. An improved sonic transit time-to-porosity transform. Trans 21st SPWLA Annual Logging Symposium, paper P.
- [23] Schwarz, E. y Veiga, G.D., 2022. Paleogeografías Refinadas y actualizadas del intervalo Pilmatué-Agrio Inferior-Centenario Inferior. 11º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- [24] Schwarz, E., Finzel, E.S., Veiga, G.D., Rapela, C.W., Echevarría, C. y Spalletti, L.A., 2021. U-Pb geochronology and paleogeography of the Valanginian-Hauterivian Neuquén Basin: Implications for Gondwana-scale source areas, Geosphere, N° 17, p. 244-270.
- [25] Timur, A., 1968, Effective porosity and permeability of sandstones investigated through nuclear magnetic principles, paper K, 9th Annual SPWLA Logging Symposium Transactions, 18 p. Later published in 1969 in The Log Analyst, v. 10, no. 1, January-February, p. 3-11.
- [26] Vergani, G., Barrionuevo, M., Sosa, H. y Pedrazzini, M. 2001. Análisis estratigráfico secuencial de alta resolución en las formaciones Agrio y Huirín del Yacimiento Puesto Hernández, Cuenca Neuquina, Argentina, Boletín de Informaciones Petroleras 3º, N° 67, p. 76-87.
- [27] Washburn, E.W., 1921. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material: proceedings of the National Academy of Science, v 7, p. 115-116.

AUTORA

Marcia Jésica Faviana

San Juan 766, Neuquén, Argentina.

marcia.faviana@ypf.com

Geóloga, graduada en la Universidad Nacional de Tucumán, Especialista en Exploración y Desarrollo de hidrocarburos (Universidad Nacional de La Plata). Más de 12 años de experiencia en la industria petrolera.

Caracterización y análisis de fracturas naturales, área Puesto Touquet, Neuquén, Argentina

Carla Diaz Torra

Resumen

Este trabajo presenta la caracterización y el modelado geomecánico de fracturas naturales en el bloque Puesto Touquet, ubicado en la Cuenca Neuquina, Argentina. El objetivo principal fue construir un modelo tridimensional de fracturas para optimizar el desarrollo y la exploración de reservorios, integrando distintas disciplinas y líneas de datos: sísmica 3D, testigos corona, imágenes de pozo y perfiles sónicos dipolares.

El análisis se centró en la Formación Los Molles, específicamente en el Miembro Cutral-Co, donde se identificaron redes de fracturas asociadas a diferentes eventos tectónicos. A partir de la orientación del campo de esfuerzos y su interacción con las fallas regionales, se generaron mapas de intensidad y orientación de fracturas. Si bien en algunas áreas el modelo quedó en una etapa conceptual por falta de datos, se logró calibrar parcialmente en la Fosa de Challacó. Este modelo estático representa una herramienta fundamental para futuras simulaciones dinámicas, y su metodología puede aplicarse en otras áreas con estructuras complejas y potencial fracturado.

Palabras Clave: Fracturas naturales; Modelo geomecánico; Cuenca neuquina; Reservorios; Análisis estructural; Petrel; Testigos corona; Sísmica 3D.

Abstract

This work presents the characterization and geomechanical modeling of natural fractures in the Puesto Touquet block, located in the Neuquén Basin, Argentina. The main objective was to build a three-dimensional fracture model to optimize reservoir development and exploration, integrating multiple disciplines and datasets: 3D seismic, core samples, borehole images, and dipole sonic logs. The study focused on the Los Molles Formation, specifically the Cutral-Co Member, where fracture networks were identified and linked to different tectonic events. Based on the orientation of the stress field and its interaction with regional faults, maps of fracture intensity and orientation were generated. Although in some areas the model remained conceptual due to limited data, partial calibration was achieved in the Challacó Graben. This static model represents a key tool for future dynamic simulations and the methodology can be applied to other structurally complex and potentially fractured reservoirs.

Keywords: Natural fractures; Geomechanical model; Neuquén basin; Reservoirs; Structural analysis; Petrel; Core samples; 3D seismic.

1. Introducción

El estudio de fracturas naturales en reservorios constituye una herramienta clave para mejorar la comprensión del comportamiento del flujo de hidrocarburos, especialmente en contextos estructuralmente complejos. En reservorios con baja porosidad y permeabilidad primaria, como muchos de los que se encuentran en la Cuenca Neuquina, la presencia de fracturas puede representar un factor determinante en la productividad.

1.1 Ubicación y marco geológico de la zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra dentro del Engolfamiento Neuquino, región que abarca el sector extraandino de Neuquén y sur de Mendoza. Esta cuenca se originó en el Triásico superior a partir de un sistema de rift que generó depocentros aislados (Mombrú y Uliana 1978). Durante el Jurásico, la cuenca pasó a funcionar como una cuenca de retroarco, vinculada al desarrollo de un arco volcánico. La subsidencia térmica favoreció la conexión entre los depocentros, haciendo que las unidades adquirieran un desarrollo más regional. Además, las variaciones eustáticas provocaron la alternancia entre depósitos marinos y continentales (Legarreta y Uliana 1996). Para el Cretácico inferior alto la cuenca comienza a continentalizarse y a desarrollarse con características típicas de cuenca de antepaís, perdiendo definitivamente contacto con el Pacífico.



Figura 1: Ubicación de la cuenca Neuquina, extraído del libro Growth of the Southern Andes, (Naipauer, M. y Ramos, V.A. 2016).

En el Cretácico superior y el Cenozoico, su evolución estuvo marcada por episodios de deformación vinculados a cambios en el ángulo de subducción. La orientación regional del campo de esfuerzos, condicionada por la dinámica del margen convergente, permitió reconocer tres eventos tectónicos principales: uno compresivo de orientación NO en el Toarciano-Valanginiano, otro con rotación hacia el oeste, hasta el Cenomaniano. La deformación final tuvo lugar en el Mioceno tardío con una orientación E-O del esfuerzo principal y una extensión Pliocena. (Figura 1)

1.2 Área de estudio

El área estudiada se ubica en el sector centro-oeste de la Dorsal de Huincul, caracterizada por un predominio de lineamientos compresivos con orientación NE. Está ubicada aproximadamente a 7 km al sudeste de Cutral-Co y 60 km al oeste de la ciudad de Neuquén, abarcando aproximadamente 350 km². Se incluyen los bloques Puesto Touquet y El Porvenir, los cuales presentan estructuras anticlinales asociadas a la reactivación de fallas extensionales. El bloque El Porvenir aloja tres yacimientos de petróleo (Challacó, La Esperanza y El Porvenir), mientras que Puesto Touquet contiene dos yacimientos de gas y condensado (Puesto Touquet y La Chilca), localizados en estructuras generadas por inversión tectónica.



Figura 2:
Ubicación del área de estudio, Puesto Touquet (A) y El Porvenir (B).
Imagen extraída de Google Earth.

El Miembro Cutral-Co, de origen turbidítico, constituye la principal unidad productiva en el área. La evolución estructural del sector ha estado fuertemente condicionada por un basamento anisótropo y la interacción con el campo de esfuerzos regional, lo que ha generado sectores estructuralmente diferenciados dentro de la Dorsal (Figura 2).

1.3 Geología del Yacimiento

El estudio se centra en la Formación Molles, que descansa sobre una estructura bien definida con depocentros aislados formados por rifting. Durante el Jurásico inferior medio, la actividad extensional cedió paso a un régimen de subsidencia térmica, favoreciendo la acumulación de sedimentos debido a transgresiones marinas desde el Pacífico (Spalletti et al., 2000).

La Formación Los Molles está compuesta principalmente por pelitas grises con variable contenido orgánico, alternando con areniscas finas a gruesas y conglomerados, como en el Miembro Cutral-Co (Arregui et al., 2011). Su espesor varía, superando los 2.000 m en la zona central de la cuenca, especialmente en la Dorsal de Huincul (Gómez Omil et al., 2002).

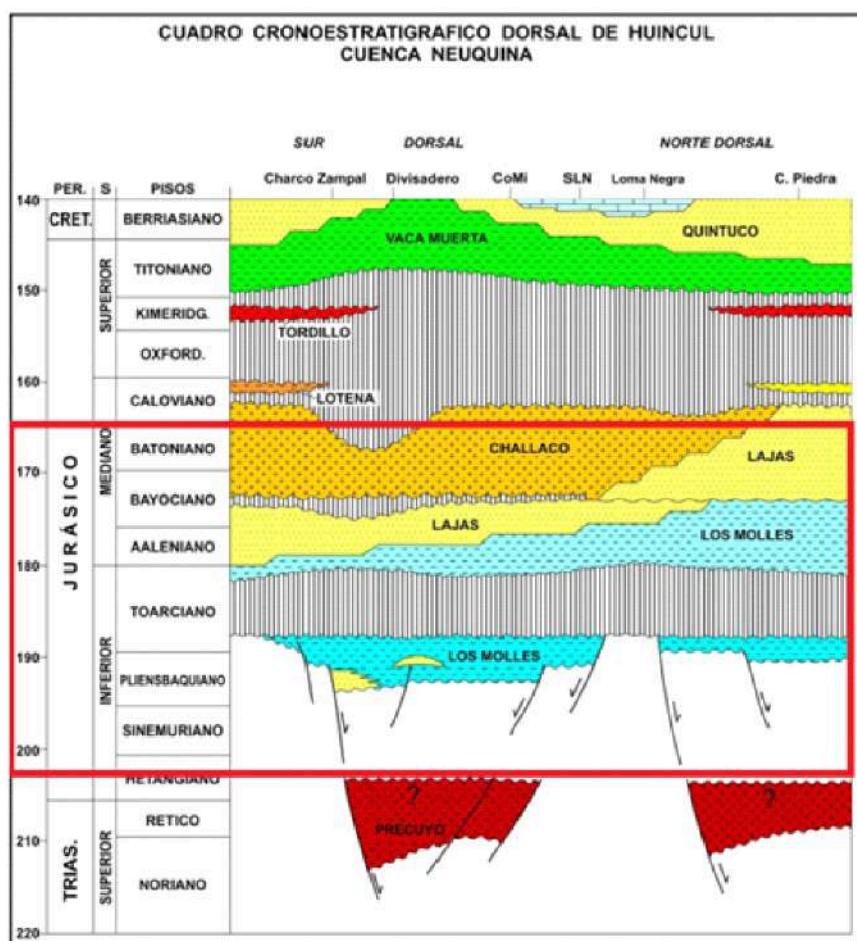


Figura 3: Cuadro cronoestratigráfico del Jurásico de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina. Dentro del recuadro está la formación correspondiente a nuestra área de estudio. Edades según escala de tiempo de tomado de Vergani, et al., 1995.

Se consideran dos mega-secuencias del Grupo Cuyo correspondientes a la Formación Los Molles, divididas en tres miembros: Pelítico Inferior, Cutral-Co y Pelítico Superior. El Miembro Pelítico Inferior (Pliensbaquiano - Toarciano inferior) está formado por lutitas negras laminadas de origen marino profundo, con buena capacidad generadora de hidrocarburos. La segunda secuencia incluye dos cortejos sedimentarios: de mar bajo (Miembro Cutral-Co), con arenas turbidíticas bien seleccionadas, y de mar alto (Miembro Pelítico Superior), formado por pelitas grises claras sin interés económico (Figura 3).

2. Metodología

El flujo de trabajo para el análisis de fracturas naturales, basado en Manceda et al. (2005), integra datos de testigos corona, imágenes de pozos, sísmica 3D y perfiles sónicos dipolares con el fin de describir y modelar una red tridimensional de fracturas naturales. Este proceso comienza con un análisis estructural detallado de fallas interpretadas en el cubo sísmico, permitiendo definir el patrón tridimensional de fallas en el área de Puesto Touquet. A partir de la interacción entre el campo de esfuerzos remotos y las fallas, se generan campos locales que modifican su orientación e intensidad del esfuerzo al interactuar con fallas preexistentes, obteniéndose una distribución espacial, orientación e intensidad de fracturas sub sísmicas, especialmente en zonas intermedias sin datos directos. Una vez definidas las relaciones espaciales de las fracturas naturales se toma en consideración la geometría, incorporando propiedades como aperturas, cementos y longitudes de fracturas obtenidas de diversas fuentes. Finalmente, se construye y calibra un modelo tridimensional integrado con datos de sondeos, aplicando conceptos geomecánicos que aportan mayor realismo frente a métodos geométricos tradicionales (Figura 4).

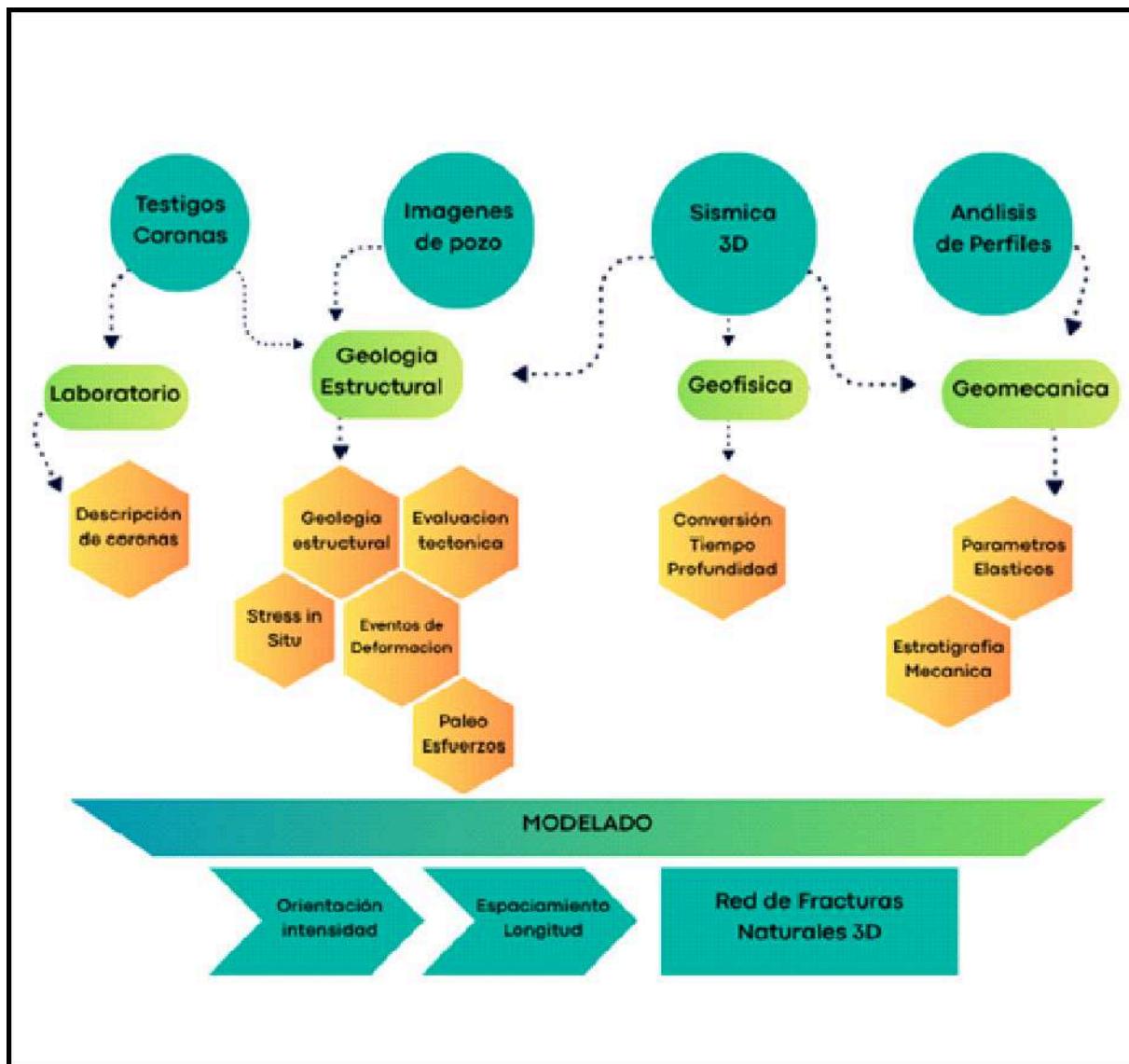
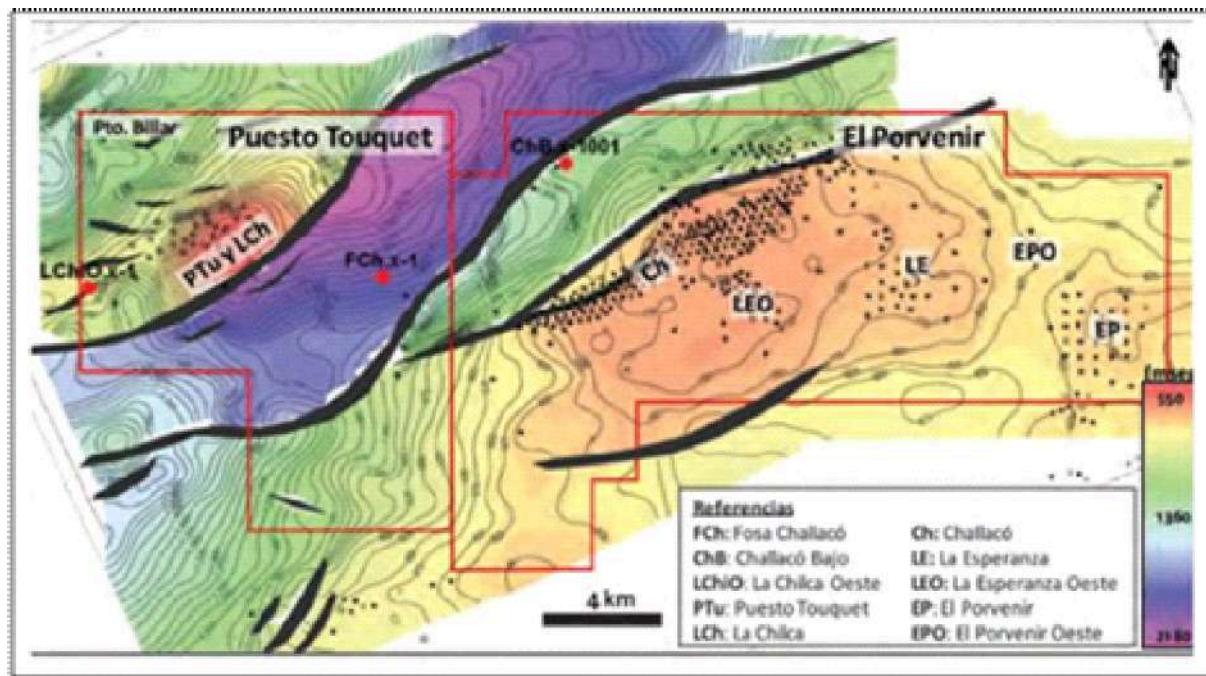


Figura 4: Esquema sintético del flujo de trabajo.

2.1 Modelo Estructural

El modelo estructural fue realizado a partir de la interpretación sísmica 3D del bloque Puesto Touquet, integrando información de varios pozos (PTu.x-1, FCh.x-1 y PBi.x-1). Se reconocieron tres sectores estructurales principales: el anticlinal California al NO, la fosa de Challacó en el centro, y el bajo Challacó al SE, todos controlados por la arquitectura extensional original (Figura 5).



A través del programa Poly3D se simuló el comportamiento mecánico de las fallas, permitiendo visualizar cómo interactúan los esfuerzos regionales con las estructuras del subsuelo (Margueliche, 2017). Este enfoque permitió estimar la distribución espacial e intensidad de las fracturas naturales a partir de la Cizalla Máxima de Coulomb (MCSS), utilizada como proxy. Se analizó cada evento tectónico (desde el Pliensbachiano al Cenomaniano), observando cómo la rotación del esfuerzo modifica la generación y orientación de las fracturas.

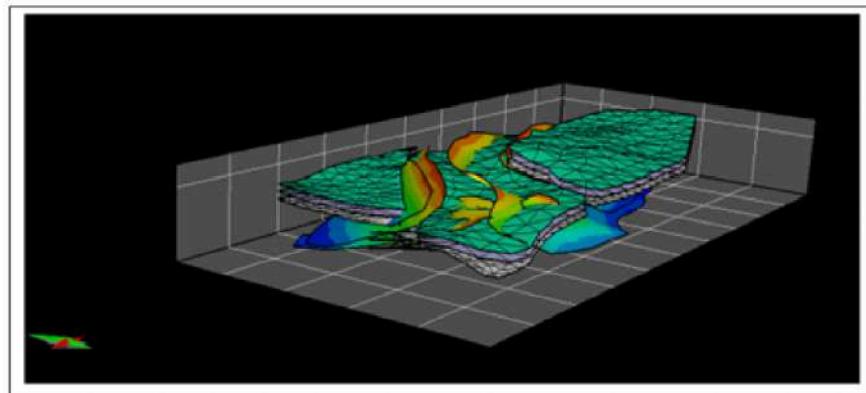


Figura 6: Modelo estructural 3D de la zona de Puesto Touquet. Las superficies de colores azul a rojo representan fallas y las superficies grilladas representan los topes del basamento, la Fm. Molles y el Mb Cutral-Co.

Los resultados se integraron en un modelo estructural 3D con mapas de intensidad y orientación de fracturas para cada fase tectónica, que luego servirán como base para el modelado de fracturas naturales en el módulo de Petrel (Figura 6).

2.2 Descripción de Testigos Corona

Se analizaron testigos de los pozos Pp.Nq.PTu.a-1001, Pp.Nq.PTu.a-1002, Pp.Nq.PTu.a-1013 y YPF.Nq.PTu.x-1, correspondientes al Miembro Cutral-Co. Para este análisis, se emplearon herramientas como lupa, cinta métrica, transportador, escala logarítmica (Ortega et al., 2006) y HCl, con el fin de observar aperturas, inclinaciones, formas de terminación, desplazamientos y mineralizaciones.

En los testigos de la corona del Cutral-Có se identificaron bandas de deformación, las cuales se describieron en función de los mecanismos de deformación. Estos mecanismos incluyen la reorganización de granos debido al deslizamiento, rotación y/o fracturas asociadas a dilatación, cizallamiento y/o compactación, considerando también la profundidad de enterramiento (estrés) y la litología. Los mecanismos de deformación dependen de condiciones tanto internas como externas, tales como la mineralogía, el tamaño de grano, la forma, la cementación, la porosidad, las propiedades de la roca huésped y el estado de estrés de las bandas de deformación de tipo cataclástico.

2.3 Descripción de cortes delgados

Los cortes delgados pertenecen al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 y fueron observados bajo microscopio óptico con cámara acoplada a diferentes aumentos, lo que permitió registrar detalles de las estructuras presentes. En ambos cortes, 744,9 m (Figura 7) y 746,5 m, se identificaron bandas de deformación del tipo cataclásticas. Se distinguieron dos zonas bien marcadas: una zona compactada con cristales pequeños y otra donde se observan cristales de mayor tamaño con bordes irregulares, inmersos en una matriz más fina. Esta configuración corresponde a un núcleo cataclástico generado por procesos de cizallamiento. Las observaciones validan lo registrado en los testigos corona y refuerzan la presencia de estructuras internas asociadas a la evolución tectónica del reservorio.

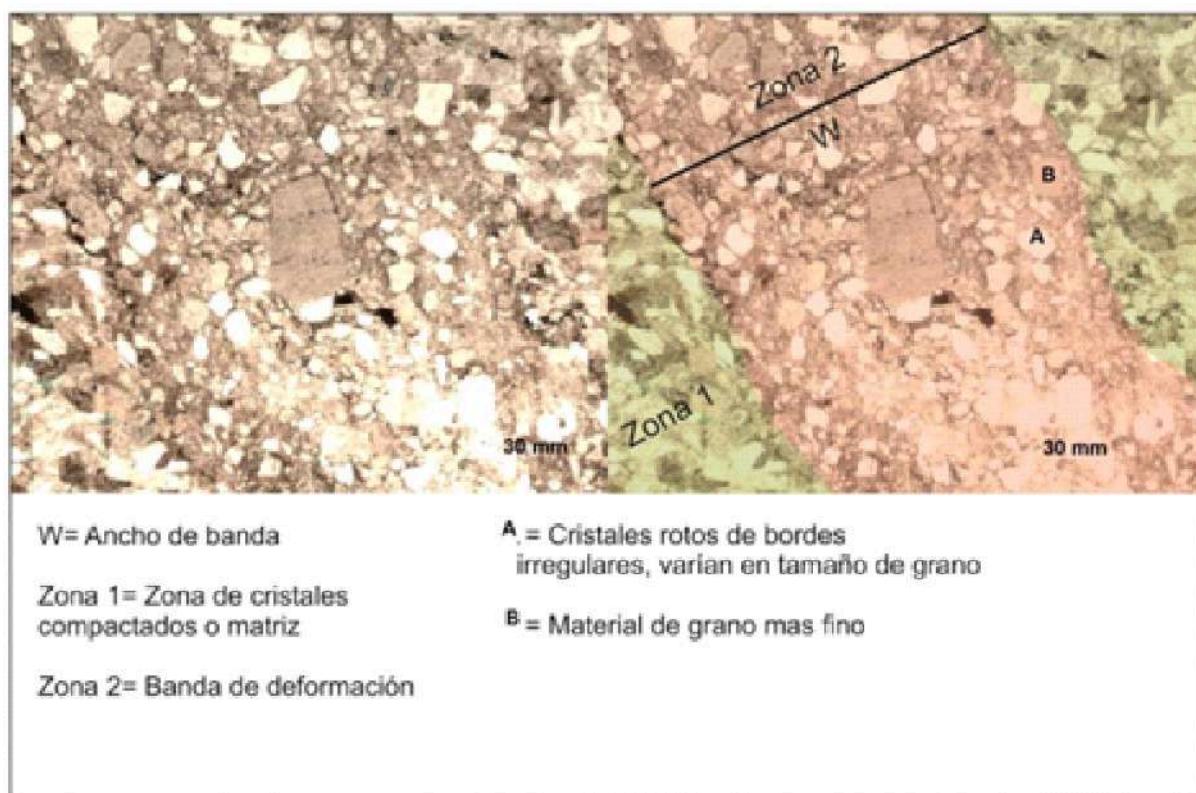


Figura 7: Corte delgado del testigo corona correspondiente al pozo Pp.Nq.PTu.a-1002 a 744.9 metros de profundidad.

2.4 Descripción de perfiles de imágenes

Se analizaron perfiles de imágenes de los pozos FCh.x-1 y ChB.x-1001 con el objetivo de identificar fracturas y microfallas, y así reconocer los eventos tectónicos actuantes. Las imágenes, a escala 1:40, permitieron trazar diagramas de rosa que muestran la orientación (RBZ) e inclinación de las fracturas. En ambos pozos se registró un aumento de fracturas hacia la base del Miembro Cutral-Co (Figura 8), lo cual concuerda con las observaciones previas realizadas en los testigos. Esta información fue clave para establecer correlaciones estructurales entre pozos y aporta datos fundamentales para la calibración de los modelos de fracturas naturales.

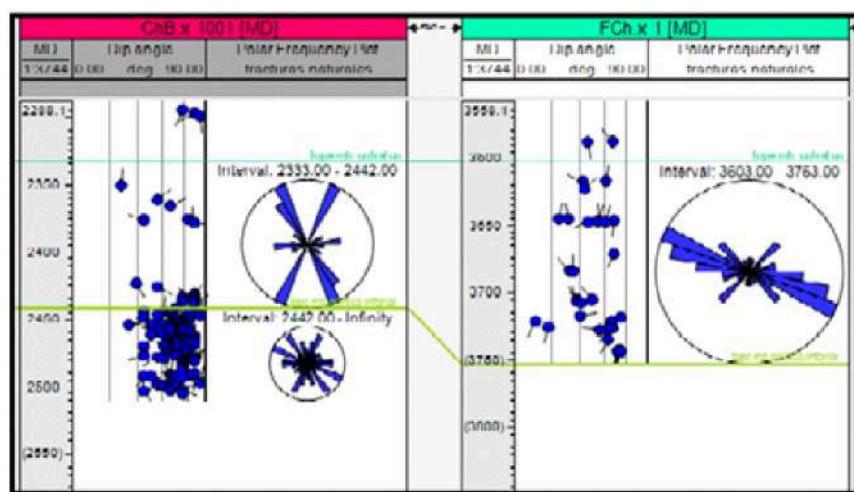


Figura 8: Diagramas de rosa y perfil de imagen de correlación entre los pozos ChB.x-1001 y FCh.x-1. Rumbo e inclinación del Mb Cutral-Có.

2.5 Geofísica y Geomecánica

Para caracterizar el comportamiento mecánico de las unidades involucradas, se utilizaron perfiles sónicos y de densidad de distintos pozos del área, como Pp.Nq.PTu.a-1001 y Pp.Nq.PBi.x-1001. A partir de estos, se calcularon las impedancias acústicas y se generaron sismogramas sintéticos que permitieron identificar los pasos formacionales y construir mapas en profundidad. Con esta información se definieron los paquetes geomecánicos, es decir, zonas con respuesta similar frente a los esfuerzos, fundamentales para estimar la distribución de fracturas o bandas de deformación. Se calcularon parámetros como el Módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el módulo de cizalla, que fueron claves para construir la estratigrafía mecánica del Miembro Cutral-Co y su integración en el modelado de fracturas naturales.

2.6 Modelado

A partir del modelo estructural y de los parámetros geomecánicos obtenidos, se construyó una red tridimensional de fracturas naturales utilizando el módulo de fracturas de Petrel®. Se analizaron los distintos eventos tectónicos reconocidos en el área y se aplicaron en el modelo mediante simulaciones basadas en la máxima cizalla de Coulomb (MCSS), lo que permitió estimar zonas de mayor o menor intensidad de fracturas (Figura 9). Si bien en los bloques Puesto Touquet y El Porvenir no se contó con datos de imagen de pozo para realizar una calibración, se generaron modelos conceptuales. En cambio, en la Fosa de Challacó, donde sí se disponía de datos, se llevó a cabo la calibración con el pozo FCh.x-1, generando un mapa de intensidad de fracturas para el evento del Pliensbachiano. La integración de todos los eventos permitió visualizar de forma tridimensional la densidad, orientación y distribución de las fracturas, sentando las bases para futuros análisis dinámicos (Figura 10).

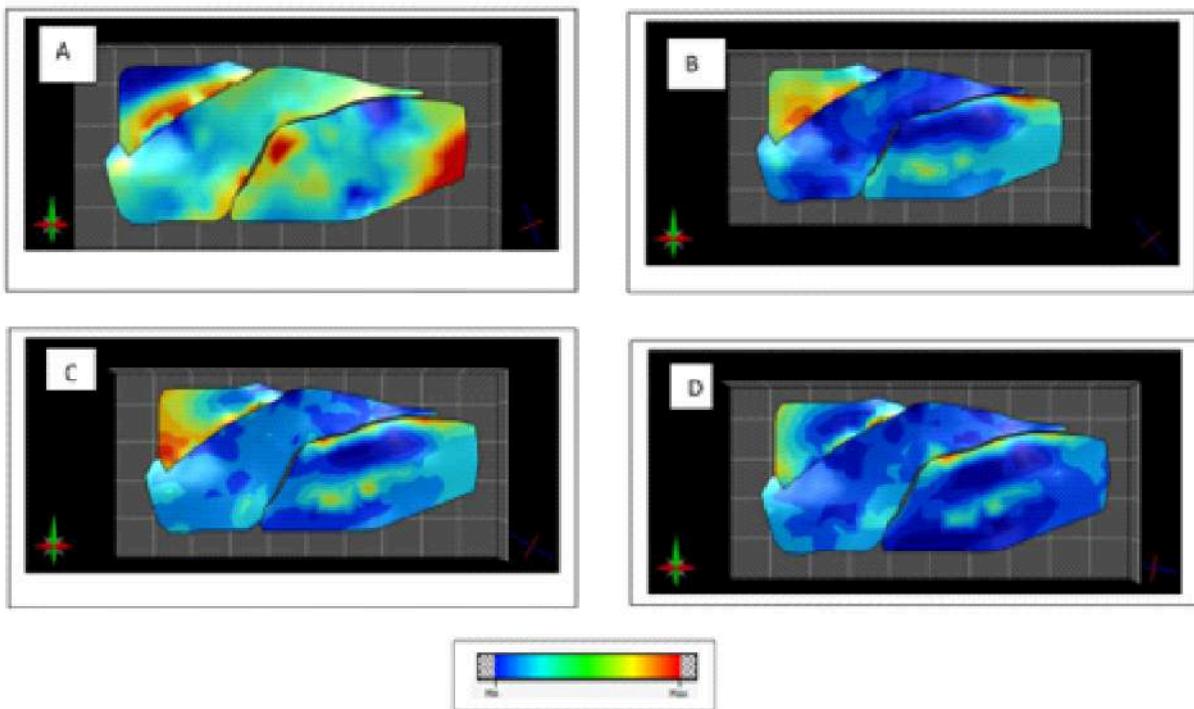


Figura 9: Mapas de intensidad de fracturas para el tope del Miembro Cutral-Co **A)** Evento Pliensbachiano. **B)** Evento Kimmeridgiano? **C)** Evento Berriasiano Medio-Valanginiano Temprano. **D)** Evento Cenomaniano.

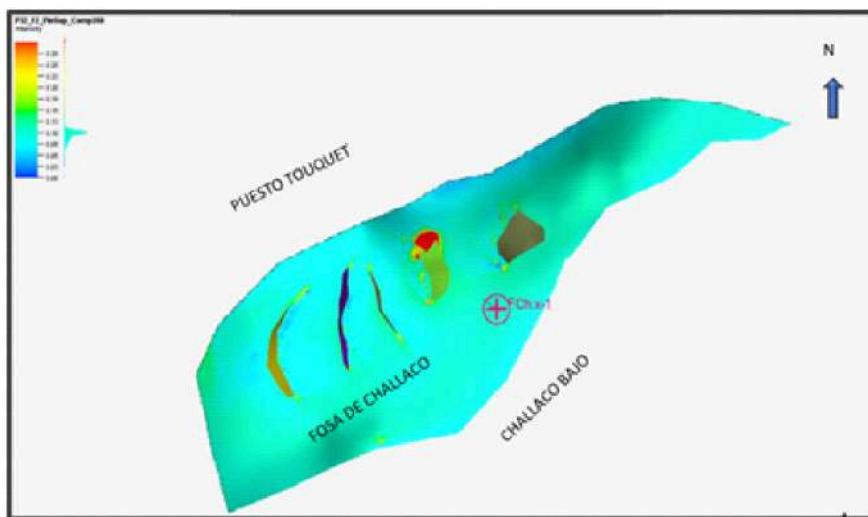


Figura 10: Mapa de intensidad de fracturas de la lámina de la Fosa de Challacó para el tope del Mb Cutral-Co.

3. Consideraciones finales

1. Los resultados finales de este trabajo muestran una visualización tridimensional de la densidad, la distribución, y las propiedades de las fracturas en un modelo estático.
2. A pesar de la limitada información obtenida durante el proceso, se logró elaborar un mapa de intensidades de fracturas para la lámina de la Fosa de Challaco correspondiente al Pliensbachiano Superior, con una dirección de esfuerzo de 350°.
3. La densidad de las bandas de deformación observadas en las imágenes de pozo coincide con el rango de espaciamiento medido en los testigos corona, que es de una fractura de 4 a 9 metros.
4. En los testigos corona del Miembro Cutral Co no se observaron fracturas, aunque sí bandas de deformación. Esto se explica porque la mayoría de las fracturas son verticales, al igual que los sondeos, por lo que, con el espaciamiento detectado, resulta difícil identificar las fracturas en los testigos corona.
5. Por el contrario, en las imágenes de pozo se observa un número moderado de fracturas hacia la base del Miembro Cutral Co.
6. En las escamas de Puesto Touquet y El Porvenir únicamente se presentan modelos conceptuales debido a la falta de imágenes de pozo que permitan calibrar estas áreas.
7. Un análisis dinámico podría confirmar si los niveles de producción serían mayores hacia el NNE en la escama de la Fosa de Challaco, en caso de que esta zona fuera explorada en el futuro.
8. Aunque esta metodología resulta especialmente útil en campos con fracturamiento reconocido, también puede aplicarse a reservorios con porosidad primaria ubicados en zonas estructuralmente complejas, como el área de estudio, con el objetivo de evaluar si las fracturas naturales contribuyen a mejorar su permeabilidad.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que han contribuido de una u otra manera a la realización de este trabajo, desarrollado en el marco del posgrado Especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (FCNyM - UNLP).

Mi agradecimiento especial al equipo del posgrado por brindar una formación de calidad, y por su compromiso con la enseñanza y la investigación.

También extiendo un sincero agradecimiento a mi director y codirector por su orientación y apoyo constante.

A mis colegas y amigos, gracias por su colaboración y aliento durante todo el proceso.

Y, finalmente, a mi familia, por su comprensión y apoyo incondicional en cada etapa de este camino.

Referencias

- [1] C. A. Mombrú and M. A. Uliana, "Esquema tectosedimentario de la cuenca mesozoica de Mendoza y Neuquén," in Proc. 7th Congr. Geol. Argent., vol. 2, 1978, pp. 239–256.
- [2] L. Legarreta and M. Uliana, "La sucesión jurásica en el centro-oeste de Argentina. Arreglo estratigráfico, secuencias y evolución paleogeográfica," Bol. Inf. Petrol., vol. 12, no. 45, pp. 66–78, 1996.
- [3] L. Spalletti, J. Franzese, S. Matheos, and E. Schwarz, "Sequence stratigraphy of a tidally-dominated carbonate-siliciclastic ramp; the Tithonian of the southern Neuquén Basin, Argentina," J. Geol. Soc., vol. 157, pp. 433–446, 2000.
- [4] C. Arregui, O. Carbone, and R. Martínez, "El grupo Cuyo (Jurásico temprano-medio) en la cuenca Neuquina," in Relatorio del XVIII Congr. Geol. Argent., Neuquén, 2011.
- [5] R. Gómez Omil et al., "El Grupo Cuyo en la Dorsal de Huincul, consideraciones estratigráficas, tectónicas y petroleras," in 5º Congr. Explor. Desarr. Hidrocarburos, Mar del Plata, Argentina, 2002.
- [6] G. D. Vergani, "Control estructural de la sedimentación Jurásica (Grupo Cuyo) en la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina. Modelo de falla lístrica rampa-plano, invertida," Boletín de Informaciones Petroleras, vol. 1, pp. 32–44, 2005.
- [7] R. Manceda et al., "Characterization and Modeling of Fractured Reservoirs: Using conventional and unconventional approaches: An application to the Tropical Field, Serranía del Interior, Venezuela," EAGE Proc., Madrid, 2005.
- [8] K. Hyung, M. Mallea, R. Gutiérrez, y P. Malone, "Exploración del Gr. Cuyo (Jurásico) en bloques maduros de la dorsal de Huincul-Puesto Touquet y el Porvenir, Cuenca Neuquina," IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Argentina, 2014.
- [9] E. Margueliche, Caracterización Tectónica – Área Puesto Touquet/El Porvenir. Especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Universidad Nacional de La Plata, 2017.
- [10] O. Ortega, R. Marrett, and S. Laubach, "A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement," AAPG Bull., vol. 90, no. 2, pp. 193–208, Feb. 2006

AUTORA

Carla Diaz Torra

Rue 8 Pasteur, Cagnes sur mer, Francia.

diaztorra@gmail.com

<https://www.linkedin.com/in/carla-diaz-torra-3a14b0a0/>

Geofísica aplicada a la exploración y desarrollo de hidrocarburos: Revisión de las tesis de grado y doctorado en la FCAG-UNLP (2005-2024)

Federico G. E. Späthy Santiago Perdomo

Resumen

Se presenta el aporte de la Geofísica a la exploración y desarrollo de hidrocarburos (HC) en Argentina en los últimos 20 años a través del análisis de tesis de grado y doctorales realizadas en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

La mayor parte son aplicaciones del método sísmico en reservorios convencionales y no convencionales de las cuencas productivas del país. En menor medida hay estudios exploratorios con métodos potenciales (gravimetría y magnetometría), y electromagnéticos.

Las temáticas acompañaron los avances de la industria hidrocarburífera y se observa un aumento de estudios del reservorio no convencional Vaca Muerta mediante interpretación y caracterización sísmica, física de rocas y monitoreo microsísmico. Se evidencia la importancia de fortalecer vínculos con la industria hidrocarburífera para avanzar con estos temas.

La Geofísica es una disciplina flexible que provee a los egresados con sólidas herramientas que no solo les permiten abordar temas de la industria petrolera, si no también temas ambientales como la descarbonización (almacenamiento de CO₂), el almacenamiento de hidrógeno y la exploración geotérmica y de minerales críticos.

El estudio invita a reflexionar sobre el perfil de los profesionales que la FCAG quiere formar, y a discutir los contenidos y tiempos del plan de la carrera.

Palabras clave: Geofísica; Vaca Muerta; Recursos naturales

Abstract

The contribution of Geophysics to hydrocarbon (HC) exploration and development in Argentina over the last 20 years is presented through the analysis of undergraduate and doctoral theses conducted at the Faculty of Astronomical and Geophysical Sciences at the National University of La Plata (UNLP).

Most of these studies involve applications of seismic methods in conventional and unconventional reservoirs in the country's productive basins. To a lesser extent, there are exploratory studies using potential (gravimetry and magnetometry) and electromagnetic methods.

These topics have followed the advances of the hydrocarbon industry, and an increase in studies of the Vaca Muerta unconventional reservoir has been observed, using seismic interpretation and characterization, rock physics, and microseismic monitoring. The importance of strengthening ties with the hydrocarbon industry to advance these topics is evident.

Geophysics is a flexible discipline that provides graduates with solid tools that not only allow them to address issues related to the oil industry but also environmental issues, decarbonization (CO₂ storage), geothermal and critical mineral exploration, and hydrogen storage.

The study makes us think on the profile of the professionals that FCAG seeks to train and to discuss the content and duration of the career.

Keywords: Geophysics; Vaca Muerta; Natural resources.

1. Introducción

Desde su génesis, tanto la carrera de grado como el doctorado en Geofísica de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) estuvieron vinculadas a la prospección de HC. Fueron creadas el 14 de abril de 1948 por parte del Poder Ejecutivo Nacional mediante el decreto N° 10742. La carrera de grado es la primera del país y el doctorado el primero de Latinoamérica (Gershanik y Milone, 1979 [20]). Los primeros egresados se desempeñaron en la industria de HC y la primera tesis doctoral fue sobre aplicaciones de la sísmica de prospección, método ampliamente empleado en la industria petrolera (Harriague 1969 [27]). Respecto a la creación de la carrera, Guillermo Wallbrecher, director del Observatorio Astronómico de la UNLP en el período 1947-1955, declara que "en la nueva carrera se tiende a la satisfacción de importantes necesidades del país, tanto desde el punto de vista científico como práctico. Existe verdadera urgencia en la formación de técnicos para la atención de los servicios meteorológicos, para la investigación de la riqueza del subsuelo de nuestro territorio..." (Wallbrecher, 1948 [69]). Esto muestra que, ya desde su origen, la carrera tuvo dos orientaciones, una científica y otra aplicada.

A lo largo de la historia de la FCAG hubo diferentes iniciativas para mantener el vínculo con la industria. En 1952 se implementó un curso de capacitación en geofísica aplicada, con una duración de dos años, destinado a geólogos. Hacia fines de la década de 1970, se promovió la creación del Departamento de Geofísica Aplicada (Jaschek, 2004 [30]), donde se desarrollaron proyectos de investigación orientados a la exploración y al perfeccionamiento de técnicas de procesamiento sísmico. Es por ello que la mayoría de los trabajos de tesis relacionados con HC se realizaron en este departamento. También, desde el año 2020, profesionales de la FCAG participan como docentes de la Especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, de la FCNyM. En 2025, la UNLP incorporó una fuente sísmica de señal codificada (Nomad 15), lo que representa un renovado impulso para la formación de los egresados, la realización de trabajos finales, líneas de investigación y tesis doctorales. Esta adquisición fortalece el vínculo con la industria, no solo en lo que respecta a HC, sino también en proyectos vinculados a la transición energética, como es la exploración de litio. Por último, cabe destacar que los geofísicos egresados de la FCAG cuentan con una sólida formación en métodos sísmicos y técnicas de procesamiento, la cual es respaldada por la experiencia profesional en la industria de sus docentes.

En este trabajo se identifican líneas de trabajo vinculadas a la exploración y desarrollo de HC a través del análisis de las temáticas abordadas por tesis de grado y doctorales en geofísica defendidas en los últimos 20 años en la FCAG. Desde la creación de la carrera de geofísica hasta fines del 2024 egresaron 255 geofísicos. Se analizaron los 145 trabajos de tesis de grado y 35 doctorales, defendidas entre enero del 2005 y diciembre del 2024, de los cuales una tercera parte aproximadamente son aplicaciones o están vinculadas a los HC.

La geofísica es una disciplina dentro de las Ciencias de la Tierra que estudia diversos fenómenos terrestres mediante observaciones, y la calibración de modelos físicos y matemáticos. La prospección geofísica es un conjunto de técnicas aplicadas que permiten estudiar y determinar propiedades físicas del subsuelo y se utilizan para la exploración de recursos naturales (minerales, agua, HC), la caracterización de posibles áreas contaminadas y en apoyo de investigaciones arqueológicas. Las técnicas más utilizadas son la sísmica de reflexión y refracción, la gravimetría, la magnetometría y los métodos electromagnéticos.

2. Exploración de HC con métodos potenciales y electromagnéticos

2.1 Métodos potenciales

Los métodos potenciales de prospección como la gravimetría y la magnetometría son de particular importancia en las etapas exploratorias iniciales. Si bien son de baja resolución, y su interpretación sin calibración acepta múltiples modelos del subsuelo, permiten cubrir grandes áreas en tiempos reducidos y son mucho más económicos que la sísmica de reflexión, método de mayor uso en exploración y desarrollo

de HC. La gravimetría permite conocer la distribución espacial de las densidades del subsuelo, mientras que la magnetometría la distribución de rocas con propiedades magnéticas. Se utilizan para identificar depocentros y estimar su extensión areal y espesor; también permiten inferir la existencia de estructuras geológicas en el subsuelo como lineamientos, pliegues y fallas. La interpretación de datos gravimétricos y/o magnetométricos, junto con información geológica, permite proponer la realización de otros estudios geofísicos focalizados en áreas de mayor interés prospectivos, como son la sísmica 2D y 3D, como también la perforación de pozos exploratorios. Más información sobre los fundamentos, práctica y aplicaciones de los métodos potenciales se puede encontrar en el libro de Hinze et al. (2013) [29].

El offshore argentino es un área exploratoria de frontera donde las aguas profundas representan un gran desafío tecnológico con oportunidades de alta recompensa. El interés exploratorio se manifiesta por la gran cantidad de información sísmica adquirida en los últimos años y la perforación del primer pozo de aguas profundas (Argerich). En ese contexto, la tesis de Mindlin (2019) [39] aporta al conocimiento regional del margen continental argentino, integrando diferentes datos geofísicos y geológicos a través de modelado gravimétrico. El área de estudio presenta rasgos de gran complejidad e interés tanto para el estudio de la tectónica como para la exploración petrolera. El modelado gravimétrico permitió, por un lado, caracterizar el espesor del relleno sedimentario y la posición de la discontinuidad de Mohorovicic. Por otro lado, permitió caracterizar dos rasgos geológicos propios de márgenes volcánicos: las secuencias de reflectores de material volcánico que buzan hacia el mar (SDR) y las capas de la corteza inferior cuyas velocidades sísmicas y densidades son anormalmente altas.

En la tesis de Gómez (2016) [23] se genera un mapa actualizado de la profundidad del basamento en el noreste de la cuenca neuquina, provincia de Mendoza. Para ello se realiza un modelado de datos gravimétricos terrestres y satelitales, y se calibra con información geológica y de pozos, para reducir la ambigüedad de los resultados. Asimismo, se interpretan lineamientos gravimétricos observados en superficie (volcanes, fallas, etc.) que reflejan un control geológico profundo. Estos estudios, integrados con la información geológica, son fundamentales para comprender la evolución tectosedimentaria de una cuenca y evaluar su potencial para la acumulación de hidrocarburos.

En el trabajo teórico de Maltagliatti (2009) [36] se comparan métodos para la estimación de profundidades utilizando espectros de potencias de anomalías magnéticas, lo cual es especialmente importante para determinar espesores y delimitar cuencas sedimentarias. También se establecen criterios para aplicar la metodología a la estimación de profundidades usando datos reales. Las aplicaciones de desarrollos teóricos de este tipo son de interés en exploración.

2.2 Métodos electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos de prospección permiten determinar la distribución de resistividades del subsuelo a partir de la medición de su respuesta electromagnética y un adecuado procesamiento de los datos. Las variaciones en estas resistividades se interpretan para caracterizar las estructuras geológicas y las propiedades físicas de las rocas que las componen. El método electromagnético más empleado en exploración de hidrocarburos es la magnetotelúrica (MT). Si bien es de baja resolución, es de gran utilidad en ambientes geológicos complejos como la faja plegada y corrida, o en zonas con coladas basálticas, donde se dificulta o imposibilita la adquisición de datos sísmicos de buena calidad. Otro método EM empleado en otros lugares del mundo para reducir el riesgo exploratorio offshore es el método de fuente controlada o CSEM (por sus siglas en inglés, controlled source electromagnetics), ampliamente utilizado en las costas de Brasil, el Golfo de México, Mar del Norte y Mar de Barents. Más información sobre los fundamentos y aplicaciones de métodos EM se puede encontrar en el libro de Nabighian (1987) [41].

2.2.1 Magnetotelúrica

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica de exploración geofísica que permite obtener información de la distribución de resistividades del subsuelo a partir de mediciones y procesamiento de las variaciones temporales del campo electromagnético natural en la superficie terrestre. Permite explorar profundidades desde 100 m hasta 100 km. Más información puede obtenerse en el libro de Simpson y Bahr (2005) [61].

El trabajo de Nicora (2020) [43] es un estudio MT en el ambiente geológico de plataforma en el sector nororiental de la cuenca neuquina. El objetivo es estimar el espesor de la columna sedimentaria en una zona donde las coladas basálticas superficiales dificultan la adquisición de datos sísmicos con una buena relación señal-ruido. Se procesaron e interpretaron datos electromagnéticos de 51 estaciones distribuidas a lo largo de 25 km que registraron más de 20 hs. Las series temporales se procesaron para calcular las funciones de transferencia MT y, en función de ellas, se realizó en primer lugar un análisis de dimensionalidad para entender la complejidad del subsuelo y luego se realizaron inversiones 1D y 2D para obtener la distribución de resistividades en función de la profundidad en la zona de estudio. Los resultados muestran una clara tendencia regional de adelgazamiento de la secuencia sedimentaria, desde unos 750 m al NE del perfil hasta unos 500 m al SO, y variaciones locales interpretadas como un sistema de fallas inversas con rumbo aproximado de Norte-Sur. Se estimó la resistividad del basamento y su geometría, al igual que se definió el espesor de la capa superficial de basaltos y el rango de resistividades que presenta. Los resultados se validaron con información geofísica y geológica preexistentes en el área.

Entre los trabajos con enfoque teórico se encuentran la tesis de Gaffoglio (2023) [19], que presenta un estudio introductorio y sistemático del modelado numérico en magnetotelúrica bidimensional, aplicado al análisis de objetivos heterogéneos isótropos y anisótropos; y la tesis de Montenegro (2024) [40], que incorpora herramientas de aprendizaje automático en el procesamiento de datos magnetotelúricos.

2.2.2 CSEM

El método electromagnético de fuente controlada (CSEM) es un método de exploración marino que permite estudiar la distribución de resistividades en el subsuelo. Se emplea de forma complementaria a la sísmica de reflexión para reducir el riesgo exploratorio offshore. Para su aplicación se distribuyen receptores sobre el fondo marino, luego una fuente EM es remolcada sobre el fondo. Con los datos electromagnéticos registrados y procesados, se elabora un modelo de resistividades del subsuelo. La metodología aún no fue aplicada en Argentina, pero dos trabajos de tesis abordan este tema desde un punto de vista teórico.

En la tesis de Macchioli Grande (2015) [35] se analiza analíticamente y numéricamente la respuesta EM para un modelo bidimensional del subsuelo que simula ser un reservorio de hidrocarburos offshore. La tesis de Elías (2019) [17] analiza e implementa algoritmos para resolver el problema directo en CSEM en tres dimensiones. Estudia el comportamiento de estos algoritmos y la respuesta del campo EM obtenido, planteando modelos con características acordes con problemas de interés geofísico.

2.2.3 Sondeos eléctricos verticales

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) consisten en realizar una determinación de la resistividad aparente del subsuelo empleando cuatro electrodos en la superficie, incrementando la separación entre los electrodos de inyección de corriente y los de medición de potencial eléctrico. El aumento de la separación progresiva se traduce en una mayor profundidad de penetración de la corriente, y se calcula para cada separación de electrodos la resistividad aparente del medio explorado. Las curvas de resistividad aparente deben ser procesadas con algoritmos de inversión para proveer un modelo de resistividad verdadera en función de la profundidad (Orellana, 1982 [44]).

En el trabajo de Arioni (2016) [4] se utilizó el método SEV con el objetivo de explorar el basamento en el sector nororiental de la cuenca neuquina, donde la columna sedimentaria se encuentra cubierta por coladas basálticas con espesores variables de 50 a 100 m, que limitan la aplicabilidad de otros métodos. El

análisis del perfil de resistividad del pozo, junto con el perfil litológico permitió evaluar las propiedades eléctricas de los estratos presentes, planificar la adquisición de las curvas y guiar la interpretación. Luego se midieron 5 SEV de 3500 m que permitieron obtener perfiles de resistividades donde se interpreta la disminución de la profundidad del basamento hacia el noreste y el espesor variable de las coladas basálticas. Por debajo de las coladas se identificaron formaciones geológicas que podrían tener interés prospectivo. En el trabajo se aplicó una técnica de inversión que permitió cuantificar la incertidumbre de los modelos propuestos.

2.2.4 Electrosísmica

Otros trabajos teóricos sobre métodos EM son el de Späth (2008) [63] que estudia la conversión de energía EM en energía mecánica (electrosísmica) y su uso para la detección de reservorios con HC para un subsuelo 1D y las tesis de Kreimer (2009) [31] y Bucher (2021) [11] que abordan el proceso inverso de conversión de energía mecánica en EM (sismoeléctrica).

3. El método sísmico en la exploración y desarrollo de HC

La sísmica de reflexión es el método de prospección más utilizado para la exploración y desarrollo de hidrocarburos. Se implementa a través de la adquisición, procesamiento, migración e interpretación de datos sísmicos. Permite elaborar un modelo de los primeros kilómetros del subsuelo con sus principales características geológicas.

La adquisición es la etapa en la que se registran los datos. Se planifica en función de un objetivo geológico e implica generar señales acústicas en la superficie con fuentes (explosivos, vibroseis o cañones de aire). Estas señales se propagan por el subsuelo, se reflejan en las diferentes interfaces y retornan a la superficie donde son registradas por receptores (geófonos, acelerómetros o hidrófonos) y almacenados como trazas sísmicas. El procesamiento sísmico es un conjunto de técnicas y algoritmos que se aplica a las trazas sísmicas y que apunta a acondicionar los datos y mejorar la relación señal-ruido. La migración es el proceso mediante el cual toda la energía difractada por las inhomogeneidades de la subsuperficie es re-enfocada a su posición de origen, lo que permite generar una imagen representativa del subsuelo. El principal desafío del procesamiento de la sísmica terrestre en Argentina es la solución de estáticas, mientras que en la sísmica offshore lo es la atenuación del ruido coherente, especialmente las reflexiones múltiples. La interpretación se realiza con el objetivo de obtener la mayor información geológica posible del subsuelo a partir de la imagen obtenida. En función de los resultados se define la ubicación de propuestas de perforación de pozos.

La sísmica es un método costoso que implica manejar grandes volúmenes de información (Giga o Terabytes), demanda grandes recursos computacionales (clusters de procesamiento) y lleva meses de trabajo obtener el producto final.

El método experimentó un notable desarrollo y una evolución constante, impulsado por los intereses económicos vinculados a la exploración de hidrocarburos. Este avance se dio tanto en el plano teórico como en el práctico y tecnológico, acompañado por el uso de herramientas de cómputo de vanguardia en cada etapa.

3.1 Procesamiento sísmico

Son numerosas las tesis de la FCAG que contribuyeron al desarrollo de herramientas de procesamiento sísmico. Para más información sobre este proceso se puede consultar el libro de Yilmaz (1987) [68].

El picado o detección de los primeros arribos consiste en interpretar los tiempos de llegada de las señales refractadas en la superficie más cercana para estimar su velocidad y espesor de forma tal de compensar adecuadamente su efecto en los registros sísmicos. El picado se suele realizar de forma manual o automática con supervisión. Es una etapa que consume mucho tiempo de trabajo. La tesis doctoral de

Sabbione (2012) aborda el desarrollo de estrategias para la detección automática de señales sísmicas, proponiendo nuevos algoritmos y métodos que permitan realizar esta tarea de manera precisa, eficiente y automatizada, con énfasis en el picado de primeros arribos. El trabajo analiza diversos atributos sísmicos con el objetivo de resaltar las señales de interés por encima del ruido de fondo, destacando especialmente el uso de la dimensión fractal de la traza. La tesis de grado de Volonté (2012) [67] trata también sobre detección automática de primeros arribos sísmicos. Esta tarea puede realizarse analizando la variabilidad de atributos sísmicos como el cociente de energías, la entropía y la dimensión fractal. Dado que no es posible saber cuál de estos atributos tendrá el mejor desempeño para un cierto conjunto de datos, en la tesis se propone una nueva estrategia que emplea una combinación de los tres atributos. Los resultados se validan empleando datos reales y comparándolos con resultados obtenidos con atributos individuales.

Cuando se emplean camiones vibradores como fuente sísmica, como el Nomad 15 adquirido por la UNLP, los registros de campo son correlacionados con la señal emitida para emular registros obtenidos con una fuente impulsiva. En el trabajo de D'Biassi (2006) [16] se emplea un algoritmo de correlación extendida que permite obtener información de eventos profundos que no se obtienen con las técnicas convencionales de correlación. Al aplicarlo en datos de la parte central de la Cuenca Neuquina obtuvo información de fallas y reflectores por debajo de los 8 km y hasta los 30 km de profundidad. También prueba un método no lineal de deconvolución que permite recuperar las bandas de frecuencia atenuadas severamente por la Corteza profunda, frecuencias que son imposibles de recuperar por métodos lineales. Probó el método con datos de la subcuenca de Lomas de Olmedo, Noroeste Argentino, lo cual acentuó rasgos de inversión tectónica y permitió una caracterización más precisa de reflectores de la columna sedimentaria hasta el basamento.

La migración sísmica es la etapa final del procesamiento que intenta relocalizar la energía difractada proveniente de estructuras del subsuelo a su verdadera posición; siendo su objetivo el de revertir los efectos de la propagación de las ondas para obtener una mejor imagen de la subsuperficie. En el trabajo de Páez (2023) [46] se contrastan dos algoritmos de migración en profundidad basados en la ecuación de onda aplicados a datos apilados: el método split-step (SS), y la migración Kirchhoff, esta última ampliamente empleada en la industria. Se aplican ambos métodos a datos sintéticos para evaluar su efectividad y luego a datos reales de la Cuenca Austral, Tierra del Fuego, y por último a datos de la Cuenca Huallaga, ambiente geológico de faja plegada y mayor complejidad estructural. Los resultados muestran que ambos métodos logran migrar adecuadamente las secciones de entrada. Split-step reconstruye de forma más nítida los estratos buzantes y con Kirchhoff se logra resolver de mejor manera el problema de borde.

El trabajo de Szelagowski (2022) [64] desarrolla códigos computacionales para el cálculo de la transformada de Radón. Ésta transformada se emplea en etapas de acondicionamientos de gathers para atenuar el ruido coherente y aleatorio cuando se requiere preservar verdaderas amplitudes. Implementa la transformada Radón empleando algoritmos voraces, y los implementa en datos sísmicos sintéticos y reales de dominio público para evaluar su eficacia computacional.

En la tesis de Barale (2015) [5] se aplica una secuencia de procesamiento sobre sísmica multicomponente terrestre 2D. Por lo general, cuando se habla de sísmica de reflexión, los sensores detectan sólo el movimiento vertical del terreno, captando ondas de compresión (ondas P). La sísmica multicomponente utiliza sensores de tres componentes (una vertical y dos horizontales) lo cual permite registrar, además de las ondas P, las ondas S y características vectoriales del campo de onda, como es la polarización. Debido a la complejidad que requiere su registración y procesamiento, como así también su elevado costo, la sísmica multicomponente aún no se encuentra tan extendida. Hay dos grandes diferencias con el procesamiento convencional que contribuyen a que este procesamiento posea esas características no tan accesibles: la asimetría de la trayectoria de las ondas PS y las dificultades para corregir los efectos de la capa somera de baja velocidad. Estos son aún temas de investigación, y en particular, para aquellas zonas con estructuras complejas.

3.2 Interpretación, caracterización y modelado sísmico

El análisis de los resultados del procesamiento sísmico, orientado a identificar reflectores y asociarlos con formaciones y estructuras geológicas, así como con sus propiedades físicas - como tipo de litología, porosidad o saturación - constituye lo que se denomina interpretación y caracterización. Estos procesos están estrechamente ligados a la geología como disciplina. Por su parte, el modelado sísmico se emplea tanto en las etapas de diseño de adquisición y procesamiento como en la validación de los modelos interpretados. Más información sobre estos temas se puede encontrar en los libros de Brown (1986) [9], Simm y Bacon (2014) [60], y Vernengo y Trinchero (2024) [66].

En el trabajo de Actis (2019) [1] se emplean atributos sísmicos para caracterizar la Fm. Serie Tobífera en la Cuenca Austral, Tierra del Fuego. Las características de este reservorio volcanoclástico constituyen un desafío para la caracterización sísmica. En su trabajo evalúa el uso y aporte de distintos atributos sísmicos para diferenciar distintos sectores del dato a partir de la respuesta en sus componentes de amplitud, fase y frecuencia. Define patrones sísmicos y una respuesta característica para el intervalo de interés. Realiza modelos de cuña para mejorar la interpretación y reducir su incertidumbre. Estima facies sísmicas por forma de onda y clasifica el dato sísmico en función de estas mostrando ser una herramienta de gran aplicabilidad en casos de dato sísmico heterogéneo y en la delimitación de áreas de interés.

Panelo (2022) [47] focaliza en la caracterización del reservorio Fm. Quintuco en la Cuenca Neuquina, Argentina. Para ello realiza una inversión simultánea sobre sísmica pre-stack obteniendo volúmenes de impedancia P y S. Emplea estos volúmenes para propagar la propiedad de reservorio porosidad mediante redes neuronales con arquitectura deep learning. Compara y cuantifica los resultados con los obtenidos usando otras metodologías. Como resultado obtiene áreas e intervalos estratigráficos con mejores propiedades petrofísicas dentro del yacimiento definiendo las áreas más prospectivas. También identifica e interpreta un geocuerpo de alta porosidad y cuantifica sus reservas in situ de HC.

La tesis doctoral de Pérez (2015) [51] aborda el problema de inversión de datos sísmicos prestack. Desde un punto de vista matemático es un problema mal planteado y condicionado que requiere la utilización de regularizaciones y restricciones para estabilizar el proceso de inversión, mitigar el problema de la no-unicidad y, además, darle a la solución estimada alguna característica deseada de acuerdo con la información a priori disponible. En su tesis presenta tres nuevas estrategias basadas en la utilización de diferentes regularizaciones que estabilizan el problema de inversión y promueven soluciones sparse a partir de datos sísmicos prestack: Inversión sparse-spike mediante Simulated Annealing y mínimos cuadrados, mediante regularización con la norma l_1 y mediante regularización con la norma $l_{2,1}$. Evalúa el desempeño de las diferentes aproximaciones con datos sintéticos y de campo.

Varias tesis abordan el desarrollo de herramientas que se aplican sobre datos sísmicos ya migrados y apilados. El objetivo es mejorar la imagen sísmica para facilitar su interpretación resaltando ciertos rasgos del dato sísmico o mediante la atenuación de ruido. Un ejemplo es el trabajo de Tessone (2019) [65] que implementa una técnica espectral de filtrado orientado por estructuras y lo aplica a datos sísmicos 3D de acceso público de Penobscot, Nueva Escocia, Canadá, y del Mar del Norte, Países Bajos. Evalúa la capacidad del método para atenuar ruido aleatorio y coherente sin distorsionar los rasgos geológicos. Los resultados muestran que la aplicación del filtro propuesto proporciona un producto más adecuado para la interpretación cualitativa del dato. La imagen final es más clara, sin distorsiones debidas a ruidos coherentes, brindando una representación más precisa de la geología de la zona de estudio.

Dentro del desarrollo teórico de herramientas de procesamiento sísmico, útiles para complementar la interpretación, se encuentran las tesis de Nicolisi (2024) [42] y Goglino (2024) [22] quienes aplican técnicas computacionales de aprendizaje de diccionario para atenuar ruido sísmico coherente y aleatorio, respectivamente.

La tesis de Lo (2022) [34] desarrolla un atributo para la corrección a fase cero de señales sísmicas y la aplica tanto a datos sintéticos como reales del reservorio Boonsville, cuenca de Fort Worth en Texas, Estados Unidos.

La tesis de Padrón (2022) [45] implementa la metodología de detección de bordes mediante el filtro Sobel para enfatizar los bordes y discontinuidades de rasgos geológicos. Evalúa su desempeño con datos públicos de Penobscot, Nova Scotia, Canadá y de Parihaka, Nueva Zelanda.

La tesis de Corbetta (2023) [14] aplica un algoritmo de segmentación, que pertenece a la familia de aprendizaje automático, para detectar fallas geológicas en datos sísmicos. Entrena al algoritmo con datos sintéticos para luego usar en la detección de fallas en datos reales de acceso público. Los resultados muestran el potencial de las técnicas de aprendizaje automático para ser utilizadas en la detección de fallas geológicas.

Carozzi (2010) [12] implementa una técnica que calcula los coeficientes de reflexión y transmisión generalizados para una onda sísmica monocromática plana incidiendo en el tope de un medio estratificado. Analiza el comportamiento mecánico en función del fluido que se aloja en el espacio poral y tiene en cuenta efectos de atenuación y dispersión. Emplea estos conceptos para el estudio de la respuesta teórica de la acumulación de CO₂ de un reservorio de almacenamiento típico. El análisis de los coeficientes de reflexión en este tipo de reservorios permite llevar a cabo su monitoreo.

La tesis doctoral de Gómez (2014) [24] evalúa el monitoreo de reservorios de dióxido de carbono mediante el análisis de la reflectividad sísmica e indicadores asociados. Modela y analiza el comportamiento de la reflectividad sísmica de onda P y atributos asociados, en función del ángulo de incidencia (AVA) y de la frecuencia (AVF), como indicadores sísmicos útiles al monitoreo de reservorios donde se inyecta dióxido de carbono con el fin de su almacenamiento permanente. En particular estudia la capacidad de monitorear la saturación de dióxido de carbono, su tipo de mezcla con el agua de formación, el espesor de la acumulación, y su evolución temporal.

Panizza (2013) [48] realiza modelado numérico para el estudio y aplicación de la teoría de Biot, la cual describe la propagación de ondas sísmicas en medios porosos saturados. Elige la formulación de Garlekin del método de elementos finitos para la construcción de una solución aproximada a las ecuaciones de Biot en el caso 1D y lo aplica para el estudio de la propagación de ondas para un modelo de un medio fracturado.

En su trabajo de tesis, Sarochar (2020) [58] desarrolla un simulador 3D que emplea la teoría de Biot para simular la propagación de ondas sísmicas en medios porosos, usando el método numérico de elementos finitos y computación de alto rendimiento.

Hawryszczuk (2014) [28] estudia los conceptos teóricos vinculados con la anisotropía sísmica. Analiza teóricamente medios fracturados VTI (transversalmente isótropo con eje de simetría vertical) y HTI (medio transversalmente isótropo con eje de simetría horizontal). Realiza sismogramas sintéticos mediante un código en Fortran utilizando elementos finitos para un modelo geológico sencillo, y observa el efecto de la anisotropía sobre la corrección de normal moveout.

Sánchez Camus (2015) [56] analiza la anisotropía de las velocidades sísmicas, que puede deberse a la presencia de fracturas y campos de tensiones regionales en el subsuelo. El fenómeno se manifiesta en variaciones de la respuesta sísmica con ángulos verticales (polares) y horizontales (acimutales); por lo tanto, estudios de AVO (Amplitude Versus Offset) y AVAz (Amplitude Versus Azimuth) resultan ser técnicas que brindan información sobre el estado de fracturamiento y esfuerzos del medio. En la primera parte de su trabajo obtiene gathers sintéticos empleando el software de elementos finitos Abaqus-CAE y realiza el procesamiento de estos aplicando filtros y corrección moveout. En la segunda parte los gathers procesados se usan para estimar la orientación preferencial de fracturas.

La amplitud y contenido espectral de las ondas sísmicas reflejadas es influenciada por el tipo y características de las rocas del subsuelo, la forma de las interfaces, la presencia de heterogeneidades, las propiedades petrofísicas, el contenido de fluidos porales y el tipo de fuente sísmica, entre otros. Guevara (2016) [25] utiliza herramientas de modelado y de física de rocas para estudiar estos efectos, mediante la

generación de sismogramas sintéticos de reflexión en rocas porosas saturadas y su posterior análisis mediante métodos de descomposición espectral. Concluye que los espesores y fenómenos de interferencia asociados son los de mayor influencia en la ocurrencia de amplitudes anómalas de baja frecuencia, en especial en rocas muy consolidadas, por lo que no deben entenderse como detectores directos de hidrocarburos.

La tesis doctoral de Rubino (2008) [54] estudia la propagación, atenuación y dispersión de ondas sísmicas en medios porosos saturados altamente heterogéneos y analiza la respuesta sísmica de sedimentos que contienen hidratos de metano. Las simulaciones numéricas sugieren que fenómenos de scattering asociados con distribuciones altamente heterogéneas de hidratos de metano permitirían explicar los altos niveles de atenuación sísmica que se suelen observar en estos ambientes.

La tesis doctoral de Solazzi (2018) [62] desarrolla herramientas numéricas y teóricas que permiten mejorar la comprensión de la respuesta sísmica de rocas heterogéneas saturadas por fluidos inmiscibles. De significativa importancia es la vinculación de los procesos de flujo con las características de las curvas de atenuación y dispersión de las ondas sísmicas. Ampliar la comprensión de las conexiones entre los procesos de flujo, la distribución espacial de los fluidos porales, y los observables geofísicos permiten alcanzar algunos de los objetivos centrales de la Geofísica Aplicada y Ambiental, tales como la determinación no invasiva de los parámetros hidráulicos de un reservorio, y del tipo de fluido poral y su evolución temporal.

La tesis doctoral de Castromán (2021) [13] desarrolla y analiza nuevas metodologías para el modelado de la respuesta sísmica de medios poroelásticos con fracturas. En una primera etapa considera que existe conectividad hidráulica entre las fracturas y la roca circundante, la cual es modelada como un medio poroso homogéneo. En una segunda etapa, dado que las fracturas suelen encontrarse rodeadas por regiones de intenso fracturamiento a menor escala, denominadas zonas de daño, se estudia este efecto en la respuesta sísmica efectiva de una roca de baja permeabilidad con fracturas de mesoescala.

3.2.1 Estudios AVO

El coeficiente de reflexión de las ondas sísmicas que inciden en una interfase entre dos capas varía con el ángulo de incidencia y depende de las propiedades físicas de las capas. Es por ello que el análisis de cómo varían las amplitudes con el offset en datos sísmicos en el tope de un reservorio, puede ser indicativo de la presencia de hidrocarburos en éste. La interpretación se complementa mediante modelado directo de respuesta sísmica para escenarios de reservorio saturado con agua y con hidrocarburos. Para conocer la respuesta sísmica del reservorio para diferentes tipos de fluidos y grados de saturación se realiza lo que se denomina sustitución de fluidos. El tema se desarrolla en el libro de Castagna y Chopra (2014) [70].

La tesis de Martinic (2005) [38] es un estudio AVO para caracterizar la formación Magallanes en los yacimientos María Inés y Barda las Vegas Norte, Cuenca Austral, Argentina. Esta formación suele presentar anomalías de amplitud en el dato apilado que no siempre están asociadas a presencia de HC. Mediante el análisis AVO se identifican anomalías clase I en la zona sur de María Inés, vinculadas a reservorios de alta impedancia. En la zona NE de María Inés y N de Barda las Vegas se observan anomalías clase IV, asociadas a reservorios de baja impedancia. En presencia de HC no es posible identificar reservorios a partir de clasificar las anomalías AVO.

El trabajo de Blanco (2006) [7] es un estudio AVO de reservorios de la cuenca de Burgos en México. Realiza sustitución de fluidos para modelar diferentes escenarios que permitan interpretar las anomalías de amplitud observadas en los datos sísmicos. Los reservorios de buen espesor saturados de gas presentan anomalías del tipo I ya que son de alta impedancia respecto a la roca suprayacente. Identifica 3 indicadores de presencia de gas: valores negativos de la diferencia entre el coeficiente de reflexión de ondas compresionales y ondas de corte; la diferencia entre la suma parcial lejana y la cercana; valores bajos de $\lambda\rho$ en diagramas de $\lambda\rho$ y $\mu\rho$. También encuentra que la relación V_p/V_s permite discriminar litologías. El estudio se empleó para recomendar un flujo de trabajo para el intérprete sísmico.

Álvarez (2007) [2] realiza un estudio AVO y una inversión elástica para caracterizar el miembro Avilé en la cuenca Neuquina, Argentina. Los atributos AVO permiten identificar las zonas más probables de contener HC. La interpretación de los atributos se apoya en el modelado de sísmica sintética para conocer el efecto de los fluidos sobre la misma. La inversión elástica, de la sísmica apilada para ángulos de incidencia media, muestra que las zonas con mayor probabilidad de contener HC coinciden con valores mínimos de impedancia elástica. Como resultado se identificaron dos áreas con buena calidad de reservorio y posiblemente saturadas con HC.

Mancini (2023) [37] realiza un estudio en el flanco norte de la cuenca del Golfo de San Jorge, Argentina, para caracterizar un reservorio de alta porosidad dentro de la formación Mina del Carmen. Realiza modelado de sísmica sintética a partir de información de pozo para diferentes escenarios que contemplan variaciones en la porosidad y en la saturación de gas. Para este último caso realiza sustitución de fluidos. Emplea la respuesta sísmica sintética para calcular atributos AVO y comprender la respuesta de la base del reservorio.

3.3 Sísmica de pozo

Un perfil sísmico vertical o VSP (Vertical Seismic Profile) es un proceso de medición en el que se genera una señal sísmica en la superficie de la Tierra que es registrada por sensores ubicados a diferentes profundidades en un pozo. Los datos de VSP tienen dos usos principales. El primero es obtener una relación tiempo-profundidad que permita vincular la información de pozo con los datos de sísmica de superficie. El segundo es obtener una imagen sísmica de detalle en torno al pozo que ayudará en la interpretación de la sísmica de superficie. Más información sobre el tema se puede consultar en el libro de Hardage (1985) [26].

Las tesis de Santivañez (2008) [57] y Pontoriero (2017) [52] abordan la conversión de ondas P a S en VSPs de incidencia normal, fenómeno que se observa en un 15% de los VSP adquiridos de Argentina. La identificación y procesamiento de estas ondas convertidas tiene aplicaciones en la sísmica multicomponente y la inversión de amplitudes de la sísmica 3D. Además, en la etapa de perforación, permite evaluar parámetros elásticos para garantizar la estabilidad del pozo. En yacimientos no convencionales se puede determinar la existencia de anisotropía para definir un programa de fracturamiento.

El trabajo de Santivañez consiste en el tratamiento de los datos de un VSP para evaluar el grado de conversión de ondas P a S y su aprovechamiento para nuevas aplicaciones de la sísmica de superficie. Las condiciones de incidencia normal de los rayos sobre los receptores en el pozo convierten a este hecho en una singularidad, siendo el primer caso en la región de Sudamérica en que se detecta este comportamiento en un VSP con pequeño apartamiento de la fuente y no se encuentra documentado en otras partes del mundo. El análisis de los resultados conduce no sólo a separar un tren de ondas S descendentes con una relación señal/ruido muy buena, sino que además se advierte en estas ondas un comportamiento anisotrópico. La identificación de campos de ondas S convertidas y su caracterización tiene aplicaciones directas a la sísmica multicomponente y a la construcción de un modelo AVO en la escala de resolución correspondiente a la sísmica. La presencia de anisotropía podría abrir las aplicaciones al campo de la descripción de yacimiento, al proveer información sobre la dirección de fracturación y apoyar un plan de perforación óptimo.

El trabajo de Pontoriero evalúa el grado de conversión de ondas P a S a partir de datos de un VSP con fuente cercana al pozo en las formaciones Quintuco y Vaca Muerta en la región del engolfamiento de la cuenca Neuquina. En el trabajo se procesó la información del VSP para estimar un modelo de velocidad de ondas P, se identificaron ondas S y se estimó un modelo de velocidad de ondas S para el intervalo Quintuco - Vaca Muerta. A partir de estos parámetros se calcularon la relación V_p/V_s y el módulo de Poisson. Finalmente, se realizó un cálculo de los factores de atenuación de ondas P y S que, junto con otros parámetros, serán de utilidad para la caracterización sísmica del intervalo de interés.

4. Caracterización sísmica de VM y otros no convencionales

De particular interés en los últimos años es el estudio del reservorio no convencional Vaca Muerta, cuya exploración comenzó en 2010, y que actualmente aporta más del 50 % de la producción de gas y petróleo de Argentina. El método sísmico se adaptó a los desafíos que implica el desarrollo de VM, que se realiza mediante la perforación de pozos horizontales estimulados a través de fracturas hidráulicas.

4.1 Caracterización sísmica

El trabajo de caracterización sísmica de Pasiecznik (2018) [50], en la zona geológica del Engolfamiento Neuquino, permite identificar zonas más favorables para el emplazamiento de futuros pozos y definir dentro de las mismas niveles de navegación de pozos horizontales. Con información de pozo se observa una fuerte correlación entre la impedancia P y la impedancia S por lo que no se justifica hacer una inversión pre-stack. Realiza inversión de amplitudes sísmicas post-stack y obtiene un volumen de impedancia acústica a partir del cual propaga propiedades de interés del reservorio como porosidad, fragilidad y contenido orgánico total. Interpreta la variación espacial de estas propiedades, para tres tramos interpretados en el intervalo de interés.

El trabajo de Angulo (2022) [3] realiza interpretación y caracterización sísmica en un intervalo que abarca desde la segunda Cocina de VM hasta su base en un área del noreste de la Cuenca Neuquina que se encuentra en etapas tempranas de desarrollo. Realiza un estudio del contexto estratigráfico y estructural del área, luego interpreta las principales superficies en el dato sísmico para posteriormente realizar una inversión poststack. Los resultados de la inversión permiten interpretar 5 niveles orgánicos de interés y generar un cubo de porosidad para definir las zonas con mayor potencial para el desarrollo.

Ghersi (2022) [21] realiza la caracterización sísmica de la FM. VM en el sector sur oriental del engolfamiento a partir de inversión post-stack de datos sísmicos 2D. El volumen de impedancia es usado para predecir contenido orgánico total. Estos valores son calibrados con un trabajo vecino de caracterización 3D. El uso de métodos geoestadísticos le permite elaborar mapas de COT para distintos niveles de la formación.

El trabajo de Quiroga (2018) [53] cuantifica la incertidumbre al obtener parámetros elásticos mediante inversión sísmica para la FM. VM. Para ello analiza la sensibilidad ante la variación en el nivel de ruido de los datos, el rango de ángulos cubierto por los gathers y la cantidad de sumas parciales empleadas en la inversión. Concluye que es posible realizar una estimación adecuada de la reflectividad a incidencia normal para todos los escenarios simulados. En cuanto a la información de impedancia P y densidad, presenta valores aceptables para situaciones de alta relación señal-ruido y gran cobertura de ángulos de incidencia.

Los trabajos de caracterización anteriormente mencionados se basan en inversión sísmica de tipo determinístico, es decir, se obtiene un único resultado al realizar la inversión. El trabajo de Corva (2022) [15] emplea inversión estocástica en la cual se generan múltiples realizaciones que son soluciones equiprobables al problema de inversión sísmica. De esta manera se obtienen múltiples modelos, con mayor detalle, que honran al dato sísmico, los perfiles de pozo y la información geológica. El grado en el cual los diferentes modelos difieren entre sí es una medida de la incertidumbre asociada al proceso de inversión. En el trabajo se realiza inversión estocástica para la FM. VM. y se compara con los resultados de una inversión determinística empleando datos del bloque Loma Campana en la región del Engolfamiento Neuquino. Los volúmenes de impedancia acústica obtenidos mediante ambos métodos se utilizan para derivar volúmenes de porosidad y contenido orgánico total.

4.2 Física de rocas

La física de rocas es clave para realizar caracterización sísmica ya que estudia las relaciones cuantitativas entre las propiedades de las rocas (litología, porosidad, permeabilidad, etc.) y las observaciones geofísicas como amplitudes, velocidades, densidades y parámetros elásticos.

La tesis de Bokhonok (2015) [8] analiza el comportamiento elástico anisótropo a escala sísmica que presentan gran parte de las lutitas orgánicas. Para ello modela la lutita rica en materia orgánica como un medio poroelástico efectivo transversalmente isótropo compuesto por minerales de arcilla, querógeno y petróleo. Emplea diferentes modelos, los calibra con datos de lutitas negras ricas en materia orgánica de la formación Bakken en la cuenca Williston, Estados Unidos, y analiza los rangos de validez de cada uno. También calcula los módulos de Young y Poisson, de gran importancia para la planificación de fracturamiento hidráulico. Contar con modelos calibrados para este tipo de litologías es fundamental para conocer su respuesta sísmica.

El trabajo de G. Blanco (2019) [6] aborda la dificultad de vincular parámetros petrofísicos a parámetros elásticos para la Fm. VM. Utiliza diferentes modelos de física de rocas para describir el comportamiento elástico y ajustar velocidades sónicas y ultrasónicas. La calibración de los diferentes modelos isótropos se realiza a partir de datos de laboratorio y perfiles de pozo. Logra un buen ajuste de las velocidades y una caracterización elástica local de Vaca Muerta. Concluye que, tanto el modelo de Hashin-Shtrikman basado en teorías de medio elástico efectivos, como el modelo semi-empírico de Krief combinado con la teoría de Gassmann con una calibración adecuada, son útiles para el modelado de las velocidades en la formación Vaca Muerta o en otras margas y lutitas orgánicas.

La tesis doctoral de Panizza (2023) [49] estudia un conjunto de problemas relacionados a la calibración y aplicación de la física de rocas para reservorios NOC a diferentes escalas. Se centra en la calibración, con datos de distintas shales, y a diferentes escalas, de un modelo de física de rocas poroelástico que incorpora información de los componentes petrofísicos, geoquímicos, mineralógicos y de fluidos porales de la roca con el objetivo de poder relacionar esta información con las velocidades sísmicas de las ondas P y S. Emplea y modifica el modelo de sustitución sólida tipo Gassmann. El modelo de física de rocas es ajustado por medio de inversión numérica, a partir de comparar las velocidades predichas con las velocidades medidas. Aplica el flujo de trabajo a 3 casos de estudio: un caso utiliza mediciones en dos pozos de velocidades ultrasónicas sobre muestras verticales y horizontales en la formación Inoceramus, Cuenca Austral, Argentina. El segundo caso es la primera vez que se comparan las predicciones de una fórmula tipo Gassmann anisótropa de las velocidades de ondas para muestras saturadas a partir de las secas para una roca tipo shale argentina con alto contenido de carbonato. Las muestras de roca son de afloramientos de la formación Agrio, Cuenca Neuquina, Argentina, con ensayos diseñados y realizados en los laboratorios de Y-TEC S.A. El tercer caso modela las velocidades de perfilaje sónico a partir de información petrofísica, de fluidos saturantes, de contenido orgánico y de fracciones litológicas tanto de datos de perfilaje de pozo como del análisis de recortes de perforación en el laboratorio, con datos de dos pozos en la formación Inoceramus, Cuenca Austral, Argentina.

4.3 Monitoreo microsísmico

El monitoreo microsísmico consiste en la adquisición pasiva, detección, análisis e interpretación de señales generadas en torno a las fracturas inducidas durante la estimulación hidráulica. Esta técnica se emplea para permitir el flujo de gas y/o petróleo desde la roca reservorio hacia el pozo, mediante la reactivación de fracturas preexistentes o la creación de nuevas fracturas a través de la inyección de fluidos a alta presión en las formaciones geológicas de interés.

La fracturación hidráulica ha sido utilizada durante décadas para mejorar la productividad de pozos hidrocarburíferos, y actualmente tiene un rol clave en las operaciones asociadas al reservorio no convencional Vaca Muerta.

El monitoreo microsísmico es la herramienta más utilizada para evaluar los procesos de fractura hidráulica, tanto en tiempo real como en etapas de post-procesamiento ya que es capaz de proporcionar información detallada sobre las fracturas generadas.

En la tesis doctoral de Sabbione (2012) [55] las aplicaciones de los métodos propuestos para detección automática de señales de origen sísmico incluyen la detección y determinación de los tiempos de llegada de

terremotos en registros de estaciones sismológicas; y la identificación y picado de señales generadas por microfracturas en registros adquiridos durante estudios de microsismicidad.

En su tesis de grado, Lagos (2014) [32] propone y aplica dos técnicas de optimización no lineal para resolver el problema de localización de focos de eventos detectados en estudios de microsismicidad. Para ello, plantea dos modelos de adquisición, calcula los tiempos teóricos correspondientes y genera datos sintéticos. A partir de los registros obtenidos, determina los tiempos de arribo de las ondas P y S. En una primera etapa, analiza el problema utilizando los tiempos teóricos y observa que ambos métodos permiten ubicar la fuente con igual precisión, aunque uno de ellos presenta una mayor eficiencia computacional. En una segunda etapa, aplica los métodos de optimización a los tiempos de arribo obtenidos a partir de registros simulados, logrando estimar la posición de la fuente dentro de los márgenes de error esperados.

La tesis de Serrano Segovia (2018) [59] tiene como objetivo generar registros sintéticos de los campos de velocidad de las ondas P y S, cuyas características se asemejen a las de registros microsísmicos reales obtenidos durante procesos de fracturación hidráulica en reservorios no convencionales. Para ello, emplea un programa de código abierto, junto con modelos estratificados extraídos de perfiles de pozo, la incorporación de ruido real y un modelo de fuente y mecanismo de fractura adecuados. Esta combinación permite generar datos sintéticos realistas, útiles para evaluar algoritmos de procesamiento de señales microsísmicas en medios bidimensionales.

La tesis doctoral de Lagos (2019) [33] implementa un conjunto de métodos para el procesamiento de información microsísmica. En primer lugar, presenta herramientas de preacondicionamiento de señales, que incluyen la orientación de los sensores de pozo y la calibración del modelo de velocidades. Luego, describe las modificaciones realizadas a herramientas preexistentes para la detección de eventos microsísmicos y la determinación de los tiempos de arribo. A continuación, expone el enfoque adoptado para estimar las coordenadas espaciotemporales de los eventos. Finalmente, propone un método para la estimación de la magnitud momento de los eventos microsísmicos, mediante el ajuste de modelos a los espectros de amplitud obtenidos a partir del apilamiento de todas las fases disponibles. Varios de los métodos se plantean como problemas de optimización, resueltos mediante algoritmos de optimización global. Las herramientas utilizadas fueron diseñadas e implementadas en lenguaje Fortran, y aplicadas a datos de campo registrados durante procesos de fracturación hidráulica realizados en Argentina. Estos métodos resultan útiles tanto para el procesamiento de datos microsísmicos adquiridos en pozo como para la supervisión y evaluación de resultados generados por terceros.

En su tesis doctoral, Brunini (2023) [10] presenta un conjunto de estrategias específicamente diseñadas para el procesamiento de datos microsísmicos adquiridos en pozo. El objetivo principal de los algoritmos desarrollados es, por un lado, ofrecer alternativas útiles para el análisis de señales microsísmicas aplicadas al monitoreo de procesos de fracturación hidráulica, y por otro, contribuir a la evaluación de la calidad de los resultados obtenidos mediante métodos preexistentes. En primer lugar, introduce un método que permite comparar distintas estrategias de filtrado de ruido, obteniendo métricas cuantitativas sobre su desempeño. Luego, propone un método heurístico para la determinación de las coordenadas espaciales de los eventos microsísmicos, basado en un procedimiento no determinístico, y compara su rendimiento con el de otros algoritmos de localización. Finalmente, presenta el diseño e implementación de una red neuronal aplicada al problema de inversión del tensor momento. Utilizando únicamente la posición del evento y las amplitudes relativas de la señal, demuestra que la red es capaz de recuperar el tensor momento con altos niveles de confianza. Todas las herramientas fueron desarrolladas e implementadas mediante códigos en los lenguajes Julia, Python y, en menor medida, Fortran.

4.4 Palermo Aike

Etchegoyen (2022) [18] aborda la caracterización sísmica de la formación Palermo Aike en la Cuenca Austral, Argentina, como reservorio no convencional. Para ello comienza realizando la interpretación de las principales superficies en la región de estudio y luego realiza una inversión post-apilado. Analiza el vínculo entre la impedancia acústica y propiedades del reservorio NOC. El volumen de arcilla es la propiedad que

mayor correlación presenta, seguida por la porosidad y el contenido orgánico total no tiene correlación significativa. A partir del volumen de impedancia acústica obtenido mediante la inversión genera volúmenes de contenido de arcilla y de porosidad sobre los que interpreta su variabilidad espacial.

Conclusiones

Con el objetivo de identificar líneas de trabajo relacionadas con la exploración y el desarrollo de hidrocarburos, se analizaron las tesis de grado y doctorado defendidas en la FCAG durante los últimos 20 años. Entre 2005 y 2024 se defendieron 145 tesis de grado y 35 doctorales, de las cuales aproximadamente un tercio son estudios o desarrollos teóricos vinculados a los hidrocarburos. La mayoría de estos trabajos se centran en el método sísmico de prospección, que es la técnica geofísica más utilizada en la industria hidrocarburífera. También se identifican trabajos exploratorios que emplean métodos potenciales y electromagnéticos. En el caso de los métodos sísmicos, las aplicaciones reflejan la evolución tecnológica y temática de la industria, destacándose numerosos estudios sobre el reservorio no convencional Vaca Muerta, cuya exploración comenzó en 2010, y que actualmente aporta más del 50 % de la producción de gas y petróleo del país.

El método sísmico se adaptó a los desafíos que implica el desarrollo de VM, que se realiza mediante la perforación de pozos horizontales estimulados a través de fracturas hidráulicas. Para la interpretación estructural y estratigráfica, se emplean volúmenes sísmicos obtenidos mediante técnicas de migración prestack en profundidad adecuadamente calibrados. La caracterización a través de inversión de amplitudes sísmicas permite estimar propiedades del reservorio como son la porosidad, el contenido orgánico total, o parámetros geomecánicos, cuya interpretación permite identificar las zonas del reservorio con las condiciones más favorables para el desarrollo. Para estudiar la evolución espacial y temporal de los procesos de fracturamiento hidráulico, tanto en tiempo real como en post-proceso, la herramienta más empleada es el monitoreo microsísmico.

Para acceder a la información necesaria para realizar muchos de los trabajos de tesis, se firmaron acuerdos específicos y, en ciertos casos, acuerdos marco entre las empresas y la FCAG. Con el objetivo de fomentar trabajos conjuntos entre la FCAG y la industria, alineados con las necesidades de ambas partes, resulta imprescindible contar con un marco institucional formal. Este marco permitirá relevar las demandas del sector industrial, identificar temas de interés y posibles tesistas, así como realizar un seguimiento adecuado de los proyectos.

Agradecimientos

A la biblioteca de la FCAGLP por facilitar el acceso a los trabajos de tesis. A YPF por la digitalización de 6 tesis que fueron puestas a disposición del repositorio de la UNLP. A la Secretaría Académica y departamento de alumnos de la FCAGLP por los datos sobre egresados de geofísica. A Pablo Álvarez y Juan Ignacio Sabbione por su revisión completa del artículo y los valiosos aportes realizados.

Referencias

- [1] S. Actis, "Atributos sísmicos para la caracterización de reservorios complejos: Fm. Serie Tobífera, Cuenca Austral, Tierra del Fuego", tesis de grado, FCAGLP, 2019.
- [2] P. Álvarez, "Modelado y Clasificación de Anomalías de Amplitud e Inversión Elástica en la Cuenca Neuquina", tesis de grado, FCAGLP, 2007.

[3] M. Angulo, "Caracterización Sísmica de la Formación Vaca Muerta en el noreste de la Cuenca Neuquina", tesis de grado, FCAGLP, 2022.

[4] L. Arioni, "Exploración sub basáltica del basamento resistivo mediante sondeos eléctricos verticales en el borde nororiental de la cuenca neuquina", tesis de grado, FCAGLP, 2016.

[5] L. Barale, "Procesamiento Multicomponente en tiempo (3C) en Sísmica de superficie de una línea 2D Terrestre", tesis de grado, FCAGLP, 2015.

- [6] G. Blanco, "Modelado petro-elástico y ajuste de velocidades P y S en la formación Vaca Muerta", tesis de grado, FCAGLP, 2019.
- [7] S. Blanco, "Sustitución de fluidos y cálculo de atributos AVO en la cuenca de Burgos, México", tesis de grado, FCAGLP, 2006.
- [8] O. Bokhonok, "Modelado comparativo de coeficientes poroelásticos anisótropos efectivos y magnitudes relacionadas para la caracterización de lutitas orgánicas", tesis de grado, FCAGLP, 2015.
- [9] A. R. Brown, "Interpretation of three-dimensional seismic data", AAPG Memoir 42, SEG Investigations in Geophysics, No. 9, 1986.
- [10] G. Brunini, "Caracterización de eventos microsísmicos: procesamiento y algoritmos, doctoral", tesis doctoral, FCAGLP, 2023.
- [11] F. Bucher, "Estudio sismoeléctrico de medios poroelásticos acoplados con acústicos o elásticos", tesis de grado, FCAGLP, 2021.
- [12] F. Carozzi, "Modelado y análisis de la reflectividad sísmica generalizada en medios estratificados", tesis de grado, FCAGLP, 2010.
- [13] G. Castromán, "Modelado y análisis de la respuesta sísmica de medios poroelásticos fracturados", tesis doctoral, FCAGLP, 2021.
- [14] F. Corbetta, "Detección automática de fallas geológicas en datos sísmicos utilizando aprendizaje profundo", tesis de grado, FCAGLP, 2023.
- [15] D. Corva, "Caracterización sísmica mediante inversión estocástica de la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina", tesis de grado, FCAGLP, 2022.
- [16] T. D'Biassi, "Análisis sísmico profundo modificando el procesamiento convencional de registros de vibroseis", tesis de grado, FCAGLP, 2006.
- [17] M. Elías, "Métodos electromagnéticos de fuentes controladas: modelado computacional", tesis de grado, FCAGLP, 2019.
- [18] M. del R. Etchegoyen, "Caracterización sísmica de la Formación Palermo Aike, Cuenca Austral, como reservorio No Convencional a partir de un flujo interpretativo integrado", tesis de grado, FCAGLP, 2022.
- [19] L. Gaffoglio, "Estudio magnetotelúrico de medios isótropos y anisótropos", tesis de grado, FCAGLP, 2023.
- [20] S. Gershanik y L. Milone, "Evolución de las ciencias en la República Argentina 1923-1972. Tomo VII. Astronomía", Sociedad Científica Argentina, 1979.
- [21] F. Ghersi, "Caracterización sísmica de la Fm. Vaca Muerta mediante inversión de trazas del relevamiento sísmico 2D en el sector suroriental de la región geológica de engolfamiento de la Cuenca Neuquina. Calibración con resultados de caracterización preexistentes", tesis de grado, FCAGLP, 2022
- [22] F. Goglino, "Atenuación de ruido aleatorio en registros sísmicos utilizando el método de aprendizaje de diccionario por coherencia", tesis de grado, FCAGLP, 2024.
- [23] A. Gómez, "Generación de mapas de basamento en la Cuenca Sedimentaria Neuquina a partir de datos gravimétricos terrestres y satelitales", tesis de grado, FCAGLP, 2016.
- [24] J. Gómez, "Análisis de la reflectividad sísmica e indicadores asociados para el monitoreo de reservorios de dióxido de carbono", tesis doctoral, FCAGLP, 2014
- [25] L. Guevara, "Comportamiento espectral y frecuencia pico en sismogramas de reflexión en ambientes de reservorio", tesis de grado, FCAGLP, 2016.
- [26] B. Hardage, "Vertical Seismic Profiling, Part A: Principles", Elsevier Science Ltd., 1985.
- [27] J. C. Harriague, "Aplicaciones de técnicas modernas a la registración sísmica de prospección", tesis doctoral, FCAGLP, 1969.
- [28] R. Hawryszczuk, "Velocidades Sísmicas en Medios Anisótropos", tesis de grado, FCAGLP, 2014.
- [29] W. J. Hinze, R. B. von Frese y A. H. Saad, "Gravity and Magnetic Exploration. Principles, Practices, and Applications", Cambridge University Press, 2013.
- [30] E. Jaschek, "Resumen de las principales realizaciones que fueron efectuadas por los Directores que se desempeñaron entre 1883 y 1983", nota al decano, 2004.
- [31] N. Kreimer, "Simulación numérica bidimensional para el problema sismoeléctrico en medios porosos", tesis de grado, FCAGLP, 2009.
- [32] S. Lagos, "Localización de focos de eventos detectados en estudios microsísmicos", tesis de grado, FCAGLP, 2014.
- [33] S. Lagos, "Herramientas alternativas para el procesamiento y análisis de señales microsísmicas", tesis doctoral, FCAGLP, 2019.
- [34] E. Lo, "Implementación del atributo skewness local para la corrección de fase de registros sísmicos", tesis de grado, FCAGLP, 2022.
- [35] F. Macchioli Grande, "Prospección electromagnética por fuentes controladas", tesis de grado, FCAGLP, 2015.

- [36] N. Maltagliatti, "Estimación de la profundidad al basamento magnético mediante métodos espetrales", tesis de grado, FCAGLP, 2009.
- [37] E. Mancini, "Modelado de respuesta sísmica por sustitución de fluidos en la Formación Mina del Carmen en un pozo ubicado en el Flanco Norte de la Cuenca del Golfo San Jorge", tesis de grado, FCAGLP, 2023.
- [38] I. Martinic, "Análisis de amplitudes sísmicas pre-stack en María Inés Sur, Cuenca Austral, Argentina", tesis de grado, FCAGLP, 2005.
- [39] J. Mindlin, "Modelado gravimétrico de la litósfera en el margen pasivo argentino", tesis de grado, FCAGLP, 2019.
- [40] S. Montenegro, "Herramientas de aprendizaje automático para magnetotelúrica", tesis de grado, FCAGLP, 2024.
- [41] M. N. Nabighian, Ed. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics - Theory. Volume 1. Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- [42] L. Nicolosi, "Atenuación de ruido coherente en datos sísmicos mediante una técnica de aprendizaje de diccionario", tesis de grado, FCAGLP, 2024.
- [43] G. Nicora, "Procesamiento e interpretación de datos magnetotelúricos para la caracterización del área geológica de plataforma de la Cuenca Neuquina", tesis de grado, FCAGLP, 2020.
- [44] E. Orellana, "Prospección geoeléctrica en corriente continua", ediciones Parainfo, 1982.
- [45] A. Padrón, "Detección de bordes en datos sísmicos con filtros Sobel", tesis de grado, FCAGLP, 2022.
- [46] L. Páez, "Imagen sísmica en profundidad: análisis de la migración poststack por ecuación de onda en frecuencia", tesis de grado, FCAGLP, 2023.
- [47] M. Panelo, "Inversión simultánea sobre sísmica pre-stack y propagación de propiedades de reservorio en la Fm. Quintuco mediante redes neuronales con arquitectura deep learning", tesis de grado, FCAGLP, 2022.
- [48] G. Panizza, "Propagación de ondas compresionales en medios porosos fracturados total y parcialmente saturados", tesis de grado, FCAGLP, 2013.
- [49] G. Panizza, "Calibración de modelos de física de rocas poroelásticos en shales orgánicas argentinas y aplicaciones", tesis doctoral, FCAGLP, 2023.
- [50] D. Pasiecznik, "Caracterización sísmica de la Formación Vaca Muerta mediante inversión de trazas en el sector norte de la región geológica de Engolfamiento de la Cuenca Neuquina", tesis de grado, FCAGLP, 2018.
- [51] D. Pérez, "Nuevas estrategias para la inversión sparse de datos sísmicos pre-stack", tesis doctoral, FCAGLP, 2015.
- [52] A. Pontoriero, "Determinación de velocidades P y S para el intervalo Quintuco – Vaca Muerta, a partir de un Perfil Sísmico con fuente cercana a la boca de pozo (Z-VSP)", tesis de grado, FCAGLP, 2017.
- [53] G. Quiroga, "Cálculo de incertidumbre y análisis de sensibilidad en la estimación de parámetros elásticos en inversión sísmica", tesis de grado, FCAGLP, 2018.
- [54] G. Rubino, "Atenuación y dispersión de ondas sísmicas en medios porosos saturados altamente heterogéneos", tesis doctoral, FCAGLP, 2008.
- [55] J. I. Sabbione, "Algoritmos matemáticos y computacionales para la detección automática de señales sísmicas", tesis doctoral, FCAGLP, 2012.
- [56] A. Sánchez Camus, "Modelado de medios anisótropos. Estimación de la orientación de fracturas mediante moveout de onda compresional", tesis de grado, FCAGLP, 2015.
- [57] R. Santivañez, "Análisis del campo de ondas S convertidas, en un Perfil Sísmico Vertical (VSP)", tesis de grado, FCAGLP, 2008.
- [58] N. Sarochar, "Desarrollo de un simulador 3D para propagación de ondas en medios porosos", tesis de grado, FCAGLP, 2020.
- [59] M. F. Serrano Segovia, "Modelado de eventos microsísmicos en escenarios de inyección hidráulica", tesis de grado, FCAGLP, 2018.
- [60] R. Simm y M. Bacon, "Seismic Amplitude. An Interpreter's Handbook", Cambridge University Press, 2014.
- [61] F. Simpson y K. Bahr, "Practical Magnetotellurics", Cambridge University Press, 2005.
- [62] S. Solazzi, "Modelado y análisis de la respuesta sísmica de rocas heterogéneas saturadas por fluidos inmiscibles", tesis doctoral, FCAGLP, 2018.
- [63] F. Späth, "Modelado Electrosísmico 1D", tesis de grado, FCAGLP, 2008.
- [64] I. Szelagowski, "Transformadas de Radon mediante algoritmos voraces para el procesamiento de datos sísmicos", tesis de grado, FCAGLP, 2022.
- [65] N. Tessone, "Técnica espectral de filtrado orientado por estructuras en datos sísmicos 3D", tesis de grado, FCAGLP, 2019.
- [66] L. Vernengo y E. Trinchero, "Interpretación sísmica en la exploración y desarrollo de hidrocarburos", IAPG, 2024.

- [67] M. Volonté, "Detección automática de primeros arribos sísmicos: una nueva estrategia", tesis de grado, FCAGLP, 2012.
- [68] Ö. Yilmaz, "Seismic data analysis. Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data," Volume I & II, Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- [69] G. O. Wallbrecher (director), "La Escuela Superior de Astronomía y Geofísica", publicaciones del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata, serie Especial N°3, 1948.
- [70] J. P. Castagna y S. Chopra, "AVO", SEG, 2014.

AUTORES

Federico Späth

:: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas,
Universidad Nacional de La Plata
Paseo del Bosque s/n, La Plata, Argentina.
fspath@fcaglp.unlp.edu.ar

Geofísico egresado de la FCAG. Trabaja en YPF desde el 2007 en caracterización sísmica y métodos no sísmicos. Docente de grado y posgrado en la UNLP desde hace 20 años. Presidente de la comisión de exploración y desarrollo del IAPG.

Santiago Perdomo

:: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas,
Universidad Nacional de La Plata
Paseo del Bosque s/n, La Plata, Argentina.
santiago.perdomo@fcaglp.unlp.edu.ar

Geofísico egresado de la FCAG. Docente de grado y posgrado en la UNLP desde hace 15 años. Vicedecano de la FCAG. Director del Grupo de Investigaciones en Geociencias Aplicadas.

Adquisición de datos sísmicos 3D con nodos y modalidad “Dynamic Slip Sweep” en la Cuenca Neuquina

Ezequiel Valeff, Neptali Requena, Alejandra Galán,
Jorge Muñoz, David Silva y Jorge Sanchez

Resumen

En este trabajo se describe un proyecto de adquisición 3D registrado por Wellfield Services Ltda., en una superficie de aproximadamente 200 km², en la cuenca Neuquina.

El objetivo principal fue la Formación Vaca Muerta. En el área de la registración, existen afloramientos de cuerpos intrusivos, los cuales podrían tener alguna influencia sobre la perforación, terminación y/o producción de pozos futuros. Por tanto, una de las motivaciones principales del proyecto, fue la de identificar los posibles riesgos geológicos, tanto profundos como someros.

En cuanto a la técnica de adquisición, se optó por usar nodos autónomos y modalidad DSS (Dynamic Slip Sweep), luego de un tiempo considerable de análisis, dado que no existían antecedentes en la compañía de aplicación de esta tecnología, y en general pocas experiencias en el país.

Los resultados fueron de excelente calidad, aptos para estudios de caracterización de reservorios. El uso de nodos, así como la técnica DSS, permitieron obtener aproximadamente 200 millones de trazas, con offsets máximos de 10 km (ángulos de incidencia de hasta 50-60°) y un Fold nominal de 180. Se obtuvo un ahorro del orden entre 35 y 50% en tiempo, costos y personal en campo, comparado contra un caso de registración convencional.

Palabras Clave: Adquisición DSS; Fuente simultánea; Nodos.

Abstract

The following study describes a 3D acquisition survey of approximately 200 Km² in Neuquén Basin, the primary objective being Vaca Muerta formation (2200 m TVDSS). There are intrusive bodies in the survey area, which could represent potential hazards in drilling, completion, and performance of future wells. One of the primary objectives of the study was the identification of these geologic hazards, both deep and shallow. The technique of acquisition selected to that end was Dynamic Slip Sweep (DSS) with nodal land system. One of the main challenges of this work was obtaining superior quality data with a considerable time and costs reduction using nodes and DSS instead of geophones arrays and flip-flop with vibrator arrays. As a result, excellent quality data (suitable for reservoir characterization) was obtained. The use of nodes instead of geophone arrays and the DSS acquisition technique led to approximately 200 million traces, with max offset 10 km, incident angles up to 50-60° and nominal fold of 180. In addition, costs, time, and personnel on the field were found to decrease between 35 and 50%, when compared to a conventional acquisition (geophones and flip-flop mode).

Keywords: Aquisition DSS; Simultaneous source; Nodes.

1. Introducción

Con la continua demanda de adquisiciones 3D de gran densidad de datos y wide azimuth, sumada a los avances en las técnicas de procesamiento y de los equipamientos, las técnicas de adquisición con vibros de

alta eficiencia han tenido un gran desarrollo en los últimos años. Varios tipos de técnicas han sido desarrolladas, dejando atrás el arreglo de fuentes (flip-flop) para dar paso a la fuente simultánea en sus diversas modalidades: Slip-Sweep, Dynamic slip-sweep (DSS), Independent Slip-Sweep (ISS). Shi Shuanghu et al. (2016). Los arreglos de fuentes con varios barridos por punto utilizados con el fin de inyectar más energía al terreno y mejorar la relación señal/ruido, generan ruido scattered que no es bien muestreado durante el registro. Como este ruido scattered es coherente de barrido en barrido, se comprobó que el stacking de múltiples barridos en una misma locación no mejoraba significativamente la calidad del shot record (Quigley, 2000 and Cooper, 2002). Al pasar a una distribución más amplia de fuentes (menos fuerza inyectada por punto, pero con un número mucho mayor de puntos fuente) el muestreo de los ruidos scattered es más variado y entonces estos ruidos serán atenuados en el proceso de imaging. Desde el punto de vista de costos, es muy difícil de lograr con explosivos. El uso de vibros lo hace posible, pasando entonces de arreglos de vibradores con varios barridos por punto a un sólo vibrador por punto con un sólo barrido, menor intervalo entre fuentes y una mayor densidad de puntos fuente. Consecuentemente, se obtienen gran cantidad de trazas comparado a un diseño clásico, lo cual implica una ventaja en procesamiento. Este tipo de técnicas comenzaron a ser utilizadas recientemente en el país, y este trabajo describe una adquisición utilizando el modo de vibrado DSS con nodos en la Cuenca Neuquina.

2. Metodología

Para la registración DSS se usaron un total de 11.000 nodos inalámbricos como receptores, colocados cada 60 m en líneas E-O separadas 300 m entre sí. Se emplearon 10 equipos Vibradores de 60000 libras de Hold Down, barriendo cada 15 m, a lo largo de líneas N-S equiespaciadas 300 m. El *pre-plot* del proyecto consideró la adquisición de datos en una superficie de 203 Km² con un total de 46397 estaciones fuentes y 11572 estaciones receptoras (*Figura 1*. Detalle del diseño de adquisición. *Pre-plot* y ubicación de *Upholes* y refracciones). El desarrollo del proyecto incluyó trabajos de topografía, consideró también 2 *Upholes* de 100 m de profundidad cada uno y 2 refracciones de 800 m de longitud cada una. Si bien la cantidad de trazas es muy grande por la técnica utilizada, el objetivo de estas mediciones fue obtener datos extra para la mejor definición de la velocidad de la capa meteorizada para el procesamiento de datos (estáticas), y para comparar con varios *Upholes* y refracciones disponibles al Sur del bloque.

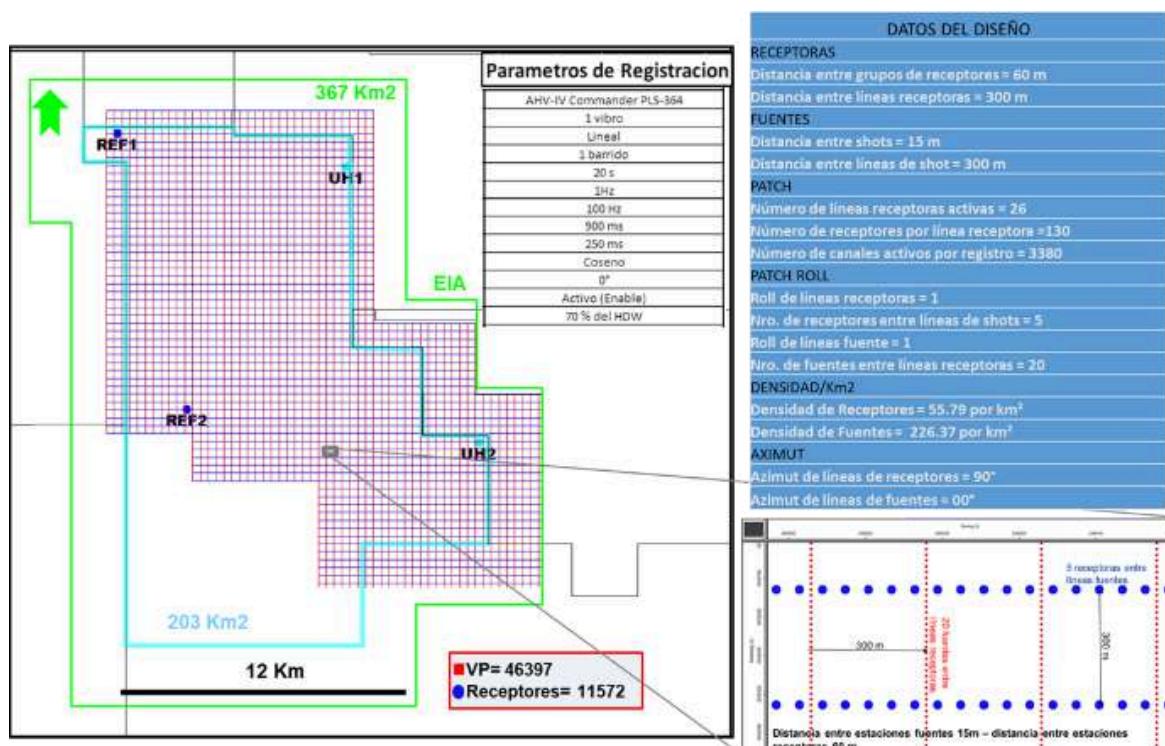


Figura 1. Detalle del diseño de adquisición. Pre-plot y ubicación de *Upholes* y refracciones.

Modo DSS (Emisión)

Luego de un extenso análisis de varias opciones y técnicas de adquisición R. Malcolm Lanseley (2014), tales como *Flip-Flop* con nodos, o *compressive seismic imaging (CSI)* Leo Brown et al. (2017), se optó por el modo DSS. *Dynamic Slip Sweep*, la cual es una técnica de adquisición de alta eficiencia que tiene en cuenta el slip-time y la distancia entre los vibros, y considera tanto la calidad del dato raw como la eficiencia en la operación. Este método permite iniciar un barrido, sin haber terminado el anterior, y con un criterio de separación en distancia entre vibradores, para incrementar la productividad. La interferencia de la señal es mayor cuando dos camiones están vibrando cerca. El *Slip Sweep* puro, solo establece un *delay* fijo, por lo general no menor al tiempo de escucha (en nuestro caso 5 segundos) para evitar interferencias críticas entre barrido cercanos. Con el DSS, éste *delay* se puede disminuir, agregando una condición de distancia mínima a la cual los barridos cercanos no se interfieran de manera crítica (interferencia primaria). Por este motivo, se configuró en gabinete una tabla “Tiempo-Distancia” (Fig. 2. Tabla *Slip-Time* vs Distancia entre vibros), que luego fue probada y confirmada en campo previo a las pruebas de parámetros.

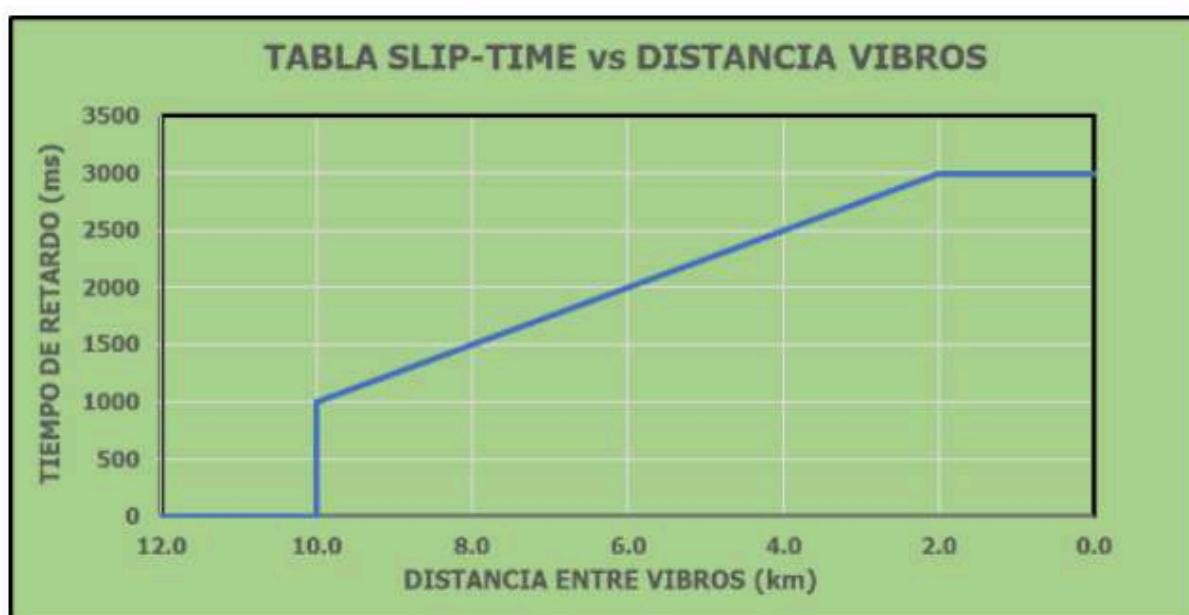


Figura 2. Tabla *Slip-Time* vs Distancia entre vibros.

Nodos (Recepción)

Para la adquisición de datos sísmicos en este proyecto, se utilizó el sistema nodal. Este sistema inalámbrico permite grabar datos sísmicos, de manera continua y autónoma, o en lapsos de tiempos predefinidos por el usuario, previo al *deployment* en campo. El nodo tiene un receptor de GPS integrado, el cual provee además de posición geográfica, el sincronismo necesario para la adquisición de datos en tiempo GPS. Los datos sísmicos de campo son grabados en memoria interna del nodo, y luego son bajados para su procesamiento en el “*Transcriber*”. El nodo posee como sensor sísmico, un acelerómetro digital MEMS. Este tipo de sensores muestran ventajas sobre los geófonos, tales como un ancho de banda superior (tanto para bajas como para altas frecuencias) y la fidelidad de la señal registrada. Nicolas Tellier et al. (2020). El sensor interno emite una señal digital que proporciona una representación con mucha mayor fidelidad de los movimientos del suelo frente a la proporcionada por geófonos analógicos. Tiene una amplitud plana y una respuesta de fase en el ancho de banda sísmica, además de mucha menor amplitud de distorsión respecto a los sensores analógicos. Los sensores tienen un ruido de suelo reducido en las frecuencias bajas hasta 0.1 Hz, lo que lo convierte en un sensor ideal para operaciones de banda ancha. La especificación de ruido (15 ngv/Hz) se

encuentra en el nivel más silencioso del ruido ambiental medible en cualquier lugar de la tierra, o por debajo de éste. Una vez “plantado” en la estación receptora asignada en campo, el nodo se debe encender con un switch magnético. En forma automática, la unidad realiza un *auto-test*, verificando su funcionalidad interna (nivel de batería, GPS y sensor). Una vez que el nodo realizó su *auto-test* y toma señal GPS, está listo para iniciar grabación de señales sísmicas, de acuerdo con el plan de adquisición configurado.

3. Prueba de parámetros

Se seleccionó un área representativa del proyecto para realizar las pruebas las cuales consistieron en registrar VPs puntuales probando diferentes especificaciones de los vibros como Fuerza, ancho de banda, longitud de barrido, taper inicial y final, tipo de barrido, etc. Para la prueba de parámetros se utilizaron tanto nodos como geófonos desplegados sobre una línea W-E, para poder tener datos en tiempo real en el sismógrafo (como en una adquisición clásica) junto con datos grabados en los nodos, que fueron descargados posteriormente para su comparación. Se utilizó un arreglo circular de 6 geófonos, con el nodo ubicado en el centro (Figura 3. Ubicación de la línea de prueba, con un detalle del arreglo de geófonos).

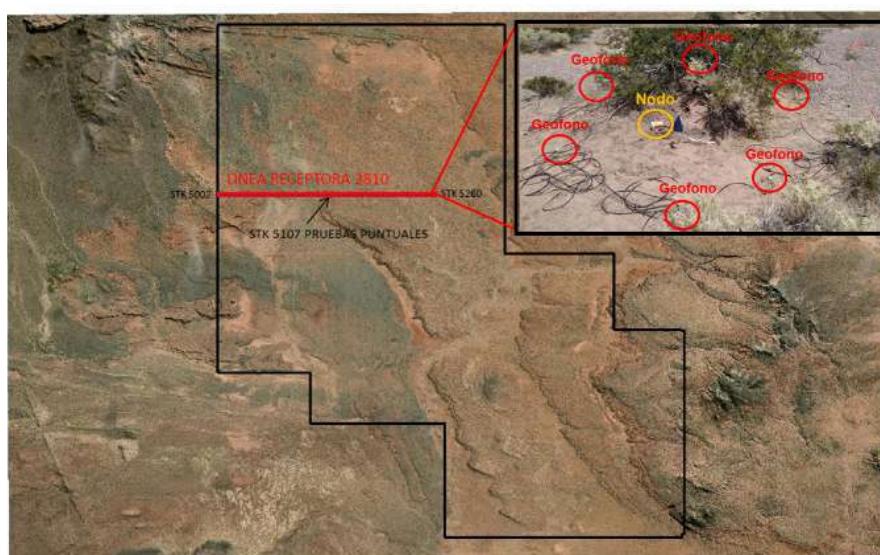


Figura 3. Ubicación de la línea de prueba, con un detalle del arreglo de geófonos

Se realizaron un total de 20 pruebas puntuales, utilizando siempre un vibro y un barrido por punto, en las cuales se fueron variando distintos parámetros, entre ellos la fuerza total (entre 70% y 80%), la frecuencia (entre 1 y 140 Hz), la longitud del barrido (entre 16 y 24 segundos) y el taper. (Figura 4. Listado de 20 pruebas de parámetros puntuales realizadas).

Fila	FUERZA	FRECUENCIA	# DE BARRIDOS	TIPO DE BARRIDO	LONGITUD	TAPER	FASE DE INICIO DE BARRIDO
43	70%	1-80 HZ	1	LINEAL	16	900-250	0
44	70%	1-90 HZ	1	LINEAL	16	900-250	0
45	70%	1-90 HZ	1	LINEAL	16	900-250	0
46	70%	1-100 HZ	1	LINEAL	16	900-250	0
47	70%	1-90 HZ	1	LINEAL	24	900-250	0
48	70%	1-100 HZ	1	LINEAL	24	900-250	0
49	70%	1-120HZ	1	LINEAL	24	900-250	0
50	70%	1-140HZ	1	LINEAL	24	900-250	0
51	70%	1-80 HZ	1	LINEAL	20	900-250	0
53	70%	1-90 HZ	1	LINEAL	20	900-250	0
54	70%	1-100 HZ	1	LINEAL	20	900-250	0
55	70%	1-120HZ	1	LINEAL	20	900-250	0
56	70%	1-140HZ	1	LINEAL	20	900-250	0
57	70%	1-140HZ	1	LINEAL	20	900-250	90
58	70%	1-80 HZ	1	LINEAL	20	900-250	90
59	70%	1-100 HZ	1	3 db/oct	20	900-250	0
60	70%	2-100 HZ	1	LINEAL	20	1000-300	0
61	70%	2-100 HZ	1	LINEAL	20	1200-300	0
62	75%	1-100 HZ	1	LINEAL	20	900-250	0
63	80%	1-100 HZ	1	LINEAL	20	900-250	0

Figura 4.
Listado de 20 pruebas de parámetros puntuales realizadas

En la Figura 5 se comparan los espectros de amplitud entre nodo y geófono de una de las pruebas puntuales. En ella se puede observar la ventaja del nodo sobre el geófono, donde el espectro de amplitud es más plano, con un mejor aporte de frecuencias bajas, medias y altas.

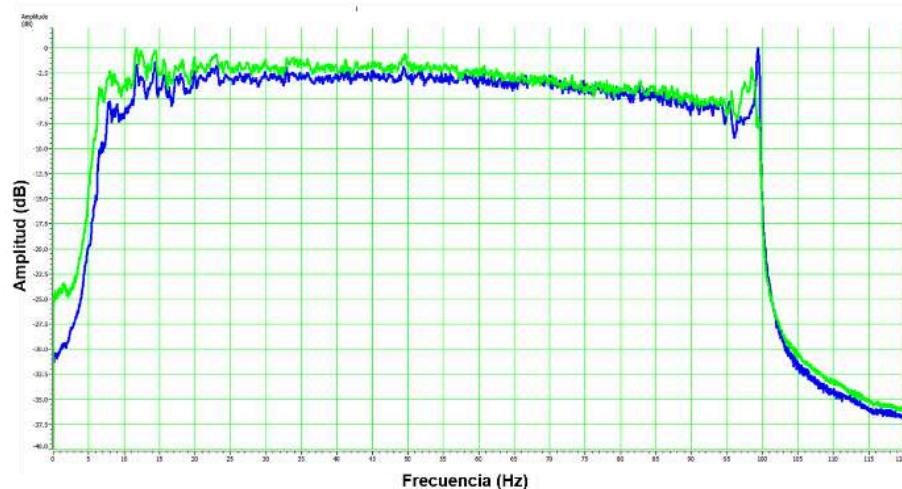


Figura 5. Comparación espectros de amplitud de pruebas puntuales Nodo vs geófono (cable). Azul geófono-verde Nodo

Luego se procedió a elegir los 4 mejores sets de parámetros (6, 9, 10 y 11 en la Figura 4. Listado de 20 pruebas de parámetros puntuales realizadas), en base a las pruebas puntuales y se realizaron líneas 2D de 130 canales receptores y 129 Vps espaciados a 60 m con el objetivo de poder comparar a nivel de Stack, obteniendo 4 líneas procesadas con el dato de los nodos y 4 procesadas con los registros de los geófonos. Luego del análisis de los shots puntuales y los stacks de las líneas para los distintos parámetros, se definieron los parámetros finales de adquisición (Tabla 1. Parámetros finales utilizados en la adquisición).

Tabla 1. Parámetros finales utilizados en la adquisición

Tipo de Vibrador	AHV-IV Commander PLS-364
Cantidad de vibros	1 vibro
Tipo de barrido	Lineal
Cantidad de barridos	1 barrido
Longitud de barrido	20 s
Frecuencia Inicial	1Hz
Frecuencia Final	100 Hz
Taper Inicial	900 ms
Taper Final	250 ms
Tipo de taper	Coseno
Fase de inicio del barrido	0°
Control de reducción de armónicas (HDR)	Activo (Enable)
Fuerza de Salida	70 % del HDW
Fuerza de Salida con viento superior a 50km/h	80 % del HDW

Debido a la imposibilidad de los nodos de visualizar datos en tiempo real, la línea de prueba fue utilizada posteriormente durante toda la registración para el monitoreo de ruido. Las comparaciones entre nodos y geófonos de las pruebas fueron claves para estimar un corte para el ruido ambiente de la adquisición con nodos, visualizando el registro en tiempo real en el geófono.

4. Operación en campo

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la línea de prueba con geófonos para monitoreo del ruido ambiente. Se utilizaron los 10 vibros en simultáneo, barriendo el área de Norte a Sur, separados entre sí 2 o 3 líneas de fuente, y siguiendo la tabla calculada de tiempo-distancia (*Figura 7. Camiones vibrando de Norte a Sur en simultáneo*).

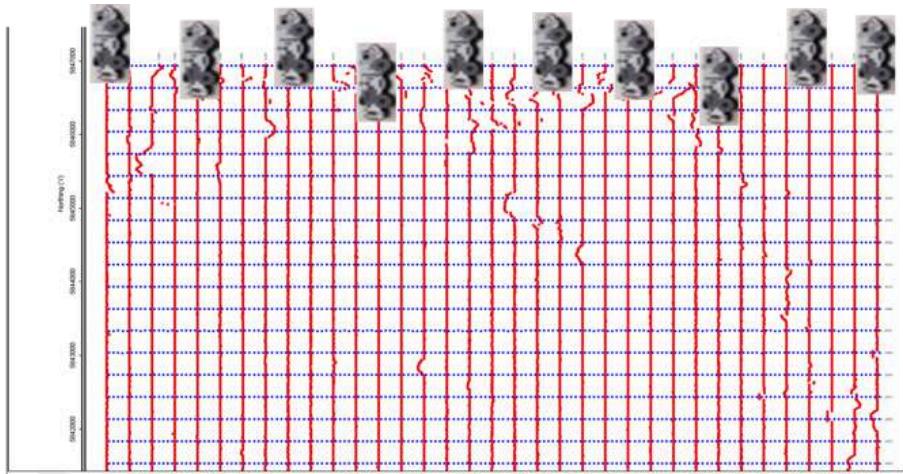


Figura 7. Camiones vibrando de Norte a Sur en simultáneo

Los 11000 nodos plantados fueron suficientes para la adquisición de casi la totalidad del área del proyecto, y luego fueron llevados a la base para la descarga de información. Una vez asegurado el dato, se borraron las memorias de 600 nodos para ser plantados nuevamente. Las fallas en los nodos estuvieron acorde a la especificación del fabricante (1-2 cada mil): 14 fallaron durante todo el registro, con tiempos de pérdida de datos desde minutos hasta 6 días completos como máximo en uno de ellos, lo cual no tuvo impacto alguno en la calidad del producto final. El dato no pudo ser monitoreado en tiempo real, pero sí se pudo hacer un QC utilizando Cross spreads a medida que se descargaba la información del nodo en la base (*Figura 8. Qc x-spread por fuente común*). Se puede observar la interferencia de fuentes cercanas vibrando en simultáneo.

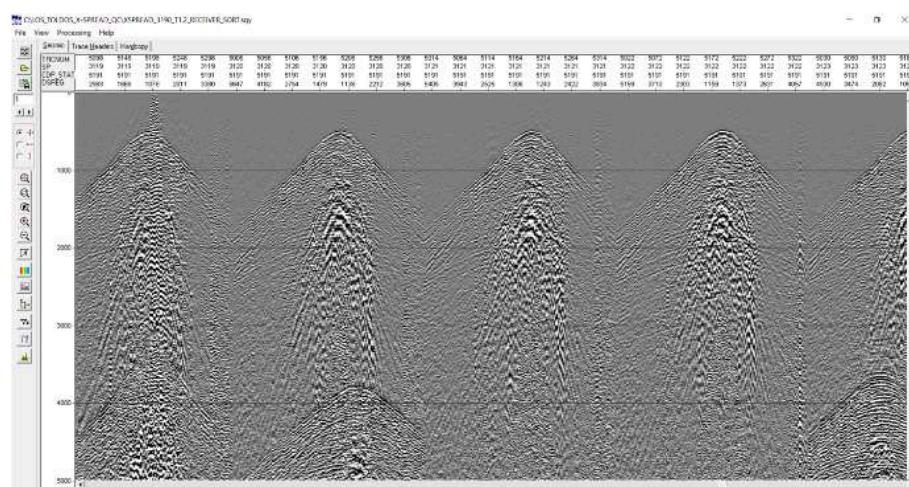


Figura 8. Qc x-spread por fuente común. Se puede observar la interferencia de fuentes cercanas vibrando en simultáneo

Los días totales de registro fueron 16, con jornadas de 12 horas, obteniendo un promedio de 3000 VP por día (*Figura 9. Registro diario vs. Promedio*).

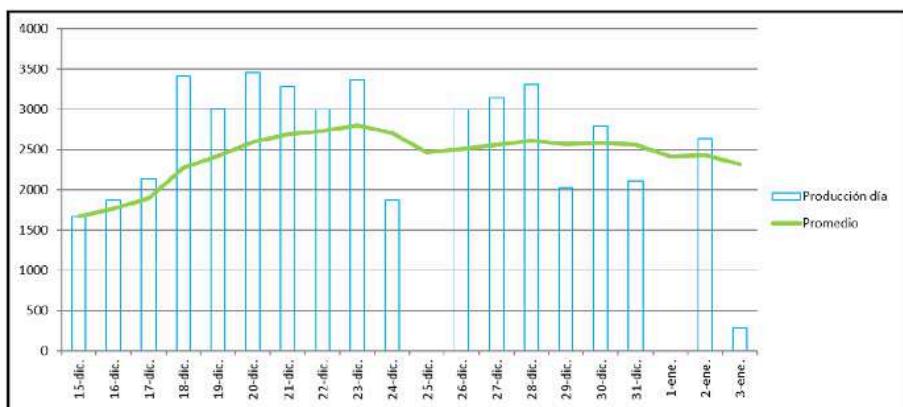


Figura 9.
Registro diario vs.
Promedio.

Debido a la topografía, obstáculos en superficie, terreno irregular, etc., se debieron reubicar varias de las estaciones, tanto de fuente como de receptores. La diferencia entre pre *plot* y post *plot* final se puede observar en la *Figura 10*. El gráfico de *fold nominal* muestra que de todas formas se tienen suficiente cantidad de trazas para garantizar un dato de buena calidad.

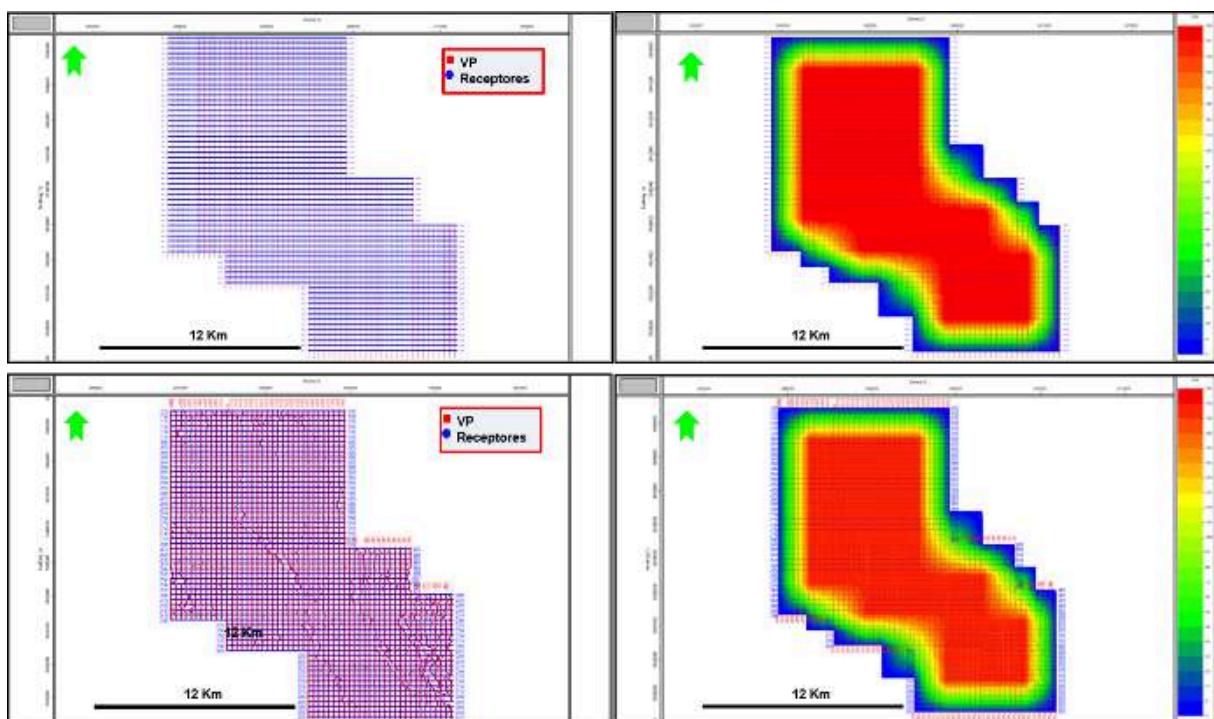


Figura 10. Comparación pre-plot vs post-plot a izquierda, y Fold nominal Pre y post-plot a derecha.

5. Procesamiento

Se decidió enviar el total de datos descargados de los nodos al centro de proceso, sin restringirse al *patch* del diseño original, lo cual es otra ventaja de este tipo de adquisiciones. El total de trazas fue de aproximadamente 2 millones. Una vez concluída la revisión de los datos, se decidió descartar offsets mayores a 8.5 km, haciendo una relación de compromiso entre tiempo de procesamiento, costos y calidad de dato. Offsets de hasta 8.5 km aseguraban tener ángulos de incidencia para el objetivo profundo mayores a 50°, los cuales fueron considerados más que suficientes para la calidad del dato PSTM y PSDM y para

posteriores estudios, tales como AVO, inversión de traza sísmica, etc. El ahorro de tiempos logrado con la técnica de adquisición utilizada trae aparejado un aumento de tiempo de procesamiento, ya que la secuencia incorpora una primera etapa de *deblending*, en donde se pretende separar el ruido o la energía producto de la superposición de fuentes (intrínseco a la técnica utilizada) y ver la “iluminación” del registro que se está limpiando, es decir sin interferencia alguna. Este proceso sumó 1 mes a la secuencia clásica de procesamiento. Los resultados finales principales fueron volúmenes PSTM y PSDM de muy buena calidad (Fig. 11 y 13).

6. Resultados

Para la registración DSS se usaron un total de 11.000 nodos inalámbricos como receptores, colocados cada 60 m en líneas E-O separadas 300 m entre sí. Se emplearon 10 equipos Vibradores de 60000 libras de *Hold Down*, barriendo cada 15 m, a lo largo de líneas N-S equiespaciadas 300 m. En cada punto fuente se utilizó 1 sólo vibro y un sólo barrido lineal de 20 s. La adquisición fue realizada en un período de 6 semanas (16 días totales de registro) entre mediados de noviembre de 2020, y principios de enero de 2021. Se registraron un total de aproximadamente 2 millones de trazas, con *offsets* de hasta 10 Km y ángulos de incidencia para el objetivo profundo de aproximadamente 60°. Para el procesamiento se utilizaron *offsets* de 8.5 km de máxima, con ángulos de incidencia para el objetivo profundo mayores a 50°, y un *bin* de 30 x 30. Se obtuvieron un cubo PSTM mostrado en la Figura 11, con su correspondiente espectro de amplitud en la Figura 12, y un cubo PSDM en la Figura 13, ambos de muy buena calidad. Asimismo, se generaron los correspondientes *gathers*.

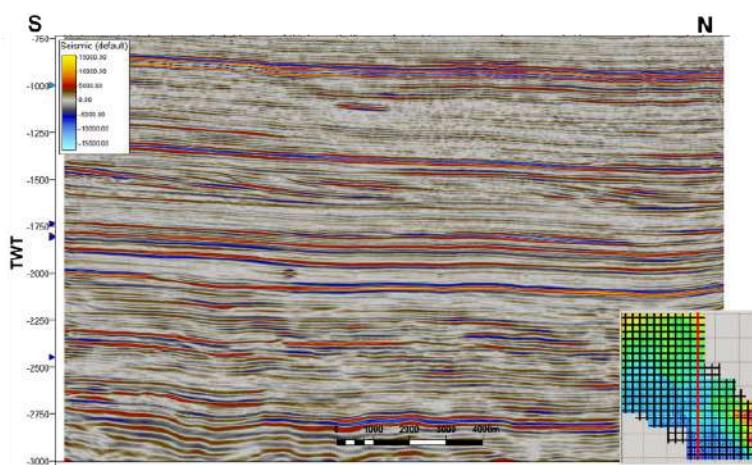


Figura 11.
Xline PSTM final.

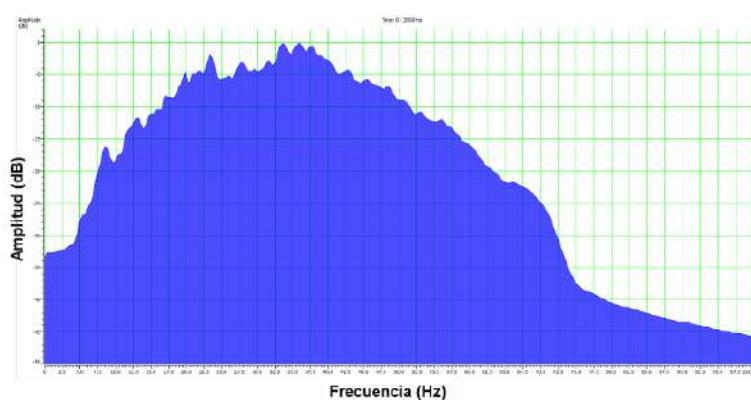


Figura 12.
Espectro de amplitud PSTM final

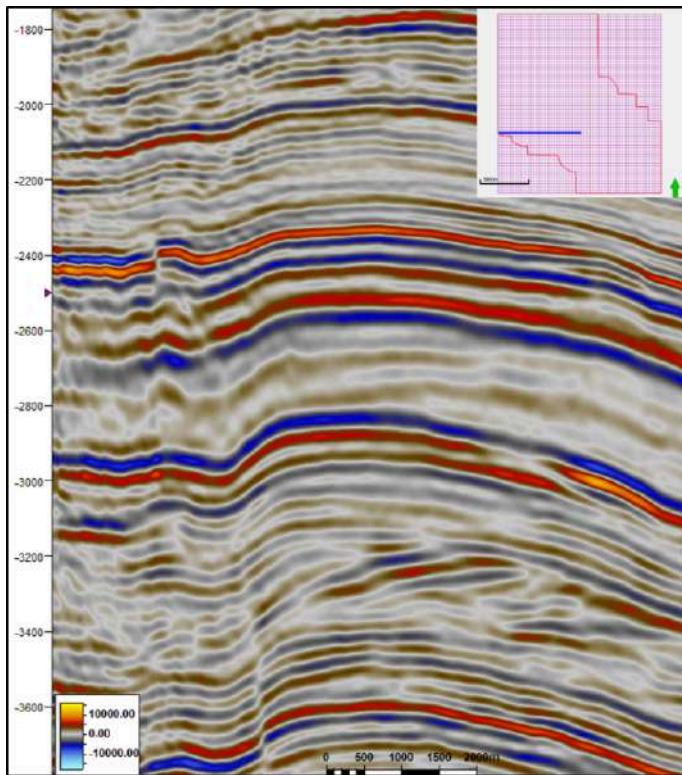


Figura 13. Corte sísmico de PSDM procesada a partir de registración con nodos y barridos DSS.

En los cortes sísmicos de las *Figuras 14 a 16*, se evidencia la calidad superior del nuevo volumen *PSTM* con respecto al cubo *PSTM* de una registración 3D anterior, realizada con geófonos y flotas de vibros. Adicionalmente, la nueva *PSTM* presenta un dato con mejor relación señal-ruido, que el de una línea 2D ubicada en la misma zona.

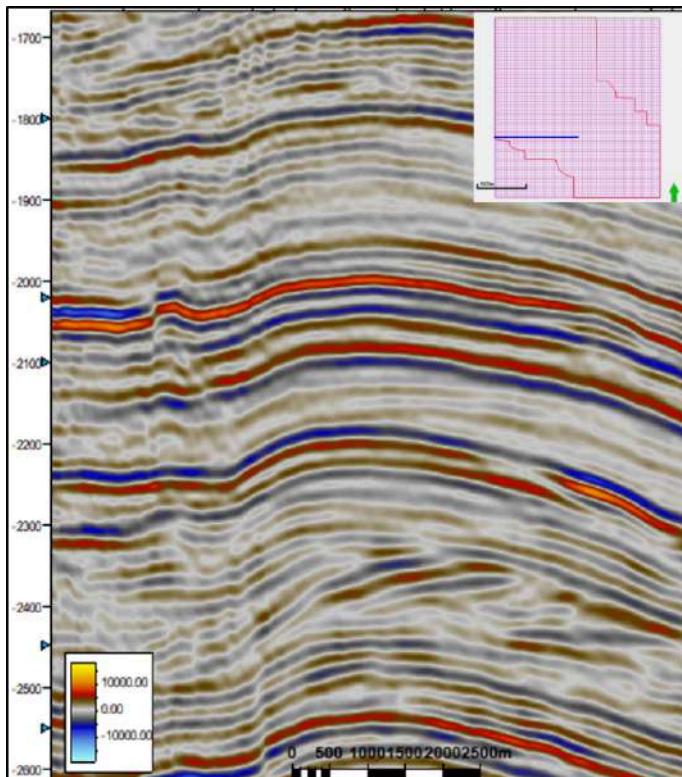


Figura 14. Corte sísmico de PSTM procesada a partir de registración con nodos y barridos DSS, coincidente con corte sísmico de la Figura 13.

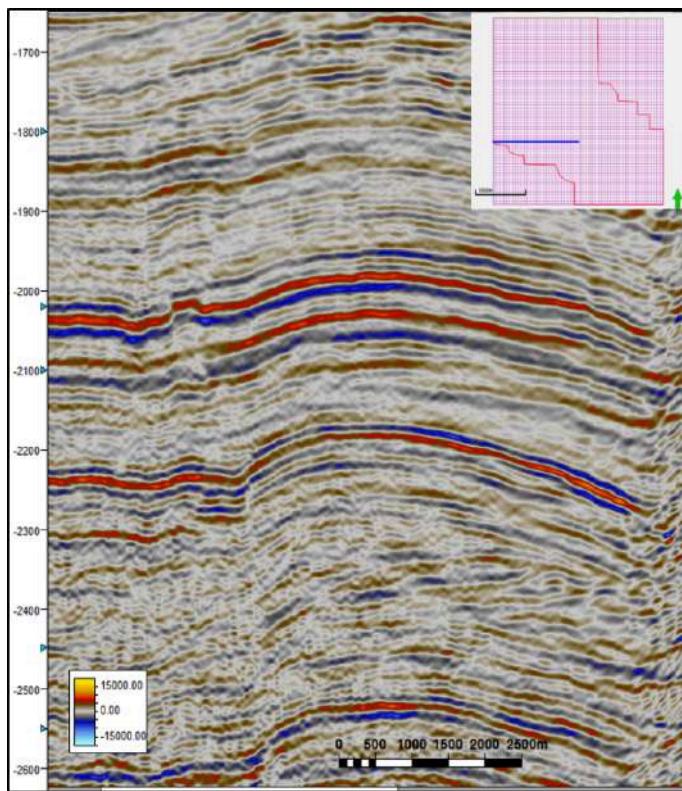


Figura 15. Corte sísmico de PSTM procesada a partir de registración con cables y geófonos (coincidente con corte sísmico de la Figura 13).

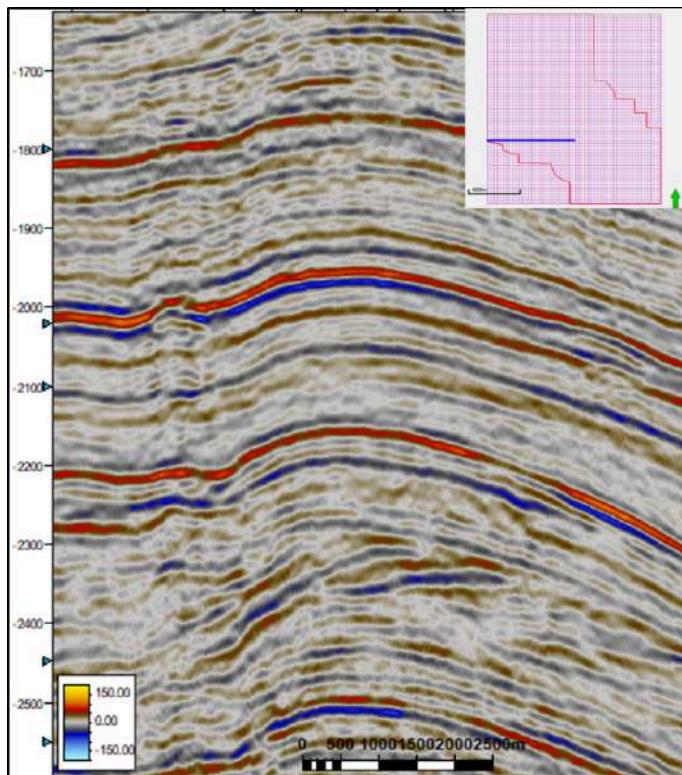


Figura 16. Línea 2D Oeste-Este en tiempo doble, coincidente con corte sísmico de la Figura 13.

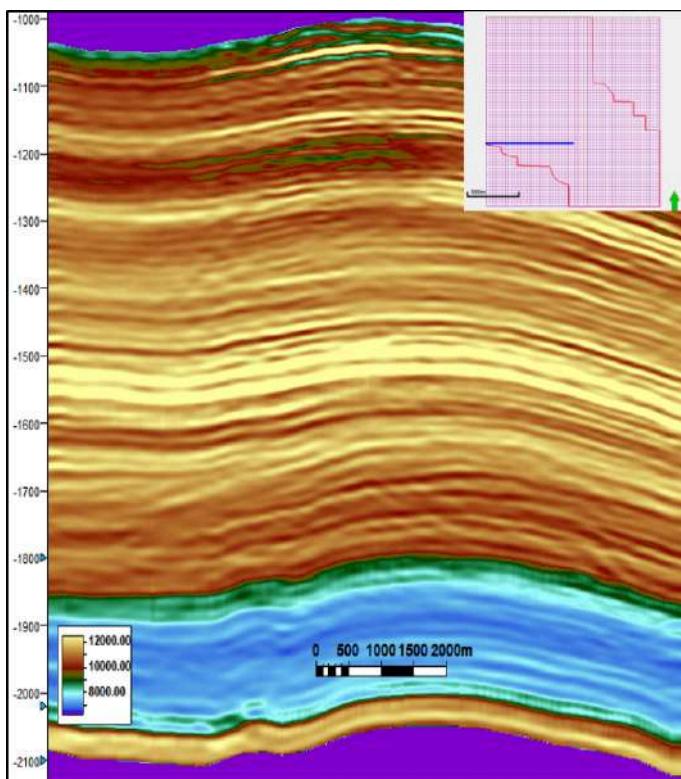


Figura 17. Corte sísmico de Impedancia compresiva (inversión *post-stack* a partir de registración con nodos y barridos *DSS*), coincidente con corte sísmico de la Figura 13.

Conclusiones

La técnica de adquisición aplicada a este proyecto demostró mejorar sustancialmente la eficiencia sin comprometer la calidad del dato. Los datos obtenidos fueron de excelente calidad, y aptos para estudios de caracterización de reservorios. El uso de nodos en lugar de geófonos convencionales, así como la técnica de registro implementada (*DSS*), permitieron obtener aproximadamente 200 millones de trazas, con *offsets* máximos de 10 km (ángulos de incidencia de hasta 50-60°) y un *Fold* nominal de 180. Las fallas de nodos estuvieron acorde a la especificación del fabricante, y no tuvieron impacto alguno en la calidad del producto final. Adicionalmente se obtuvo un ahorro del orden entre 35 y 50% en tiempo, costos y personal en campo, comparado con un caso hipotético calculado para una registración convencional. Los productos resultantes del procesamiento fueron una *PSTM* y una *PSDM* de gran calidad, con sus respectivos *gathers*. Estudios de *AVO* e inversión *post stack* ya fueron realizados, mostrando buenos resultados.

Agradecimientos

Al personal de Wellfield Services LTDA., por ejecutar la registración cumpliendo los tiempos, requerimientos de calidad, y políticas SAS de Tecpetrol.

A los Supervisores de las tareas de permisos, topografía, registración y procesamiento, por su esfuerzo para garantizar el cumplimiento de las normas de calidad y SAS de Tecpetrol, en todos los trabajos.

Al personal de Tecpetrol que participó y supervisó los temas relativos a SAS, Relaciones con la Comunidad, Permisos, aspectos legales y administrativos, etc.

Al equipo de Seismic Prospect por el procesamiento de los datos cumpliendo los tiempos, requerimientos de calidad, y políticas SAS de Tecpetrol.

Referencias

- [1] R, Malcom Lansley, 2014. Four decades of evolution and innovation In land data acquisition. An overview of recent changes in land survey design. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos Simposio de Geofísica. La Geofísica: Puentes de Integración. Hotel Intercontinental-Mendoza, Argentina.
- [2] Shi Shuanghu,Shan Qitong, Huang Yanlin, Qi Yongfei, Shang Yongsheng, 2016. Application of Dynamic Slip Sweep and its Supporting Techniques in Saudi Arabia, SPG/SEG Beijing 2016 International Geophysical Conference
- [3] Nicolas Tellier, Stéphane Laroche and Philippe Herrmann, 2020. Native true amplitude and phase broadband sensing now available with the latest MEMS sensors. 2020 Society of Exploration Geophysicists SEG International Exposition and 90th Annual Meeting
- [4] Cooper, N. M., 2002. Vibroseis – a Counter-Intuitive Tool. Abstracts, CSEG Convention, Calgary.
- [5] Quigley, J., 2000. Evolution of a seismic acquisition methodology through integrated testing - onshore Abu Dhabi, United Arab Emirates, 1996-2000. First Break, 18, 475-480.
- [6] Leo Brown, Charles C. Mosher, Chengbo Li, Robert Olson, Jennifer Doherty, Tiffany C. Carey, Laurence Williams, Juntao Chang, Evan Staples (2017). Application of compressive seismic imaging at Lookout Field, Alaska. THE LEADING EDGE August 2017. Special Section: Impact of compressive sensing on seismic data acquisition and processing. Pag 670-676

AUTORES

Ezequiel Valeff

:: TECPETROL S.A.
Buenos Aires, Argentina.

Alejandra Galán

:: TECPETROL S.A.
Buenos Aires, Argentina.

David Silva

:: WELLFIELD SERVICES LTDA
Buenos Aires, Argentina.

Neptali Requena

:: TECPETROL S.A.
Buenos Aires, Argentina.

Jorge Muñoz

:: WELLFIELD SERVICES LTDA
Buenos Aires, Argentina.

Jorge Sanchez

:: WELLFIELD SERVICES LTDA
Buenos Aires, Argentina.

EJE 2

PROCESOS TECNOLÓGICOS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

¿Gas natural o gas natural licuado?

La huella de carbono del transporte de gas

desde Argentina a Brasil

María Gimena Torres, Gabriel Lorenzo y Germán García Colli

Resumen

El objetivo del estudio fue calcular la huella de carbono (HC) para la exportación de gas natural desde Argentina hasta Brasil por dos vías alternativas: utilizando los gasoductos existentes de interconexión a través de Bolivia o a través del transporte marítimo del Gas Natural Licuado (GNL). La unidad funcional evaluada fue 1 Sm³ de gas entregado y se consideró el transporte desde las facilidades de tratamiento en Neuquén, Argentina hasta la vinculación de la red de gas en Paulínia, Brasil. Para la vía por gasoductos se tuvieron en cuenta los datos reportados de transporte y emisiones de las empresas prestadoras. Para la vía de GNL se calcularon los rendimientos y emisiones para los procesos de licuefacción, transporte en buque y regasificación. Para el transporte en buque se evaluaron diferentes tecnologías de motores de propulsión. La HC para la vía gasoducto fue de 55,2 g CO₂eq/Sm³ mientras que para la vía marítima ascendió a 476,4 g CO₂eq/Sm³. La licuefacción fue la responsable del 72,2% de las emisiones en el caso de la vía marítima mientras que las emisiones del buque fueron del orden de las totales para el gasoducto. Considerando el Poder Calorífico Inferior del gas entregado las emisiones para la alternativa del GNL aumentaron hasta un 25,0%. El contenido de dióxido de carbono y los líquidos del gas natural también tuvieron una incidencia apreciable en el valor final de las emisiones.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero; Gasoductos; Licuefacción; Buques GNL.

Abstract

This study aimed to perform the Carbon Footprint (CF) of natural gas exported from Argentina to Brazil considering two alternative transportation pathways: through the existing gas pipelines via Bolivia or the maritime way in the form of Liquefied Natural Gas (LNG). The functional unit was 1 Sm³ of delivered gas and the transportation boundaries extended from gas treatment facilities located in Neuquén, Argentina to Paulínia interconnection hub in Brazil. For gas pipelines, transportation data and greenhouse gas (GHG) emissions reported by operating companies were considered. For LNG option, process yields and GHG emissions were calculated for liquefaction, maritime transport and regasification. Furthermore, alternative propulsion engines technologies were evaluated. The CF for gas pipeline option was 55.2 g CO₂eq/Sm³ whereas for the LNG pathway it reached 476.4 g CO₂eq/Sm³. Liquefaction contributed 72.2% of total emissions for LNG option, while emissions due to LNG tanker were equivalent to those of the entire pipeline pathway. For equal Lower Heating Value of delivered gas LNG emissions were increased up to 25%. Carbon dioxide and liquid content of injected gas also had a considerable burden on total emissions.

Keywords: Greenhouse gas emissions; Gas pipelines; Liquefaction; LNG tankers.

1. Introducción

El gas natural es la forma más limpia de generación de energía en términos de su huella de carbono respecto de otros combustibles fósiles: se emiten 52,91 kg CO₂/MMBTU al quemar gas natural mientras que, para propano, diésel y carbón las emisiones ascienden a 62,88, 74,14 y 95,99 kg CO₂/MMBTU, respectivamente [1]. Sin embargo, para una evaluación comparativa entre diferentes fuentes se propone la determinación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) basando el análisis en el enfoque de ciclo de vida, es decir, considerando las emisiones de todas las etapas de proceso en las que se incluyen: extracción, procesamiento, distribución y uso final. Dado el carácter "limpio" del gas natural, la exportación de Gas Natural Licuado (GNL) se ha ido incrementado para su uso como fuente combustible en localidades geográficas distantes reemplazando fuentes de combustibles locales consideradas de peor prestación. Cómo determinó Howarth [2], dependiendo de la distancia de transporte marítimo y el factor de caracterización asignado para el metano, la HC para generación de energía del GNL resultó mayor comparada con la HC de otros combustibles producidos localmente (como carbón o diésel).

De acuerdo con las reservas probadas de gas natural no convencional de Vaca Muerta, Argentina podría convertirse en el corto plazo en un exportador neto. En tal sentido, se están desarrollando ampliaciones y adecuaciones de la red de gasoductos existentes, para abastecer a todo el país desde la región productora y alcanzar mercados regionales como es el caso del norte de Chile y Brasil. En abril de 2025 se alcanzó un hito importante abriendo el mercado comercial con Brasil iniciando la exportación interrumpible de gas natural a través de la actual ruta conectada por el gasoducto Transboliviano [3]. Adicionalmente se proyecta la construcción de las facilidades requeridas que incluyen una planta de licuefacción y nuevo puerto en Punta Colorada, Río Negro, con el objetivo de ser un exportador de GNL por vía marítima y alcanzar mercados por fuera de la región.

En 2024, Estados Unidos fue el principal exportador mundial de GNL con un volumen de 337,0 MMm³ diarios, mercado que pudo desarrollar a partir de sus reservas de gas no convencional. Australia y Qatar también se destacan por su nivel exportador con 288,8 y 303,0 MMm³/d seguidos detrás por Rusia y Malasia con 124,6 y 104,8 MMm³/d, respectivamente [4].

Tanto la vía marítima como la terrestre son formas potenciales de transportar el gas a un mercado en pleno crecimiento como el brasileño. En ambos casos se destaca la importante generación de GEI dada la naturaleza de los fluidos procesados y su uso para generación de la energía requerida en potencia de transporte y operación de las facilidades asociadas. En este estudio se planteó la interrogante de cuál de ellas es la más conveniente desde el punto de vista de su impacto ambiental en términos de la huella de carbono. Siendo que la fuente de generación y procesamiento es igual para cada vía, la técnica del Análisis de Ciclo de Vida [5, 6] valida el análisis comparativo solo para aquellas etapas que son diferentes por lo que el estudio se limitó a las instancias de distribución y transporte.

2. Objetivos y alcance

El objetivo del presente estudio fue realizar un análisis comparativo de la huella de carbono del suministro de gas natural desde Argentina a Brasil mediante la red de gasoductos existentes versus el transporte en barco como Gas Natural Licuado. El enfoque para la determinación de la huella de carbono se basó en el Análisis de Ciclo de Vida, en el marco de las normas IRAM-ISO 14040:2023 [5], IRAM-ISO 14044:2008 [6] e IRAM-ISO 14067:2019 [7] con un alcance del tipo "*de la puerta a la puerta*" (punto de inyección en Argentina hasta el punto de entrega en Brasil) y considerando la fase operativa del proceso de transporte y distribución.

La unidad funcional evaluada fue 1 Sm³ de gas entregado en el punto de entrega y considerando un volumen mínimo de transporte por barco de 150.000 m³ de gas licuado que representa la capacidad promedio de este medio [8]. También se analizó como unidad funcional la energía entregada referida al

Poder Calorífico Útil o Inferior (PCI) dado que esta propiedad puede verse modificada durante el proceso de licuefacción del gas.

El punto de inyección del gas se consideró en las plantas de tratamiento localizadas en la región oeste del país e integrado por las instalaciones de Loma La Lata, Plaza Huincul, Río Neuquén y Tratayen, ubicadas en un radio que no supera los 100 km de distancia. El punto de entrega del gas se consideró en el nodo de gasoductos de Paulínia en San Pablo, Brasil, punto estratégico en la distribución de gas en la región sur de dicho país.

Para el transporte terrestre se consideró la red de gasoductos del noroeste argentino interconectados con la red de Bolivia que, a su vez, se encuentra vinculada con la red de Brasil mediante el gasoducto Transboliviano. En el caso de la vía marítima se consideró la logística a través de las nuevas instalaciones proyectadas para licuefacción y puerto en Punta Colorada, Río Negro [9].

En la Figura 1 se indican las rutas de las dos alternativas de transporte.

En el cálculo se estimaron las emisiones de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) por destacarse como las principales en este tipo de procesos. Para la estimación de las emisiones de metano (CH_4) se utilizó un factor de 28 g CO_2 eq/g CH_4 emitido, para el potencial de calentamiento global a 100 años de acuerdo con el inventario nacional de gases de efecto invernadero [10].



Figura 1. Alternativas de transporte evaluadas. Ruta de gasoductos: color azul. Ruta GNL: color rojo. **1:** Tratamiento de gas, Neuquén (AR). **2:** Nuevo puerto y planta de licuefacción en Punta Colorada, Río Negro (AR). **3:** Terminal GNL y planta regasificadora, Río de Janeiro (BR), **4:** nodo Paulínia, São Pablo (BR). **a:** gasoducto del centro, **b:** gasoducto del norte, **c:** gasoducto Campo Durán, **d:** gasoducto Juana Azurduy, **e:** gasoducto Transboliviano, **f:** gasoducto Yacuiba - Río Grande, **g:** nuevo gasoducto a Punta Colorada (traza estimada), **h:** ruta marítima GNL, **i:** gasoducto Japerí, **j:** gasoducto Paulínia.

3. Descripción de las alternativas analizadas

3.1 Transporte vía gasoductos Argentina - Bolivia - Brasil

En Argentina, el sistema de gasoductos bajo estudio se encuentra operado por la empresa TGN S.A. e involucra los gasoductos del Centro Oeste, Norte y Cornejo-Campo Durán. Cuenta con una longitud de 6.806 km en los tramos evaluados [11]. En Campo Durán la red interconecta a través del gasoducto Juana Azurduy de 48 km con la red de gasoductos bolivianos en Yacuiba [12]. Si bien los tramos del norte argentino fueron diseñados para la importación de gas desde Bolivia, en la actualidad ya se encuentran operativos para la exportación de gas a Brasil [3]. En territorio boliviano, el gasoducto Yacuiba Río Grande (GASYRG) cuenta con 432 km y se interconecta con el gasoducto Transboliviano (GTB) hasta Mutún en una longitud de ducto de 557 km [13, 14]. En territorio brasileño, el tramo norte del mismo gasoducto,

denominado TBG, de 1.264 km une las cabeceras de Corumba (Mato Grosso do Sul) y Paulínia (São Paulo) [15]. En Paulínia, el gasoducto TBG se interconecta con los gasoductos operados por Nova Transportadora do Sudeste S.A. (NTS).

3.2 Transporte marítimo de GNL

Para esta alternativa se consideró el siguiente recorrido del gas. Por un lado, se estimó una distancia de 1000 km para el nuevo gasoducto que se construirá para transportar el gas desde Vaca Muerta, desde las plantas de tratamiento de Neuquén, hasta su vinculación con la nueva planta de licuefacción y puerto en Punta Colorada, Río Negro, donde se licúa y transporta mediante buques metaneros hasta la terminal de GNL de Bahía de Guanabara en Rio de Janeiro donde se encuentra la planta de regasificación de Petrobras S.A. En el caso del transporte marítimo se contabilizó una distancia de 3.032 km (1.637 millas náuticas) desde Puerto Madryn en Chubut el puerto actual más cercano al nuevo puerto de Punta Colorada y una velocidad promedio de navegación de 26 km/h (14 nudos) [16]. Desde la planta de regasificación, el gas se inyecta a los tramos de gasoductos GASJAP y GASCAR operados por NTS S.A., ambos bidireccionales de 46 km y 456 km, respectivamente hasta el nodo de Paulínia en São Pablo [17].

En la Figura 2 se muestra un esquema de flujo representativo de ambas alternativas.

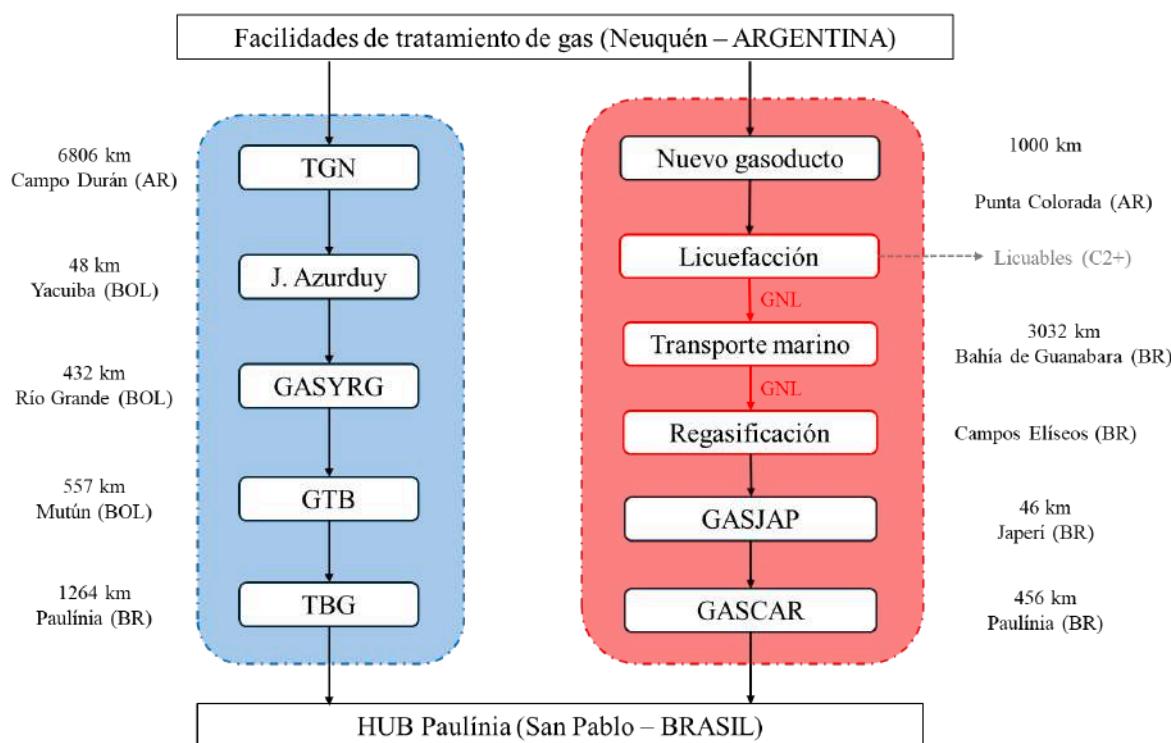


Figura 2. Esquema de flujo del gas. Izquierda: Ruta de gasoductos. Derecha: Ruta GNL.

3.3 Características generales de los sistemas

3.3.1 Gasoductos

El sistema TGN opera y mantiene más de 11.100 km de gasoductos de alta presión y cuenta con 21 plantas compresoras de una potencia total de 391.020 HP. Su capacidad máxima de transporte es de 59.9 MMSm³/d y durante 2023 transportó 18.041 MMSm³ gas lo que equivale a una producción promedio de 49,4

MMSm³/d. Adicionalmente, el 5,5% del gas transportado se exporta principalmente hacia Chile a través del gasoducto GasAndes. Además de los gasoductos del Centro Oeste, Norte y Cornejo-Campo Durán, la concesión incluye los siguientes gasoductos: Nor Andino tramo argentino, Entrerriano, TGM, del Pacífico tramo argentino, Escobar – Cardales, gasoducto del Noreste Argentino, Fortín de Piedra, Juana Azurduy lado argentino, Integración Federal y Colón – Paysandú [11].

El proyecto de Reversión del Gasoducto Norte incluyó la construcción del gasoducto de la Integración Federal de 122 km que une las localidades de Tío Pujio y La Carlota vinculando el gasoducto del Centro Oeste con el Norte; y dos loops entre Tío Pujio y Ferreyra de 51 km ambos ubicados en la provincia de Córdoba. Adicionalmente se encuentra en desarrollo el cambio del sentido de flujo de las plantas compresoras de Lumbreras (Catamarca), Lavalle (Santiago del Estero), Dean Funes y Ferreyra (Córdoba), lo que permitirá ampliar la capacidad de transporte de gas hacia las provincias del Norte Argentino hasta 19 MMSm³/d [18].

El sistema TGS está conformado por un total de 9.248 km de gasoductos y 32 plantas compresoras con una potencia instalada de 772.100 HP. Los gasoductos operados son el Neuba I, Neuba II, San Martín, Cordillerano, Vaca Muerta Norte y Vaca Muerta Sur. En 2023, transportó un total de 26.791 MMSm³ con una capacidad diaria de 73,4 MMSm³/d sobre una capacidad firme contratada de 81,5 MMSm³/d. El negocio de Midstream cuenta con las plantas de tratamiento de gas Río Neuquén, Tratayen y Plaza Huincul a partir de los cuales alimentan el sistema de gasoductos y aportan a través del gasoducto de integración federal a la red operada por TGN [19].

El gasoducto Juana Azurduy cuenta con una extensión de 48 km, de los cuales 35 km están del lado argentino en la provincia de Salta y cuenta con una capacidad de transporte de 27 MMSm³/d [12].

El Gasoducto Yacuiba Río Grande, cuenta con una capacidad de transporte de 26 MMSm³/d y transporta el gas natural producido en los campos del Sur de Bolivia, para luego ser comprimido y transportado a los mercados de exportación de Brasil y Argentina. El sistema está compuesto por dos estaciones compresoras cuya potencia instalada es de 82.400 HP [13].

El gasoducto Transboliviano cuenta con una longitud total de 3.150 km y una capacidad de compresión de 83.500 HP del lado boliviano y 2.646.800 HP del lado brasileño, distribuidos en 4 y 15 estaciones compresoras, respectivamente. Conecta las reservas del gas natural boliviano con los mercados de São Paulo y Porto Alegre, en el sureste de Brasil [14]. En el lado brasilerio se divide en tres tramos: el tramo Norte que llega a Paulínia (São Paulo), el tramo Sur de 1.177 km une las ciudades de Paulínia y Canoas (Río Grande do Sul); y el tramo Paulínia Guararema de 153 km. En 2023, alcanzó una capacidad promedio de transporte de 18,8 MMSm³/d [20].

El sistema de gasoductos operados por NTS S.A. cuenta con 2.059 km que interconecta los estados de Río de Janeiro, Minas Gerais y São Paulo. Tiene una capacidad máxima de transporte de 70 MMSm³/d alcanzando 25.8 MMSm³/d de promedio anual en 2023. La red se divide en 16 gasoductos con 6 estaciones de compresión y permite distribuir el gas de producción nacional de las cuencas de Campos y Santos, el gas proveniente de Bolivia, y el GNL descargado en la terminal de Bahía de Guanabara [17].

3.3.2 Licuefacción y transporte en buques metaneros. Tipos de motores y consumo de combustible.

El GNL se licúa a presión atmosférica y se debe mantener a una temperatura menor a su punto de ebullición de -165 °C. Para cumplir con las especificaciones para transporte referidas tanto al punto de ebullición como a las impurezas, durante la licuefacción es necesario ajustar el contenido de inertes (nitrógeno y dióxido de carbono) y de gases licuables de cadena de 2 carbonos o más (C2+). Esta fracción corresponde a los condensables del gas natural y pueden ser sometidos a un fraccionamiento posterior en los cortes de etano, propano, butano y gasolinas livianas. Según el contenido de dichos líquidos en la

corriente de gas de alimentación a la licuefacción, se puede producir una modificación en el poder calorífico del GNL producido respecto del gas natural transportado vía gasoducto.

El tamaño de los buques de transporte marítimo de GNL se basa en la capacidad volumétrica en m³. Los buques convencionales tienen capacidades entre 120.000 y 180.000 m³, aunque para minimizar costos existen buques en rutas como la de Qatar que pueden alcanzar los 260.000 m³ de capacidad [8].

Si bien los tanques disponen de sistemas de aislación eficientes, durante el transporte, la carga y la descarga se produce la vaporización de GNL debido a la admisión de calor desde el ambiente. Dicha cantidad de gas evaporada se conoce como Boil Off Gas (BOG) y debe ser removida del tanque para evitar sobrepresiones. Para aliviar la presión, el BOG se puede relicular o bien utilizar como combustible en aquellos buques con sistemas de propulsión aptos para su uso.

Los sistemas de propulsión han ido evolucionando con el paso del tiempo de manera que actualmente se encuentran en operación diferentes tipos. Para 2019, alrededor del 50% de los buques en uso contaban con turbinas de vapor (ST – steam turbine) cuya tecnología es la más antigua (1960), seguido del 27% de los motores eléctricos de triple combustible (TFDE – tri-fuel diesel electric). Dentro de los equipos más modernos se encuentran en un 10 % de uso los sistemas de diesel de baja velocidad (SSD – slow speed diesel), seguido de los motores eléctricos de combustible dual (DFDE – dual fuel diesel electric) y los motores tipo M con inyección de gas y control electrónico (MEGI – M-type, Electronically Controlled, Gas Injection), cada uno con un uso del 5%. Por otra parte, la construcción de nuevos equipos venía liderada por los sistemas MEGI con un 40% de las órdenes de compra, seguido de los TFDE y DFDE, con 19 y 18% de las órdenes de compra en 2019, lo que denota un cambio de tecnología hacia estos sistemas [21]. Otra tecnología que está siendo construida son los sistemas de dos tiempos y baja presión (XFD, low pressure, 2-stroke) [8].

Todos los sistemas mencionados pueden operar con uno o varios combustibles líquidos y con el boil off gas producido, excepto los sistemas de diésel de baja velocidad (SSD) que solo pueden usar combustible líquido y cuentan con una unidad de relicuefacción para evitar quemar GNL o presurizar el tanque. Adicionalmente, los sistemas TFDE y DFDE cuentan con motores de 4 tiempos, mientras que los sistemas SSD, MEGI y XFD cuentan con motores de dos tiempos [8].

Respecto a los combustibles líquidos usados, la opción más económica se trata del fuel de alto contenido de azufre (HFO – high sulfur fuel oil). Para cumplir con las nuevas exigencias en las emisiones de SO₂ [22], el HFO debe ser reemplazado por alternativas más costosas como el gasoil marino (MGO – marine gas oil) o el fuel de muy bajo azufre (VLSFO – very low sulfur fuel oil). Otra opción implica la inclusión de un scrubber a bordo del buque para tratar el HFO.

En la Tabla 1 se muestran los consumos de combustible por día según el tipo de sistema de propulsión.

3.3.3 Propiedades del gas natural, el GNL y los combustibles líquidos

Para la estimación de las propiedades del gas natural se consideró un promedio de los rangos de composición tanto para el gas natural convencional (CONV) como el proveniente de fuentes no convencionales (NOC) extraídas de información del ENARGAS [23]. Por otro lado, se realizó una estimación de una corriente en especificación de GNL a partir de elaboración interna. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las propiedades en condiciones estándar de presión y temperatura (101.325 Pa y 15 °C) para el gas natural (CONV y NOC) y el GNL estimadas con el software de simulación Unisim Design ®.

Tabla 1. Consumo de combustible en kg/d [21]

Sistema de propulsión	# tiempos	GNL	HFO	MGO	VLSFO
Turbina de vapor	-	175	219	209	205
TFDE	4	130	163	156	152
DFDE	4	130	163	156	152
MEGI	2	110	135	129	127
XFD	2	108	138	132	129
SSD	2	-	144	138	135

Tabla 2: Propiedades relevantes del gas natural y GNL [23]

"Máx" y "mín" refieren a las concentraciones máxima y mínima en metano (CH_4)

Propiedad	CO_2	CH_4	Densidad	PCS	PCI
Unidad	% mol	% mol	kg/m ³	kcal/m ³	kcal/m ³
CONV máx	0,20	95,57	0,7165	9.291,5	8.376,9
CONV mín	2,40	87,35	0,8010	9.577,1	8.653,4
NOC máx	0,25	91,07	0,7573	9.832,6	8.880,2
NOC mín	2,50	73,32	0,9603	11.552,5	10.492,9
GNL	0,00	96,50	0,7021	9.728,4	8.362,1

Para el PCI de los combustibles líquidos se consideraron los valores de 40, 41.8 y 42.7 MJ/kg para HFO, VLSFO y MGO, respectivamente de acuerdo con lo informado por Pavlenko y col [24].

4. Estimación de las emisiones

4.1 Gasoductos

Para la estimación de las emisiones en los gasoductos existentes se recurrió a los reportes de sustentabilidad disponibles de las empresas TGN S.A., TGS S.A y NTS S.A del año 2023 [25-27]. No se encontró información de la estimación de las emisiones de GEI en el tramo boliviano del gasoducto Transboliviano, mientras que, para el tramo brasileño, las emisiones están contabilizadas dentro de todos los activos pertenecientes a Petrobras S. A. por lo que no pudieron ser discriminadas. Tampoco se encontró información para el caso de los gasoductos Juana Azurduy lado boliviano y Yacuiba Río Grande.

En el sistema TGN se contabilizó una generación total de GEI de 1.117.043 ton CO_2 eq en 2023, lo que equivale a una HC de 62 ton CO_2 eq/MMSm³¹ transportado. Las emisiones contabilizadas incluyen las producidas por: turbinas, fugas de sellos de compresores, venteos, motores a gas, fugas de CH_4 , calderas, puesta en marcha de equipos, entre otras. Las más importantes son las asociadas a la operación de las turbinas donde el gas se utiliza como combustible alcanzando el 55.8% de las emisiones totales. Por otro lado, son destacables las emisiones de CH_4 equivalentes que representa el 23.3% del total, considerando las fugas de sellos de compresores y las pérdidas fugitivas.

En el caso de TGS se informa una huella de carbono de 76,13 ton CO_2 eq/MMSm³ de gas transportado, que equivale a 2.039.599 ton CO_2 eq en el año 2023 de un total de 3.066.506 ton CO_2 eq para las tres unidades de negocio de la compañía: transporte, *midstream*, y líquidos. Del total mencionado para transporte, la contribución más importante proviene de la combustión en equipos con un 65,6% seguido del 31,2% de

¹ 1 ton/MMm³ equivale a 1 g/m³.

emisiones equivalente de venteos en CH₄, de los cuales el 70% proviene de fugas de sellos y el 16% de mantenimiento en los gasoductos.

En el sistema NTS se informa una emisión de GEI de 125.420 ton CO₂ eq en 2023 que corresponde a una HC de 12,57 ton CO₂ eq/MMSm³ de gas transportado. De esta cifra, el 79,7% se produjo en las estaciones compresoras de gas y un 14,6% en los puntos de entrega. Las emisiones de metano representan un 27.0% aproximadamente considerando aquellas provenientes de los venteos sin quema, el sello de compresores, los venteos en puntos de entrega y en las estaciones de regulación.

Teniendo en cuenta que las emisiones dependen de la potencia de compresión requerida y, por ende, de la longitud del gasoducto, los valores de HC se referencian a una distancia unitaria quedando los siguientes valores: 6,06, 8,23 y 5,96 kg CO₂ eq/MMSm³/km de gasoducto (TGN, TGS y NTS, respectivamente). Estos valores muestran una tendencia similar para las instalaciones de TGN y NTS desviándose en un 37.0% aproximadamente para el caso de TGS.

Para la asignación de emisiones en los tramos de gasoducto boliviano y brasileño se consideraron las emisiones del sistema NTS.

4.2 Licuefacción

Las emisiones de CH₄ fugitivo se estimaron como el 0,35% del GNL producido de acuerdo con Balcombe y col. [28]. Adicionalmente, las emisiones en CO₂ se componen de tres contribuciones. La primera corresponde al CO₂ producido por la combustión de CH₄ para generación de la energía requerida para la operación de las instalaciones. Considerando un requerimiento del 9,4% del GNL producido [28] y una combustión completa y perfecta, se obtienen 258,5 g CO₂/kg GNL licuado. La segunda contribución proviene del contenido de CO₂ en la corriente de gas natural a procesar que requiere ser eliminado para la licuefacción. El contenido de CO₂ de la corriente de gas natural de Argentina proveniente de las formaciones no convencionales se estima en el rango de 0,25 a 2,5 % molar [23]. Esto equivale a un rango de 7,0 a 87,7 g CO₂/kg GNL licuado. Para la actual estimación se consideró el valor medio de 47,4 g CO₂/kg GNL siendo un valor consistente con el propuesto por Howarth [2]. La tercera contribución está asociada a la quema en antorcha de venteos de proceso. Para el mismo se ha considerado el valor medio de 22,3 g CO₂/kg GNL presentado por Okamura y col. [29].

4.3 Transporte de GNL

Las emisiones de CH₄ se producen a partir de dos procesos principales: las fugas de GNL vaporizado por las pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento (BOG_{vent}) y las fugas del GNL que se usa como combustible denominado *Slip* (Ecuación 1).

La generación de BOG depende de la temperatura ambiente y se estima entre 0,001 y 0,0017 kg CH₄/kg GNL transportado/día para 5 y 25 °C, respectivamente. También se consideró que en el viaje de ida el tanque de GNL se encuentra a la capacidad máxima de transporte de 67.500 ton GNL (Ecuación 2a) y en el viaje de vuelta se mantiene un remanente un 10% de dicha carga para mantener en forma continua la generación de BOG y utilizarlo en parte como combustible (Ecuación 2b) [2].

Por otro lado, la cantidad efectivamente venteada depende del excedente de BOG que no se utiliza como combustible y que se debe relliar. Esto sucede en los viajes de ida y de acuerdo con el consumo de GNL como combustible. Para los viajes de vuelta, todo el BOG producido se consume como combustible, por lo cual no se genera excedente. Al igual que en el proceso de licuefacción, se considera que la pérdida por venteo es del 0,35% del gas licuado (Ecuación 3a). En el caso de los buques con motores que solo se alimentan con combustible líquido (SSD) el total del BOG generado se debe relliar (Ecuación 3b).

El Slip es función del tipo de máquina de propulsión y la cantidad de BOG que se utiliza como combustible (Ecuación 4). En el caso de los motores de 4 tiempos se considera un slip de 6,4% del gas combustible y para los motores de 2 tiempos el valor desciende a 3,8% [2]. En el caso de las turbinas de vapor el valor se considera despreciable respecto de los motores de 4 y 2 tiempos (0,04 g CH₄/kWh de potencia en turbinas de vapor versus 5,5 y 2,5 g CH₄/kWh en motores de 4 y 2 tiempos, respectivamente [24]).

En el caso de las emisiones de CO₂ las mismas se originan en la combustión para propulsión y generación energía incluyendo tanto el uso de GNL (Ecuación 7a) como de otro combustible líquido: HFO, MGO, VLSFO (Ecuación 7b). Para la estimación se consideraron las emisiones específicas estimadas por Pavlenko y col. [24] de 56,5 g CO₂/MJ de GNL y un promedio de 80,1 g CO₂/MJ de combustible líquido.

En la Tabla 3 se presentan las ecuaciones para el cálculo de las emisiones de CH₄ y CO₂ expresadas en gramos y asociadas al transporte de un buque tanque que descarga efectivamente 60.800 ton. de GNL.

Tabla 3. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de las emisiones en el transporte de GNL.

Parámetro	Unidad	Ecuación	#
Estimación de las emisiones de CH ₄			
Emisiones CH ₄	g CH ₄	$ee_{CH_4} = BOG_{VENT} + Slip_{VENT}$	(1)
Generación BOG diaria	g CH ₄ /d	$BOG_{IDA} = bog \cdot GNL_{IDA}$ $bog = \begin{cases} 0,001 \text{ a } 5^{\circ}C \\ 0,0017 \text{ a } 25^{\circ}C \end{cases}$	(2a)
		$BOG_{VUELTA} = bog \cdot GNL_{VUELTA}$	(2b)
Venteo BOG	g CH ₄	$BOG_{VENT} = 0,0035 \cdot (BOG_{IDA} - CE_{GNL}) \cdot t_{IDA}$ si COMB = GNL	(3a)
		$BOG_{VENT} = 0,0035 \cdot (BOG_{IDA} + BOG_{VUELTA}) \cdot t_{IDA}$ si COMB = FO	(3b)
Venteo Slip	g CH ₄	$Slip_{VENT} = BOG_{COMB} \cdot Slip$	(4)
Consumo GNL combustible	g CH ₄	$BOG_{COMB} = CE_{GNL} \cdot t_{TOT}$	(5)
Estimación de las emisiones de CO ₂			
Emisiones CO ₂	g CO ₂	$ee_{CO_2} = BOG_{COMB} \cdot 56,5 \cdot PCI_{GNL}$ si COMB = GNL	(6)
		$ee_{CO_2} = FO_{COMB} \cdot 80,1 \cdot PCI_{FO}$ si COMB = FO	
Consumo Fuel Oil	kg oil	$FO_{COMB} = CE_{FO} \cdot t_{TOT}$	(7)

4.4 Regasificación

Las emisiones en la regasificación están ligadas principalmente al CO₂ producido por la combustión del gas natural utilizado para la generación de energía. De acuerdo con Shaton y col [30] y Balcombe y col [31], el requerimiento de gas como combustible se estima en 1,5% del gas natural regasificado. Con este valor se obtiene una generación de 29,0 g CO₂/Sm³ GNL regasificado. Adicionalmente, la revisión realizada por Balcombe y col [28] indica un rango de variabilidad entre 9,9 y 96,4 g CO₂ eq/Sm³ para las emisiones totales (quema de combustible y venteos no controlados). Para la presente estimación se consideró un valor medio de 53,15 g CO₂ eq/Sm³ de gas natural regasificado.

Rendimiento de las etapas de proceso

En el caso del transporte en gasoductos se estimó un rendimiento global del transporte promedio a partir de los datos estadísticos mensuales de transporte y distribución informados por ENARGAS de cada empresa licenciataria para los años 2023 y 2024 [32]. Dicho valor tiene en cuenta el consumo de gas como combustible, las pérdidas y el gas no contabilizado.

Para la regasificación se consideró que el 1,5% del GNL procesado se utiliza como combustible para potencia y generación eléctrica del mismo proceso y el restante que se emite como CO₂ de pérdida se estima como producto de la quema en flare por falta de información.

Del transporte de GNL en buque se consideraron dos contribuciones: el boil off gas venteado y el GNL utilizado como combustible.

Para la licuefacción se tuvo en cuenta: el venteo fugitivo de metano estimado como el 0,35%, el 9,4% del GNL procesado para uso como combustible, la eliminación de los compuestos no condensables (CO₂ y N₂) provenientes en el gas de alimentación y la separación de los compuestos pesados (C2+). De las dos últimas contribuciones se realizó un promedio de las composiciones máxima y mínima asociadas al gas NOC.

En la Tabla 4 se muestran los valores de rendimientos calculados en referencia a la corriente de la alimentación a la etapa.

Por lo tanto, para la alternativa de suministro de Gas Natural por vía marítima se obtuvo un rendimiento global de 72,2% considerando el rendimiento promedio para el transporte marítimo.

Resultados y discusión

Las emisiones de GEI en la alternativa de transporte vía gasoducto alcanzan un valor de 55,2 g CO₂ eq mientras que para la alternativa de transporte marítimo ascienden a 476,4 g CO₂ eq en promedio por cada Sm³ de gas entregado. En el segundo caso, las máximas emisiones se obtienen considerando buques impulsados por motores de 4 tiempos y turbinas de vapor (490,2 y 479,4 g CO₂ eq, respectivamente), mientras que las mínimas emisiones se obtienen para un buque con motor de 2 tiempos (460,5 g CO₂ eq). En el caso de motores de uso exclusivo de fuel oil el valor se encuentra muy próximo al promedio (475,4 g CO₂ eq).

Tabla 4. Rendimientos de las etapas de proceso en el transporte de gas natural.

Etapa	Eficiencia
Transporte en gasoducto	97,2%
Licuefacción	82,9%
Transporte GNL (promedio)	98,4%
Turbina	97,3%
Motor 4 tiempos	98,0%
Motor 2 tiempos	98,3%
Fuel Oil	100,0%
Regasificación	91,1%

Adicionalmente, la entrega de una unidad de gas requiere inyectar 0,03 Sm³ de gas adicional para el caso del transporte vía gasoducto, mientras que para el transporte vía marítima requiere de 0,426 Sm³ de gas adicional en promedio, debido a los rendimientos estimados para cada alternativa. En la Tabla 5 se puede ver el inventario de las etapas intervinientes en el transporte marítimo de GNL.

La principal contribución a las emisiones del transporte marítimo se produce en la etapa de licuefacción representando el 72,2% del total de las emisiones, seguidas en menor medida por el transporte y la regasificación con valores comparables del 13,3% y 11,5%, respectivamente. La contribución de los tramos de gasoducto de vinculación entre puertos se estima en un 3,0%. Adicionalmente, el 80,4% de las emisiones se deben al dióxido de carbono emitido siendo el restante asociado a los venteos de metano sin combustionar (Figura 3). En la regasificación se consideró que son despreciables las pérdidas fugitivas de metano de acuerdo con lo informado por Shaton y col [30]. En la licuefacción, el 78,8% de las emisiones en CO₂ son producto de la combustión para generación de energía, mientras que el 14,4% provienen del CO₂ proveniente en la corriente de gas natural de alimentación. El restante 6,8% proviene de las quemas en antorcha. Para la misma etapa, las emisiones de CH₄ fugitivas representan el 23,0% mientras que contribuyen con el 84,9% a las emisiones totales de CH₄.

Tabla 5. Inventario para el transporte de GNL desde Argentina a Brasil. UF: 1 Sm³ de gas entregado.

Parámetro	Valor	Unidad
Motor 4 tiempos	265,906	gCO ₂ eq
Motor 2 tiempos	264,995	gCO ₂ eq
Fuel Oil	260,529	gCO ₂ eq
<i>Transporte GNL</i>		
GNL producido		
Turbina	1,162	Sm ³
Motor 4 tiempos	1,154	Sm ³
Motor 2 tiempos	1,150	Sm ³
Fuel Oil	1,131	Sm ³
Distancia	3,032	km
Emisiones fugitivas CH ₄		
Turbina	0,000	gCO ₂ eq
Motor 4 tiempos	29,401	gCO ₂ eq
Motor 2 tiempos 5°C	8,778	gCO ₂ eq
Motor 2 tiempos 25°C	8,820	gCO ₂ eq
Fuel oil 5°C	0,459	gCO ₂ eq
Fuel oil 25°C	0,780	gCO ₂ eq
Emisiones CO ₂		
Turbina	62,393	gCO ₂ eq
Motor 4 tiempos	46,349	gCO ₂ eq
Motor 2 tiempos	38,505	gCO ₂ eq
Fuel oil	67,529	gCO ₂ eq
Regasificación		
GNL descargado	1,1306	Sm ³
Emisiones	54,703	gCO ₂ eq
Gasoducto Guanabara - Paulínia		

GN Regasificado	1,029	Sm ³
Longitud	502	km
Emisiones	2,992	gCO ₂ eq

La variación en la cantidad de dióxido de carbono de la corriente de gas natural de alimentación a la licuefacción tiene un impacto apreciable tanto en el rendimiento como en la HC resultante. Para la mínima/máxima concentración (0,25/2,5% molar) se obtiene una HC -7,1/+7,0 % respecto de la concentración promedio.

Por otro lado, el volumen de GNL requerido para entregar la misma cantidad de energía que 1 Sm³ de gas natural transportado vía gasoducto y medida en términos del Poder Calorífico Útil o Inferior (PCI) alcanza en promedio a 1,09 Sm³ pudiendo alcanzar una diferencia máxima del 25%. En estas circunstancias las emisiones se incrementan linealmente a un valor de 518,2 g CO₂ eq.

Con respecto al transporte en gasoducto, se comparó el valor obtenido con los disponibles en trabajos de referencia. Howarth [2] consideró el transporte en gasoducto desde la regasificación de GNL hasta facilidades de generación eléctrica y contabilizó únicamente emisiones de metano estimadas en 0,0032 kg CH₄/kg GNL transportado, que equivalen a 62,9 g CO₂ eq/Sm³ de GNL transportado. Este valor es comparable con el sistema argentino, considerando únicamente las pérdidas fugitivas de metano que rondaron los 73 g CO₂ eq/Sm³ de gas en el sistema TGN en 2023. El total de pérdidas de metano informadas son 260 y 958 g CO₂ eq/Sm³ de gas de TGN y TGS, respectivamente para 2023. En el sistema de NTS de Brasil se estimaron alrededor de 3,6 g CO₂/Sm³ del gas transportado en igual período, un valor mucho menor dado que se trata de una red con menor longitud de ductos y por ende de requerimiento de potencia de compresión.

Xu y col. [33] estimaron la HC teórica para tres gasoductos de China de 947, 699 y 756 km de longitud. En cada caso y para la fase operativa, obtuvieron 59,5, 42,6 y 32,7 g CO₂/m³ y 286,6, 79,7 y 190,8 g CH₄/m³, respectivamente para las longitudes mencionadas. Las emisiones de metano se separan considerablemente de las informadas para los gasoductos analizados lo que puede estar asociado a que la estimación teórica de dicho autor resultó a partir del cálculo de las pérdidas de metano como flujo a través de un orificio.

Shaton y col. [30] calcularon la HC de la red de gasoductos de Noruega hacia Europa. Del total de gasoductos analizados los sistemas Europipe II de 658 km y Statpipe de 871 km, fueron los únicos que contaban con sistemas de compresión alimentados con el mismo gas de transporte. Para estos se estimó una HC de 17,96 y 26,87 g CO₂/Sm³ de gas para Europipe II y Statpipe, respectivamente.

En la revisión de Balcombe y col. [31] el rango de variabilidad de las emisiones totales se encontró entre 7,6 y 590,6 g CO₂ eq/Sm³ en la fase de transporte vía gasoducto. A partir de los valores mostrados y la variabilidad encontrada se coincide con este autor en que la cantidad de emisiones está gobernada por la distancia de transporte, la tecnología y el requerimiento de compresión.

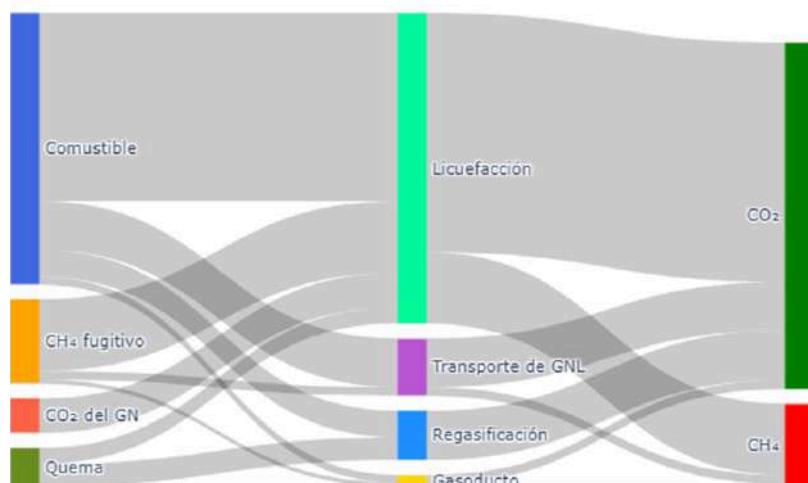


Figura 3. Contribución por proceso, por tipo de gas y por fuente de las emisiones en el transporte de GNL desde Argentina a Brasil.

Para la generación y distribución de GNL, Shaton y col. [30] estimaron emisiones de CO₂ de 146,98 g CO₂/Sm³ en la licuefacción, 30,54 CO₂/Sm³ en la regasificación y 61,05 gCO₂/Sm³ para el transporte en barco considerando el suministro en una ruta de viaje similar a la presentada en este artículo. El valor de la licuefacción resulta aproximadamente la mitad de las estimadas mientras que las de transporte en barco se encuentran en el mismo orden. A pesar de ello, sí concuerda con los resultados del presente trabajo en el peso relativo de las emisiones del proceso de licuefacción por sobre las restantes. Respecto de la regasificación, la estimación de Shaton y col. [30] solo incluyó el 1,5% producido para la generación de energía para abastecer el mismo proceso y no incluyó pérdidas fugitivas o quemas no controladas.

Asignación de emisiones a los líquidos del gas natural (LGN)

El contenido promedio de los líquidos del gas natural (LGN) de fuentes no convencionales ronda el 41,6% en masa. Considerando su recuperación y separación sería válido realizar una asignación de las emisiones. Aplicando una asignación en masa para el gas transportado desde ingreso a gasoducto y la licuefacción se podría tener una mejora de hasta un 30% en promedio de las emisiones totales asociadas al GNL. Cabe destacar que dicho porcentaje no tiene en cuenta las emisiones producidas por los procesos asociados a la separación del LGN.

Conclusiones

A pesar de que la distancia de transporte terrestre duplica la distancia recorrida en barco (9.101 vs 4.530 km), las emisiones de GEI son ocho veces mayores para el segundo caso respecto del primero. La mayor contribución es debida al proceso de licuefacción y si bien, el transporte marítimo tiene un peso relativo bajo, resulta similar en orden de magnitud a las emisiones del transporte en gasoducto. Estas estimaciones además están realizadas para la actual ruta de gasoductos vía Bolivia la cual podría optimizarse por vías alternativas (por ejemplo, utilizando las vías del este argentino). Con lo cual, una mejor ruta generaría emisiones menores a las estimadas en el presente trabajo.

Dependiendo de la especificación del gas natural distribuido, el poder calorífico asociado puede ser similar o hasta un 25% superior respecto al del GNL. Esto se traducirá en un mayor consumo de GNL y por ende se incurrirá en mayores emisiones para la misma energía útil entregada.

Respecto de las emisiones fugitivas de CH₄ resultan en una contribución destacable en ambas alternativas debido al mayor impacto que genera en las emisiones equivalentes de CO₂. Si bien en el presente trabajo se utilizó el factor de impacto a 100 años, las estimaciones para el corto plazo (20 años) tienen factores de caracterización alrededor de 80 g CO₂ eq/g CH₄ lo que modifica significativamente el peso relativo de dichas emisiones [2]. Es por esto que se resalta la importancia en la detección y caracterización de las pérdidas para evaluar correctamente su impacto.

Las emisiones producidas de acuerdo con el tipo de motor de propulsión marítima tienen variaciones que no superan el 3,3% (+2,9 / - 3,3 %), respecto del valor promedio para la distancia evaluada. Si bien se puede esperar una mayor emisión para los motores que no operan con GNL, tanto por las pérdidas de BOG como por la mayor generación de CO₂ en la combustión, tiene mayor peso el rendimiento del combustible.

En cuanto a la separación de los líquidos (LGN) provenientes del gas natural no convencional que hoy se acepta apto a los fines de su distribución y uso para generación de energía (industrial y doméstica), no sólo produciría una valorización económica considerable si no que, a su vez, permitiría disminuir la penalización de las emisiones de GEI sobre el GNL producido.

Respecto de las emisiones de gasoductos evaluados en otros estudios, se observa concordancia con el amplio rango estudiado por Balcombe [31] que incluye un número considerable de instalaciones, mientras que a los estudios de Shaton y col. [30] y Howarth [2] los valores son superiores. Esta diferencia puede ser atribuible a la diferente extensión en longitud y capacidad de compresión requerida (en el primer caso, las distancias son sensiblemente menores y en el segundo caso no se informa la distancia recorrida). En el caso

de Xu y col. [33] se identifica un apartamiento considerable de las pérdidas de metano, lo que puede estar asociado al modelo teórico utilizado para su estimación.

Agradecimientos

A la empresa Honeywell por la provisión gratuita de la licencia académica del software de simulación de procesos Unisim Design ® al departamento de Ingeniería Química – Facultad de Ingeniería – UNLP.

Referencias

- [1] U.S. Energy Information Administration (EIA) Carbon Dioxide Emissions Coefficients. Disponible: https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php
- [2] R.W. Howarth, "The greenhouse gas footprint of liquefied natural gas (LNG) exported from the United States". Energy Sci Eng. 2024;1-17 <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese.31934>
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Censo (INDEC) Consultas del Comercio Exterior de Bienes. Gas natural en estado gaseoso. Exportaciones 2025 a Brasil. Disponible: <https://comex.indec.gob.ar/#/>
- [4] U.S. Energy Information Administration (EIA). The United States remained the world's largest liquefied natural gas exporter in 2024. Disponible: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=64844>
- [5] IRAM-ISO 14040:2023. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [6] IRAM-ISO 14044:2008. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- [7] IRAM-ISO 14067:2019. Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación.
- [8] T. Huan, F. Hongjun, L. Wei, and Z. Guoqiang, "Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carrier", Propulsion Systems. IntechOpen, Oct. 07, 2019. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82154>
- [9] YPF S.A. Proyecto Integrado de GNL. Disponible: <https://argentina-lng.ypf.com/es/index.html>
- [10] Desarrollo Sostenible y Gestión Climática (2023) "Quinto Informe Bienal de Actualización. Informe Nacional de Inventario de la República Argentina a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)". Disponible: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/argentina-bu_r5.pdf
- [11] Transportadora del Gas del Norte. S.A. (2025) Disponible: <https://www.tgn.com.ar/operaciones-servicios/sistema-tgn/>
- [12] Energía Argentina S.A. (2025) Disponible: <https://www.energia-argentina.com.ar/transporte-de-gas/>
- [13] Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, Transierra S.A. (2025) Disponible: <https://ypfbtransierra.com.bo/comercializacion-y-regulacion/>
- [14] Gasoducto Transboliviano S.A. Disponible: <https://www.gaistransboliviano.com.bo/gasoducto-bolivia-brasil/>
- [15] Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia--Brasil S.A. Gestión propia en operación y mantenimiento. Disponible: <https://www.tbg.com.br/operacao>
- [16] International Container Shipping. Online Freight Marketplace (2025). Disponible: www.searates.com/es/distance-time
- [17] Nova Transportadora du Sudeste S.A. Disponible: <https://www.ntbsbrasil.com/en/transport-system/#map>
- [18] Energía Argentina S.A. (2025) Disponible: <https://www.energia-argentina.com.ar/titulo-noticia-6/>
- [19] Transportadora del Gas del Sur S.A. Disponible: <https://www.tgs.com.ar/transporte/>
- [20] Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. Relatório Integrado 2023. Disponible: <https://www.tbg.com.br/relatorios>
- [21] N. Bakkali y L. Ziomas, "Forced Boil Off of Gas: The Future of LNG as a Fuel for LNG Carriers" (2019) McKinsey & Company. Disponible: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/forced-boil-off-gas-the-future-of-lng-as-a-fuel-for-lng-carriers>
- [22] IMO2020, "Límite de azufre en el fuel oil: aire más limpio, planeta más sano" (2025) Organización Marítima Internacional. Disponible: <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/pages/102-IMO-2020.aspx>

- [23] C.A.M. Casares, "Política Energética - Proyectos de Gas Natural y GNL (mediano y largo plazo)" (2024) Ente Nacional de la Energía (ENARGAS), en Disertación Oral en Segundas Jornadas de Gas, Gas Natural y Gas Natural Licuado. Su transporte y procesamiento. Centro Argentinos de Ingenieros (CAI) – Instituto Argentino de Gas y Petróleo (IAPG).
- [24] N. Pavlenko, B. Comer, Y. Zhou, N. Clark (2020) "The Climate Implications of Using LNG as a Marine Fuel. International Council on Clean Transportation". Working paper 2020-02. Disponible: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Climate_imPLICATIONS_LNG_marinefuel_01282020.pdf
- [25] TGN S.A. Reporte de Sustentabilidad 2023. Disponible: <https://www.tgn.com.ar/sustentabilidad/reportes-de-sustentabilidad/>
- [26] TGS S.A. Reporte de Sustentabilidad 2023. Disponible: <https://www.tgs.com.ar/todos-los-reportes/>
- [27] NTS S.A. Reporte de Sustentabilidad 2023. Disponible: <https://www.ntsbrasil.com/esg/relatorios-de-sustentabilidade/>
- [28] P. Balcombe, I. Staffell, I. Garcia Kerdan, J. F. Speirs, N. P. Brandon, A. D. Hawkes, "How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis", Energy, Volume 227, 2021, 120462 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120462>
- [29] T. Okamura, M. Furukawa, H. Ishitani, "Future forecast for life-cycle greenhouse gas emissions of LNG and city gas 13A", Applied Energy 84 (2007) 1136-1149. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.05.005>
- [30] K. SHATON, A. HERVIK, H.M. HJELLE (2020) "The Environmental Footprint of Natural Gas Transportation: LNG vs. Pipeline". Economics of Energy & Environmental Policy, 9(1), 223–242. <https://www.jstor.org/stable/26900115>
- [31] P. Balcombe, K. Anderson, J. Speirs, N. Brandon, A. Hawkes, "The Natural Gas Supply Chain: The Importance of Methane and Carbon Dioxide Emissions", ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2017 5 (1), 3-20. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.6b00144>
- [32] ENARGAS (2025). Datos estadísticos de transporte y distribución de gas. Disponible: <https://www.enargas.gob.ar/secciones/transporte-y-distribucion/datos-operativos-subsec.php?sec=2&subsec=3&subsec03>
- [33] S. Xu, J. Wang, H. Sun, L. Huang, N. Xu, Y. Liang, "Life cycle assessment of carbon emission from natural gas pipelines", Chemical Engineering Research and Design, Volume 185, 2022, Pages 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.07.018>

AUTORES

María Gimena Torres

Avenida 1 y calle 47, La Plata,
Argentina.
gimena.torres@ing.unlp.edu.ar

Gabriel Lorenzo

Calle 47 y 116, La Plata,
Argentina.
gabriel.lorenzo@ing.unlp.edu.ar

Germán García Colli

Calle 47 N° 257, La Plata,
Argentina.
german.garciacolli@ing.unlp.edu.ar

Ingeniera Química (UNLP) y especialista en Industria Petroquímica (UNSAM - IPA) es docente auxiliar del depto. Ing. Qca. (Fac. Ing., UNLP). Con 15 años de experiencia en ingeniería de procesos para la industria de Oil & Gas, actualmente su labor en la investigación se enfoca en el análisis de ciclo de vida de distintos procesos.

Ingeniero Químico y Doctor en Ingeniería (Fac. Ing., UNLP). Trabaja en el CIDCA (CONICET-La Plata-CIC-UNLP); es Investigador Independiente (CONICET) y Profesor Titular del depto. Ing. Qca. (Fac. Ing., UNLP). Su labor en investigación se orienta al estudio del comportamiento reológico y microestructural de matrices biopoliméricas complejas y el análisis del ciclo de vida de distintos procesos.

Profesor del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de La Plata. Obtuvo el título de Doctor en Ingeniería en la misma casa de estudios. Su labor de investigación se enfoca en la ingeniería de reactores químicos y en el análisis del ciclo de vida de distintos procesos.

Copolímeros fumáricos como modificadores de asfaltos: efecto de la estructura macromolecular sobre las propiedades del ligante

María Leticia Bravi Costantino y Tamara Oberti

Resumen

La modificación de asfaltos con polímeros constituye una estrategia efectiva para mejorar su desempeño frente al tránsito, la deformación permanente y las variaciones térmicas. Sin embargo, la compatibilidad entre el asfalto y el modificador sigue siendo un desafío, especialmente al emplear polímeros sintéticos con elevado peso molecular. En este contexto, el Grupo de Macromoléculas ha desarrollado una línea de investigación orientada al diseño de copolímeros fumáricos como modificadores del ligante asfáltico, utilizando insumos locales y metodologías de síntesis radicalaria. Se han obtenido copolímeros lineales y ramificados con componentes alquílicos y aromáticos, cuyas estructuras macromoleculares fueron correlacionadas con las propiedades térmicas, morfológicas y reológicas de los asfaltos modificados. Los resultados demuestran que la arquitectura polimérica influye significativamente en la compatibilidad con el asfalto y en la estabilidad térmica del material, observándose mejoras notables en el punto de ablandamiento, la recuperación elástica y la viscosidad. Asimismo, se exploró la incorporación de rellenos biobasados y/o nanoarcillas como estrategia complementaria para reforzar la interacción polímero-asfalto y optimizar el desempeño del sistema. Estos avances contribuyen al desarrollo de asfaltos híbridos de alto rendimiento y mayor durabilidad, con potencial aplicación en pavimentos más resistentes y sostenibles.

Palabras clave: Copolímeros fumáricos; Estructura polimérica; Asfaltos modificados; Microscopía de fluorescencia; Nanoarcillas.

Abstract

Polymer modification of asphalt binders is an effective strategy to enhance their performance against traffic load, permanent deformation, and thermal fluctuations. However, achieving compatibility between the asphalt matrix and the modifier remains a major challenge, particularly when using high-molecular-weight synthetic polymers. In this context, the Macromolecules Group has developed a research line focused on the design of fumarate-based copolymers as asphalt modifiers, employing locally available raw materials and radical polymerization methodologies. Linear and branched copolymers containing both aliphatic and aromatic segments were synthesized, and their macromolecular structures were correlated with the thermal, morphological, and rheological properties of the modified asphalts. The results demonstrate that polymer architecture strongly influences the compatibility with asphalt and the thermal stability of the material, with significant improvements observed in softening point, elastic recovery, and viscosity. Furthermore, the incorporation of bio-based fillers and/or nanoclays was explored as a complementary strategy to reinforce polymer-asphalt interactions and optimize the overall performance of the system. These advances contribute to the development of high-performance hybrid asphalts with enhanced durability and potential application in more resilient and sustainable pavements.

Keywords: Fumaric copolymers; Polymeric Structure; Modified asphalt; Fluorescence microscopy; Nanoclays.

1. Introducción

El término “asfalto” ha sido empleado históricamente de manera ambigua para referirse a una amplia gama de materiales y mezclas, lo que ha generado confusión en su uso cuando no se acompaña de una definición precisa [1]. En el presente trabajo, se empleará la palabra asfalto para designar específicamente a la fracción compleja de hidrocarburos aromáticos, alifáticos y parafínicos que permanece tras el proceso de refinado del petróleo y que, al mezclarse con agregados minerales, constituye el pavimento utilizado en la construcción de calles y rutas.

Los pavimentos asfálticos representan una de las infraestructuras más críticas y con mayor impacto económico a nivel mundial. Sin embargo, el aumento en la frecuencia y el peso del tránsito vehicular, sumado a condiciones climáticas extremas, acelera su deterioro reduciendo la vida útil y obligando a destinar grandes recursos a tareas de mantenimiento. Este desgaste se manifiesta en fisuras, grietas y ahuellamiento, comprometiendo tanto la seguridad como la sustentabilidad del sistema vial.

En este escenario, la incorporación de polímeros al asfalto (PMA, polymer modified asphalt) ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar sus prestaciones, incrementando la elasticidad, la resistencia a la deformación permanente y la durabilidad frente a los asfaltos convencionales [2,3]. Entre los polímeros más empleados se encuentran termoplásticos (PE, PP, EVA, EBA), elastómeros (SBS, SIS, SEBS), así como caucho reciclado y copolímeros acrílicos [4-8].

Las propiedades finales de los asfaltos modificados dependen fuertemente de las características estructurales de los polímeros incorporados. Entre los parámetros más relevantes se destacan: el peso molecular y su distribución, que determinan la respuesta viscoelástica; la arquitectura macromolecular (lineal, ramificada o en bloques), que condiciona la compatibilidad y la morfología de fases; y la presencia de grupos funcionales o el grado de entrecruzamiento, que influyen en la estabilidad del sistema y en el desempeño mecánico a diferentes temperaturas [9,10]. Estos factores definen en última instancia la resistencia al ahuellamiento, la recuperación elástica y la durabilidad de los asfaltos modificados.

Nuestro Grupo Macromoléculas del Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA-CONICET/UNLP) cuenta con amplia experiencia en la síntesis y caracterización de homo y copolímeros fumáricos, cuya versatilidad estructural los posiciona como candidatos promisorios para la modificación de asfaltos [11-15]. El presente trabajo busca aportar conocimiento sobre la síntesis y estructura de copolímeros de diseño y producción local, las características estructurales poliméricas requeridas para la modificación de asfaltos, el desarrollo de asfaltos modificados y las propiedades finales alcanzadas con dicha modificación, orientados a prolongar la vida útil de los pavimentos asfálticos.

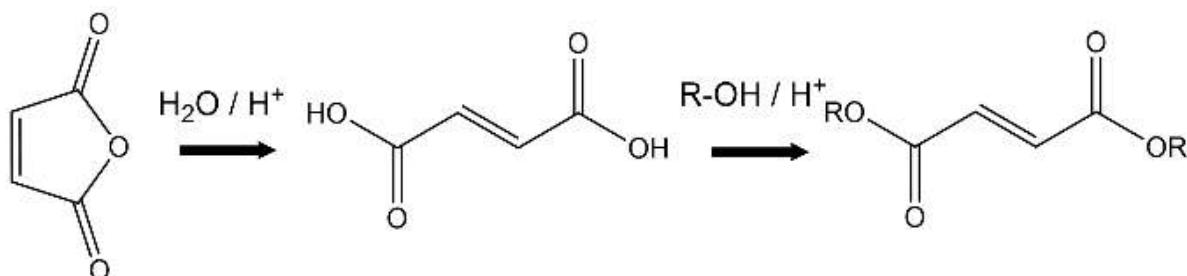
2. Síntesis y caracterización de Copolímeros

El asfalto constituye una matriz compleja compuesta por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, saturados e insaturados, cuya longitud puede alcanzar hasta 150 átomos de carbono. Su composición exacta depende de la procedencia del petróleo y suele describirse en términos de dos fracciones principales: asfaltenos y maltenos, diferenciadas por su solubilidad en solventes como hexano o heptano. Los asfaltenos corresponden a macromoléculas insolubles y de elevada masa molar, mientras que los maltenos presentan pesos moleculares inferiores y son solubles. El contenido de asfaltenos en asfaltos base suele encontrarse en un rango de 5-25 % en peso [16].

Al incorporar polímeros como modificadores de asfaltos surgen dos desafíos fundamentales: el impacto económico de su incorporación y, especialmente, su compatibilidad con la matriz asfáltica [2,17]. Esta compatibilidad no es trivial, dado que el asfalto reúne compuestos de distinta naturaleza química y afinidad, lo que dificulta la formación de un material compuesto estable y homogéneo.

En este contexto, el Grupo de Macromoléculas trabaja en el diseño y síntesis de copolímeros que permitan superar estas limitaciones. Una estrategia central ha sido la utilización de insumos locales y de bajo costo, en particular derivados de ésteres fumáricos. Estos monómeros pueden obtenerse fácilmente a partir de

anhídrido maleico (un subproducto de la industria petroquímica) mediante una secuencia de hidrólisis ácida y esterificación de Fischer (Figura 1).



Anhídrido Maleico

Monómero Fumárico

Figura 1. Esquema de reacción desde anhídrido maleico hasta el monómero fumárico. Donde R representa un grupo alquílico.

La incorporación de cadenas alquílicas provenientes de los ésteres fumáricos confiere afinidad con la fracción alifática del asfalto, mientras que la copolimerización con estireno u otros monómeros aromáticos favorece la compatibilidad con la fracción aromática [12]. Asimismo, se ha explorado la influencia del peso molecular, las arquitecturas poliméricas lineales y ramificadas, y la estabilidad térmica de los polímeros obtenidos, con el objetivo de evaluar cómo la estructura macromolecular influye en las propiedades de los asfaltos modificados.

Se desarrollaron copolímeros mediante polimerización radicalaria de dioctil fumarato (DOF) y estireno (St) tanto en masa (sin solvente) como en solución de tolueno, utilizando 2,2'-azobisisobutironitrilo (AIBN) como iniciador. Las reacciones se llevaron a cabo variando la relación molar inicial de monómeros ($f_{DOF} = 0,50$ y $0,75$) con el fin de obtener copolímeros de diferente composición y peso molecular. Las conversiones obtenidas oscilaron entre 18 y 48 %, con pesos moleculares promedio en peso (Mw) entre 45 000 y 118 000 g·mol⁻¹, y valores de polidispersidad cercanos a 2,0, evidenciando una distribución moderadamente amplia típica de la polimerización radicalaria. Los copolímeros se caracterizaron por FTIR y ¹H-RMN, confirmándose la incorporación de ambas unidades monoméricas en la cadena polimérica [12]. Durante dicho trabajo se observó que los copolímeros con mayor peso molecular y mayor contenido de monómero fumárico presentaban las mejores características como modificadores de asfaltos base. Esta experiencia permitió reconocer la necesidad de diseñar nuevos sistemas que mejoren la compatibilidad con la matriz asfáltica para optimizar las propiedades finales del material.

En esta línea, se desarrollaron copolímeros fumáricos conteniendo DOF y St en su estructura, pero incorporando divinilbenceno (DVB) en la mezcla de reacción con el fin de generar estructuras ramificadas (Figura 2).

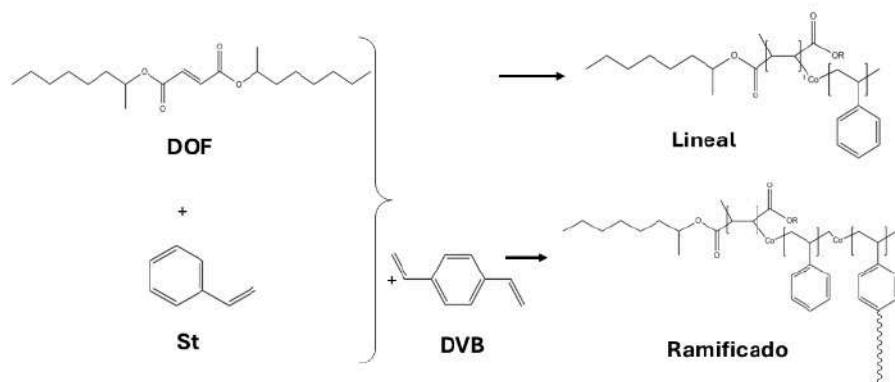


Figura 2: Estructura lineal y ramificada de copolímeros fumáricos.

Con el fin de evidenciar las diferencias estructurales entre el polímero lineal y el ramificado se realizaron análisis térmicos mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y termogravimetría (TGA). Estos estudios permitieron analizar las modificaciones estructurales y evaluar su estabilidad térmica, condición indispensable para su uso en modificación de asfaltos, dado que el material debe ser estable al menos hasta 150 °C, temperatura típica del proceso de mezclado [14].

Se observó que ambas muestras presentaron una única temperatura de transición vítrea (T_g), lo que indica una distribución homogénea de comonómeros, esperable en copolímeros estadísticos obtenidos por polimerización radicalaria. Los valores de T_g determinados para los copolímeros lineal y ramificado fueron de 18,6 °C y 3,9 °C, respectivamente, coherentes con los de los homopolímeros puros, poliestireno y poli(dióctil fumarato), 100 °C y -14 °C, respectivamente. Las diferencias observadas en los valores de T_g se atribuyen al aumento del volumen libre asociado a las ramificaciones introducidas por el DVB.

La estabilidad térmica se evaluó mediante análisis termogravimétrico (TGA) en atmósfera de nitrógeno. Ambos copolímeros se descompusieron en dos etapas, comportamiento similar al reportado para otros copolímeros fumáricos [13]. La primera etapa corresponde a la pérdida del grupo lateral por ruptura del grupo pendiente; en este caso, el copolímero ramificado mostró una temperatura máxima de descomposición ligeramente superior, atribuible tanto a la pérdida del grupo dióctilo como a la ruptura de las ramificaciones generadas durante su síntesis. Finalmente, la mayor pérdida de masa en la segunda etapa se asocia a la ruptura de la cadena principal.

Los resultados obtenidos demuestran que los copolímeros sintetizados presentan alta estabilidad térmica, lo que sugiere su aptitud para ser empleados en procesos de modificación de asfaltos a temperaturas de hasta 200 °C sin experimentar degradación o descomposición significativa.

3. Modificación de asfaltos

Generalmente, se adiciona entre un 3% y un 7% en peso de polímero al asfalto base para obtener una modificación efectiva de sus propiedades reológicas y de desempeño, asegurando al mismo tiempo una buena procesabilidad y compatibilidad del sistema. Aunque el costo inicial puede incrementarse con la incorporación de polímeros, el pavimento modificado resiste mejor el tráfico, la variabilidad térmica y otros factores de deterioro, lo que permite ahorrar entre un 4,5% y un 15,5% en un período de 30–40 años en comparación con asfaltos convencionales [18]. En definitiva, la modificación polimérica constituye una inversión que, aun implicando un mayor gasto inicial, se justifica por la mejora en el desempeño integral y la posterior disminución de los costos operativos y sociales. La superioridad en las propiedades de los asfaltos modificados con polímeros (PMA), respecto a los asfaltos convencionales, es consecuencia no solo de la composición y naturaleza del polímero incorporado, sino también de las condiciones de trabajo durante la obtención de la mezcla [19]. Durante el proceso de mezclado, el material es sometido a altas temperaturas y esfuerzos de corte durante tiempos prolongados, lo que produce diversos cambios estructurales y químicos que afectan la compatibilidad de sus componentes y la estabilidad del producto final [20].

Se ha estudiado el comportamiento de mezclas asfalto/SBS (copolímero estireno-butadieno-estireno), incorporando un 5% de polímero y variando el tiempo de mezclado y la velocidad de cizalla, con el objetivo de analizar sus efectos sobre las propiedades morfológicas, físicas y reológicas [11]. Se observó que el aumento del tiempo y de la velocidad de cizalla favorece la dispersión del polímero en la matriz asfáltica, dando lugar a mezclas más homogéneas y con mayor viscosidad. Sin embargo, cuando estos parámetros se incrementan en exceso, se produce la degradación del copolímero SBS por ruptura de cadenas, lo que reduce la elasticidad y el efecto modificador deseado. Con el objetivo de profundizar en los efectos térmicos sobre la degradación termooxidativa de los PMA, se han analizado, mediante técnicas viscosimétricas, espectroscópicas (FTIR) y de cromatografía de exclusión molecular (GPC), muestras sometidas a diferentes procesos de envejecimiento [20]. Asimismo, se ha estudiado el envejecimiento de los PMA mediante Resonancia Magnética Nuclear (RMN), con el fin de conocer los cambios estructurales y las modificaciones que se producen durante este proceso, y proponer estrategias que permitan evitarlos o retardarlos. Se encontró que los procesos de envejecimiento son consecuencia de la fragmentación radicalaria de la

macromolécula, como resultado de su degradación y posterior entrecruzamiento o adición radical a algunos de los componentes del asfalto. Las especies radicalarias formadas durante este proceso originan compuestos más polares, que contribuyen a incrementar la fracción de asfaltenos presentes en la mezcla (fracción extraída con n-heptano), como se evidenció mediante GPC (Figura 3). En la Figura 3A se representan los perfiles cromatográficos de GPC correspondientes a un asfalto base y su componente asfalteno con el fin de identificar dicha fracción en una muestra de asfalto convencional. Mientras que en la Figura 3B se muestran los perfiles del mismo asfalto modificado con un copolímero SBS antes y después del proceso de envejecimiento donde puede observarse el incremento en el peso molecular de la fracción de asfaltenos luego de ser sometido a un envejecimiento por presión PAV (pressure ageing vessel).

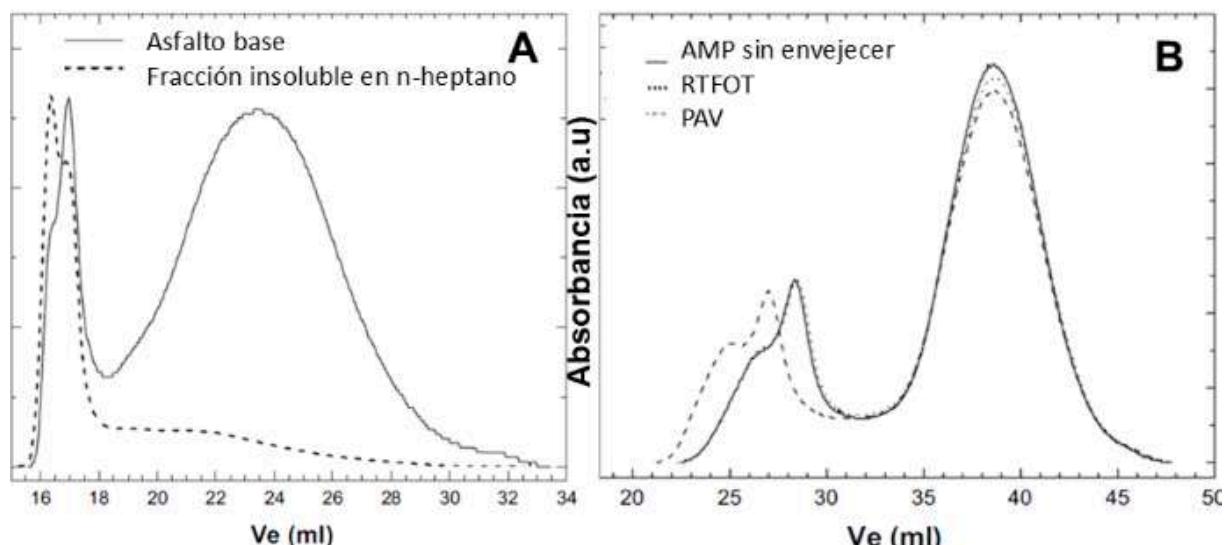


Figura 3: A. Perfiles cromatográficos del asfalto base y su fracción de asfaltenos. B. Perfiles cromatográficos del AMP antes y después del envejecimiento, donde RTFOT (rolling thin film oven test) y PAV (pressure ageing vessel) son las designaciones de los métodos utilizados para realizar el envejecimiento de la muestra.

En términos generales, el estudio de los AMP requiere una caracterización integral que abarque sus propiedades estructurales, térmicas, morfológicas y reológicas, con el fin de comprender su comportamiento durante el almacenamiento, el procesado y el servicio. En primer lugar, los AMP se evalúan en cuanto a su estabilidad al almacenamiento y compatibilidad entre el asfalto y el polímero, ya que la separación de fases o una dispersión inadecuada pueden afectar significativamente el desempeño del material. Para ello, se aplican métodos normalizados (como el ensayo de estabilidad según IRAM 6596) junto con técnicas de microscopía de fluorescencia, que permiten visualizar la morfología y homogeneidad de la fase polimérica dentro de la matriz asfáltica, y calorimetría diferencial de barrido (DSC), empleada para detectar transiciones térmicas e interacciones entre los componentes. Por otra parte, las propiedades reológicas se determinan generalmente mediante viscosimetría rotacional o reometría dinámica, a distintas temperaturas representativas de las condiciones de procesado y servicio (por lo general entre 100 y 170 °C). Estos ensayos proporcionan información sobre la fluidez, elasticidad y comportamiento viscoelástico del material, fundamentales para optimizar su desempeño en mezclas asfálticas y pavimentos. Además, los ensayos convencionales de punto de ablandamiento [21] y penetración [22] continúan siendo herramientas necesarias para evaluar la consistencia y la sensibilidad térmica del ligante modificado.

Tomás Gómez Gatti analizó en su trabajo final de grado la incorporación de un 5 % de copolímeros lineales o ramificados a base de fumarato de dióctilo (DOF) y estireno (St) a un asfalto base de origen nacional [14]. El tiempo de mezclado requerido fue determinado por microscopía de fluorescencia, donde se observa al copolímero como una fracción amarilla brillante hinchada en una fase oscura correspondiente al asfalto (Figura 4).

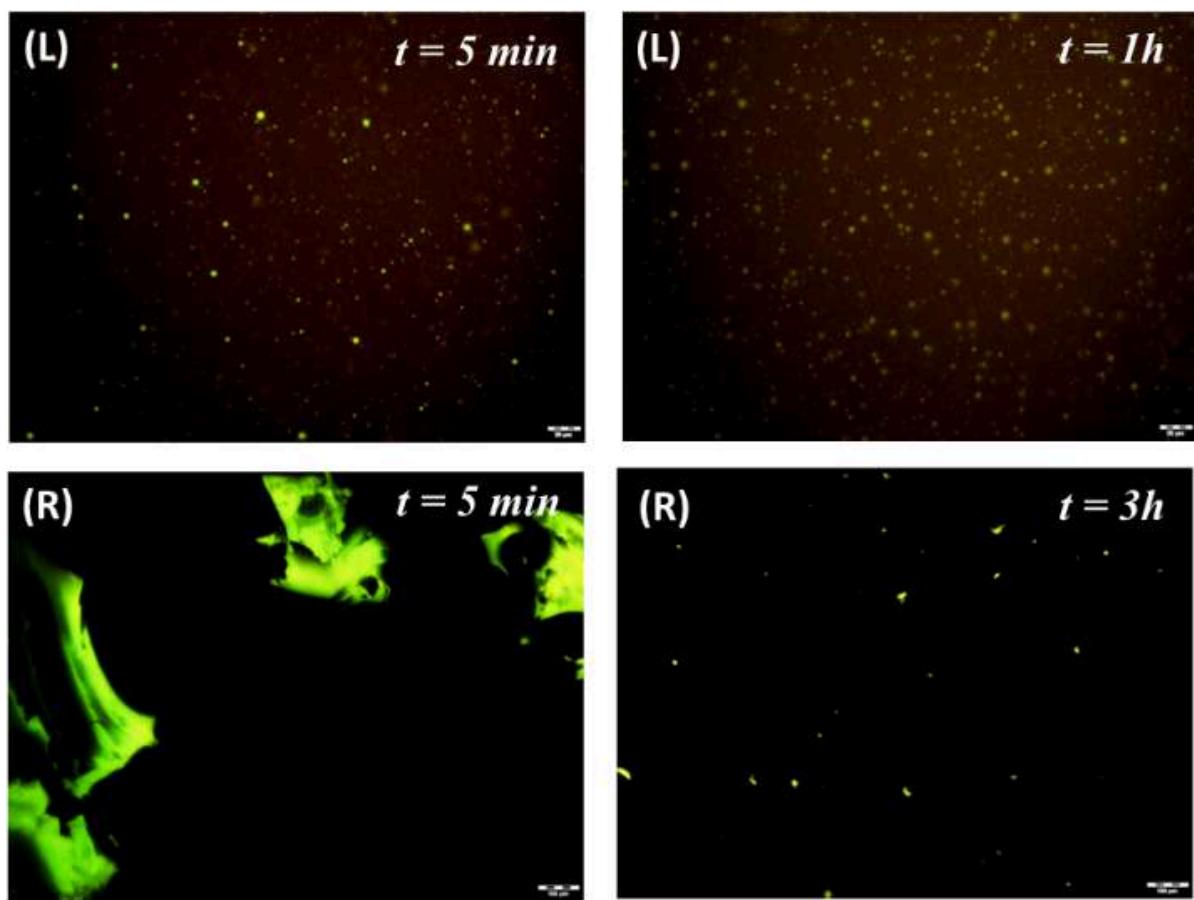


Figura 4: Micrografías de fluorescencia de los asfaltos modificados con polímero lineal (**L**) o ramificado (**R**). Condiciones de mezclado: 5800 rpm a 155 °C. Los tiempos de mezclado se indican en cada imagen. La barra de escala corresponde a 20 µm para las imágenes de la izquierda y a 100 µm para las de la derecha.

Las observaciones por microscopía de fluorescencia mostraron que el copolímero lineal se dispersa inicialmente de forma heterogénea en el betún, pero tras una hora de mezclado se logra una distribución más uniforme, con gotas más pequeñas y buena compatibilización entre fases debido al hinchamiento y solubilización parcial del polímero en la matriz asfáltica. En cambio, el copolímero ramificado formó grandes agregados y una dispersión menos homogénea durante los primeros minutos, atribuible a su menor capacidad de hinchamiento y solubilidad. No obstante, al aumentar el tiempo de mezclado se redujo el tamaño de las gotas y mejoró la homogeneidad general, alcanzándose finalmente una mejor compatibilización del sistema. Los ensayos estandarizados permitieron evaluar las propiedades físicas del asfalto base y de los asfaltos modificados con ambos copolímeros. Los resultados mostraron que la incorporación de polímeros aumentó el punto de ablandamiento y la recuperación elástica, efecto más pronunciado en el copolímero ramificado, lo que indica una mezcla más rígida y menos susceptible a la temperatura. Este comportamiento se atribuye al hinchamiento del polímero dentro de la matriz asfáltica, que genera una estructura más cohesionada y resistente a la deformación. A su vez, la viscosidad a 135 °C aumentó progresivamente con el tiempo de mezclado, en concordancia con la mejora en la compatibilización del copolímero ramificado con los componentes del asfalto, lo que refleja una mayor estabilidad y desempeño reológico del material modificado.

4. Estrategias híbridas de modificación: polímeros, biocompuestos y nanoarcillas

En los últimos años, otras estrategias de modificación de asfaltos han explorado el uso de materiales de base biológica y naturales como alternativa sostenible a los modificadores poliméricos convencionales. Las sustancias de base biológica (BBS) son productos derivados del procesamiento de residuos urbanos y agrícolas, compuestos por macromoléculas orgánicas altamente ramificadas, con estructura similar a la lignina. Estos biocompuestos, ricos en grupos funcionales oxigenados, presentan una alta capacidad de interacción con las fracciones polares del asfalto, lo que los convierte en biomodificadores prometedores para mejorar el desempeño reológico y la durabilidad de los pavimentos. Su utilización responde al creciente interés en desarrollar tecnologías más ecológicas y económicamente viables, que reduzcan la dependencia de recursos fósiles y aporten valor agregado a los residuos orgánicos.

En este contexto, Fracassi y colaboradores [23] estudiaron la modificación de un asfalto base con un 5 % de un biomodificador de base biológica (BBS) obtenido a partir de residuos urbanos compostados. Además, se evaluó el efecto de combinar este biocompuesto con un copolímero fumárico sintético (PFS), en diferentes proporciones (BBS/50PFS y BBS/100PFS), con el fin de analizar la influencia del polímero sobre las propiedades físico-químicas del asfalto. Las mezclas se prepararon a 175 °C en un mezclador de alta velocidad y se caracterizaron mediante ensayos estandarizados de rutina, complementados con análisis reológicos antes y después del envejecimiento acelerado (RTFOT). Los resultados mostraron que la incorporación del BBS produjo un incremento en la rigidez y en la resistencia térmica del material, evidenciado por una disminución en la penetración y un aumento del punto de ablandamiento y de la viscosidad. La adición del copolímero PFS, por su parte, reguló el endurecimiento excesivo producido por el biocompuesto, otorgando al sistema un mejor equilibrio entre elasticidad y rigidez.

Por otro lado, en un trabajo posterior [24], se estudió la combinación de polímeros naturales con materiales inorgánicos, en particular bentonita de origen nacional, para reforzar la estabilidad de los asfaltos modificados. En este caso, el asfalto base se modificó con 5 % de biomodificador lignocelulósico (BBS) y distintas proporciones de bentonita (10 y 20 % en relación con el biocompuesto), procesadas a 150 °C durante 2 h. Los asfaltos obtenidos fueron caracterizados por FTIR-ATR y mediante los ensayos normalizados de penetración [22], punto de ablandamiento [21], viscosidad [25] y recuperación elástica torsional [26]. Los resultados demostraron que tanto la incorporación del biomodificador como de la arcilla reducen la penetración e incrementan el punto de ablandamiento y la viscosidad, lo que indica una mayor rigidez y menor susceptibilidad térmica.

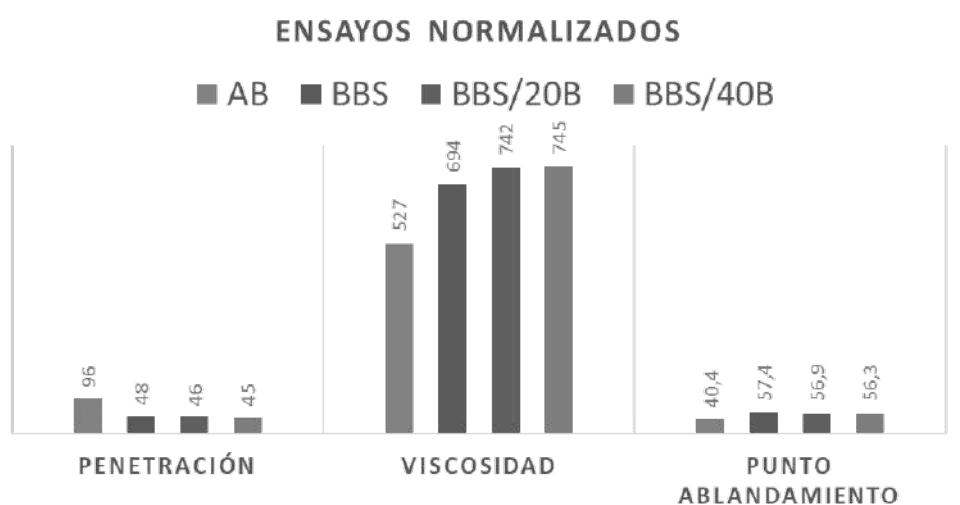


Figura 5:
Penetración, viscosidad a 135 °C y punto de ablandamiento, del asfalto base (AB), Asfalto modificado con la sustancia de base biológica (BBS) y asfalto modificado con BBS y bentonita al 20% (BBS/20B) o al 40% (BBS/40B).

Más recientemente, Botto Iribarne [15] y colaboradores evaluaron la incorporación de nanomateriales de arcilla (bentonita natural y organobentonita modificada con cloruro de benzalconio) junto con un copolímero de fumarato de dioctilo y benzoato de vinilo (DOF-co-VB) diseñado específicamente para compatibilizar con asfaltos argentinos. Este copolímero, con 54 % de fracción alquilica y 46 % de fracción aromática, fue caracterizado por técnicas espectroscópicas y térmicas y GPC, presentando una alta estabilidad térmica ($TID \approx 240$ °C) y elevado peso molecular ($Mw \approx 4 \times 10^6$ g/mol). Las mezclas asfálticas modificadas con el copolímero (MA-P), con bentonita natural (MA-P-NB) y con organobentonita (MA-P-MB) fueron analizadas mediante microscopía de fluorescencia, ensayos reológicos y determinaciones de penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y recuperación elástica.

Las micrografías evidenciaron que la organobentonita mejoró la dispersión del polímero en la matriz bituminosa, generando partículas más uniformes que las obtenidas con bentonita natural. Los ensayos físicos mostraron una reducción de la penetración (32–40 % respecto al asfalto base), un aumento del punto de ablandamiento y una mayor viscosidad, lo que se traduce en una mejora en la resistencia a la deformación permanente y una menor susceptibilidad térmica. Además, el análisis del índice de penetración (PI) y la energía de activación del flujo (Ea) reveló que la incorporación de arcillas, en particular la organomodificada, incrementa la rigidez del sistema y la energía necesaria para su flujo, sin comprometer su procesabilidad, manteniendo la estabilidad térmica por debajo de los 200 °C.

En conjunto, estos trabajos demuestran que la sinergia entre modificadores poliméricos, materiales naturales y nanoarcillas constituye una vía promisoria para el desarrollo de asfaltos modificados sostenibles, térmicamente estables y con mejor desempeño reológico y mecánico.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que los copolímeros fumáricos constituyen modificadores eficaces del ligante asfáltico, capaces de mejorar sus propiedades térmicas, reológicas y mecánicas. La arquitectura macromolecular desempeña un papel determinante en la compatibilidad entre el polímero y el asfalto. Los copolímeros ramificados presentaron una dispersión más homogénea y una mayor estabilidad térmica que los lineales, lo que se tradujo en mezclas más resistentes a la deformación.

El análisis mediante microscopía de fluorescencia, DSC, TGA y ensayos reológicos permitió correlacionar la estructura del polímero con el desempeño del material modificado, evidenciando aumentos en el punto de ablandamiento, la recuperación elástica y la viscosidad.

Por otra parte, la incorporación de rellenos biobasados y/o nanoarcillas demostró ser una estrategia complementaria efectiva para optimizar la interacción entre las fases orgánica e inorgánica, potenciando la estabilidad y durabilidad del sistema.

En conjunto, estos resultados demuestran el potencial de los copolímeros fumáricos y de las formulaciones híbridas desarrolladas por el Grupo de Macromoléculas como alternativas sostenibles para la obtención de asfaltos modificados de alto desempeño y larga vida útil.

Agradecimientos

Las autoras de este trabajo agradecen a las instituciones que hicieron posible las investigaciones que lo sustentan: la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Facultad de Ciencias Exactas y la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

Referencias

- [1] Speight, J. G. (2016). Asphalt Technology. In Asphalt Materials Science and Technology (pp. 361–408). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800273-5.00009-x>
- [2] Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72–112. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>
- [3] Mostafiz Emtiaz, Md Nafis Imtiyaz, Mishuk Majumder, Ipshit Ibne Idris, Roni Mazumder, Md Mafuzur Rahaman. "A Comprehensive Literature Review on Polymer-Modified Asphalt Binder". *CivilEng*, 2023, Vol. 4(3), 901-932
- [4] Kok, B. V.; Yalcin, B. F.; Yilmaz, M.; E. Yalcin. "Performance evaluation of bitumen modified with styrene-isoprene-styrene and crumb rubber compound". *Construction and Building Materials* 2022, Vol. 344:128304.
- [5] Mohammadirodbari, M., Tavakoli, A., Razavi Aghjeh, M. K., & Rahi, M. (2016). Effect of nanoclay on the morphology of polyethylene modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 116, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.098>
- [6] Yang Q, Lin J, Wang X, Wang D, Xie N, Shi X. A review of polymer-modified asphalt binder: modification mechanisms and mechanical properties. *Cleaner Mater.* 2024;12:100255.
- [7] Sengoz B, Isikyakar G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Constr Build Mater* 2007;22:1897–905.
- [8] Lu X, Isacsson U. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polym Test* 2001;20:77–86.
- [9] Jasso, M. et al. Mechanism and Development of Thermo-Rheological Properties of Asphalts Modified by Reactive Polymer Systems. *Materials* 16, 6646 (2023).
- [10] González Aguirre, P. et al. Study of the morphology and rheological behavior of polymer-modified asphalt blends. *Polymer Engineering & Science* 59, 2349–2360 (2019).
- [11] Larsen DO, Alessandrini JL, Bosch A, Cortizo MS. Micro-structural and rheological characteristics of SBS-asphalt blends during their manufacturing. *Construct Build Mater.* 2009;23:2769-2774.
- [12] TG.Oberti, D Larsen, MS.Cortizo Synthesis and Properties of Fumaric Copolymers as Potential Bitumen Modifiers" *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. Vol. 58, Issue 4, (2019), pp: 443-453.
- [13] Tamara G. Oberti, M. Susana Cortizo Homo- and copolymers based on dialkyl fumarates: A review on radical polymerization, properties, current and future applications *European Polymer Journal-* 2023, 198, 112389 <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112389>
- [14] Gatti TG, Bravi Costantino ML, Fracassi L, et al. Macromolecular architecture effect of diethyl fumarate-co-styrene on the properties of modified asphalts. *Polym Eng Sci*. 2024;64:4961-4972.
- [15] Juan Botto Iribarne, Francisca Aparicio, Vera Alvarez, Romina Ollier, Diego Larsen, Tamara G. Oberti "Evaluation of fumaric copolymer/clays composites as base asphalt modifiers." *Polymer Eng and Sci.* Publicado on line- <https://doi.org/10.1002/pen.27142>
- [16] Honarmand, M., Tanzadeh, J., & Beiranvand, M. (2019). Bitumen and its modifier for use in pavement engineering. En S. Hemedha (Ed.), *Sustainable Construction and Building Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82489>
- [17] Jin, J., Tan, Y., Liu, R., Lin, F., Wu, Y., Qian, G., Wei, H., & Zheng, J. (2018). Structure characteristics of organic bentonite and the effects on rheological and aging properties of asphalt. *Powder Technology*, 329, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.047>
- [18] M. Buncher and C. Rosenberger, "Understanding the true economics of using polymer modified asphalt through life cycle cost analysis," *Asphalt*, vol. 20, no. 2, pp. 28-30, 2005.
- [19] G. Polacco, A. Muscente, D. Biondi, and S. Santini, "Title of the paper," *Eur. Polym. J.*, vol. 42, pp. 1113–1121, 2006.
- [20] M. S. Cortizo, D. O. Larsen, H. Bianchetto, and J. L. Alessandrini, "Title of the paper," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 86, pp. 275–282, 2004.
- [21] IRAM, Asfaltos – Determinación del punto de ablandamiento (método del anillo y la bola), Norma IRAM 6841, 2010.
- [22] IRAM, Asfaltos – Determinación del grado de penetración, Norma IRAM 6576, 2009"

- [23] L. Fracassi, F. Aparicio, M. Uguet, J. Botto Iribarne, D. Larsen y T. Oberti, "Biocompuesto como modificador de asfalto: caracterización reológica," en XIII Simposio Argentino de Polímeros (SAP 2019), Ciudad de Buenos Aires, Argentina, 9-11 de octubre de 2019, presentación oral.
- [24] L. Fracassi, D. Larsen, R. Ollier, V. Álvarez, F. Aparicio y T. Oberti, "Modificación de asfaltos con polímeros naturales y arcillas como mejoradores de su vida útil," en
- 1er Workshop de Polímeros y Nanomateriales para la Industria Energética, La Plata, Argentina, YPF Tecnología, 19-23 de septiembre de 2022.
- [25] IRAM, Asfaltos — Determinación de la viscosidad aparente mediante el viscosímetro rotacional, Norma IRAM 6837, 2012.
- [26] IRAM, Asfaltos — Determinación de la recuperación elástica por torsión, Norma IRAM 6830, 2011

AUTORES

Maria Leticia Bravi Costantino

60 y 120, La Plata, Argentina.

mbravicostantino@med.unlp.edu.ar

https://scholar.google.com/citations?user=-p5BMq_oAAAAJ&hl=es

Doctora en Ciencias Exactas (UNLP, CONICET) con experiencia en síntesis de polímeros, cultivos celulares y desarrollo de materiales innovadores para aplicaciones biomédicas y tecnológicas. Posdoctorado en CIHIDECAR (UBA). Actualmente participa en proyectos de investigación y extensión en el área de macromoléculas.

Tamara Oberti

Diag.113 y 64, La Plata, Argentina.

toberti@inifta.unlp.edu.ar

https://scholar.google.com/citations?user=5wsEs_sAAAAJ&hl=es

Doctora en Ciencias Exactas. Investigadora del CONICET y Profesora en la Facultad de Ciencias Exactas-UNLP. Responsable del Grupo de Macromoléculas del INIFTA (CONICET-UNLP). Amplia experiencia, en síntesis, caracterización y aplicaciones de polímeros sintéticos.

Estructura y Agregación de Asfaltenos de Petróleos Argentinos

Axel D. Toledo, Mauricio F. Erben y Mariana Gerones

Resumen

La precipitación y deposición de asfaltenos -la fracción más pesada del crudo- constituye un desafío central para la industria petrolera, afectando las diversas etapas de producción, transporte y procesamiento. A pesar de los numerosos esfuerzos y recursos invertidos en comprender, predecir y mitigar la deposición de asfaltenos, este problema sigue sin resolverse por completo. Los costos derivados de este fenómeno son considerablemente altos y muchas de las soluciones comerciales se basan en metodologías de ensayo y error. Para enfrentar eficazmente los problemas derivados de la precipitación de asfaltenos, es esencial un compromiso activo en esta área de estudio. En este capítulo se expone el enfoque de nuestra línea de trabajo, que busca profundizar en la comprensión de los mecanismos moleculares responsables de la estabilidad de los asfaltenos y su control, basada en la integración de metodologías de caracterización estructural avanzada, estudios de agregación en solución y evaluación de inhibidores.

Palabras clave: Asfaltenos; Agregados; Estructura; Inhibidores.

Abstract

The precipitation and deposition of asphaltenes—the heaviest fraction of crude oil—pose a major challenge for the petroleum industry, impacting various stages of production, transportation, and processing. Despite the considerable efforts and resources dedicated to understanding, predicting, and mitigating asphaltene deposition, this issue remains unresolved. The costs associated with this phenomenon are significantly high, and many commercial solutions rely on trial-and-error approaches. Effectively addressing the problems caused by asphaltene precipitation requires active engagement in this area of research. This chapter presents the approach of our research line, aimed at deepening the understanding of the molecular mechanisms responsible for asphaltene stability and its control, based on the integration of advanced structural characterization methodologies, aggregation studies in solution, and inhibitor evaluation.

Keywords: Asphaltenes; Aggregates; Structures; Inhibitors.

1. Introducción

Los asfaltenos son una mezcla polidispersa de la fracción más pesada y más polarizable del petróleo.¹ Estos, no pueden ser definidos como un sólo compuesto químico, sino como una familia de compuestos que presentan un comportamiento global típico y para los cuales se tiene normalmente una definición operacional en base a su solubilidad.^{2,3} Así, actualmente los asfaltenos son catalogados como la fracción orgánica más pesada y compleja del petróleo, soluble en tolueno (o benceno) e insoluble en un exceso de *n*-alcano (pentano o heptano).^{4,5} Dicha definición cubre un rango amplio de compuestos que difieren en estructura y propiedades.

Los asfaltenos han recibido una atención especial en las últimas décadas debido a los múltiples problemas que causan en la producción, transporte, refinación y almacenamiento del petróleo, siendo responsables de la obstrucción de pozos, taponamiento de oleoductos y la desactivación de los catalizadores utilizados durante el proceso de refinación.^{6,7}

Debido al impacto negativo de los asfaltenos en la industria petrolera, es necesario profundizar en los aspectos fundamentales de esta compleja fracción. Tal como señaló Mullins, es fundamental conocer la estructura química de los asfaltenos para poder predecir su comportamiento en sistemas reales.³ Por ello, el estado del arte en esta área se centra en la identificación de los compuestos que conforman la fracción de asfaltenos, por ejemplo, utilizando técnicas de espectrometrías de masas de alta resolución (petroleómica), junto con el análisis de su estructura molecular. A pesar de los numerosos estudios realizados en este campo, la naturaleza química y estructura de los compuestos que integran la fracción de asfaltenos sigue siendo uno de los temas más debatidos en esta disciplina.

Es prácticamente incuestionable que los asfaltenos se componen de mezclas de hidrocarburos con grupos policíclicos aromáticos (PAH: Polycyclic aromatic hydrocarbon), sustituidos con cadenas alquílicas y heteroátomos tales como O, S y N y trazas de metales principalmente V y Ni. Por otro lado, el peso molecular de los asfaltenos continúa siendo objeto de debate, mostrando valores que dependen de la técnica empleada y que difieren en uno o dos órdenes de magnitud. Ciertos estudios basados en técnicas de difusión y de espectrometría de masas de alta resolución han concluido que los asfaltenos poseen una masa molar promedio de aproximadamente 750 Da, variando entre 500 y 1200 Da.^{2,6}

Por otra parte, aún existe controversia con relación a la estructura de los asfaltenos. Por un lado, se ha propuesto el llamado modelo de isla (o de Yen-Mullins), que describe a la estructura de asfaltenos como un núcleo de anillos aromáticos fusionados de entre 7-10 anillos, sustituido por cadenas nafténicas y alquílicas conteniendo heteroátomos.⁸⁻¹⁰ Aunque existe un consenso en que este modelo es el predominante, la arquitectura tipo archipiélago no puede ser descartada.^{11,12} En esta última, la estructura de los asfaltenos está conformada por anillos poliaromáticos pequeños (entre 2-3 anillos) unidos entre sí por largas cadenas nafténicas y alquílicas. Incluso, estudios recientes evidencian la presencia de ambos modelos en los asfaltenos de petróleo.¹³

Asimismo, se ha reconocido que una de las principales dificultades en el estudio de la estructura de los asfaltenos se puede atribuir a su tendencia a formar agregados.⁴ Según el modelo de Yen-Mullins, los asfaltenos en el crudo y aun en soluciones de tolueno, tienden a formar nanoagregados estabilizados mediante interacciones π-π entre sus núcleos poliaromáticos, que luego pueden unirse para formar clústeres que al alcanzar un tamaño lo suficientemente grande podrían precipitar. Este modelo cuestiona el rol estabilizante de la otra fracción característica del petróleo, las resinas.¹⁴ Solo las de mayor peso molecular participarían en la agregación constituyendo aproximadamente solo un 15% de la fracción en masa de los agregados. Las resinas en esas concentraciones no pueden ser consideradas como un surfactante clásico. Por lo tanto, hoy en día no está claro aún cuál es el papel que cumplen las resinas como estabilizantes de los agregados de asfaltenos en solución.¹⁵

Por otra parte, el uso de productos químicos para mitigar la deposición de asfaltenos se ha consolidado como una práctica común durante la última década. Sin embargo, la limitada comprensión de los mecanismos que regulan la inhibición ha llevado, en muchos casos, a la selección de compuestos poco efectivos, que incluso pueden intensificar el problema. Esta línea de investigación busca no solo contribuir al

entendimiento fundamental del proceso de precipitación de asfaltenos, sino también establecer fundamentos sólidos para el desarrollo de estrategias de mitigación más eficientes, adaptadas a las condiciones de la producción petrolera nacional.

Este capítulo proporciona una visión general de la metodología empleada en nuestro laboratorio, orientada a la caracterización estructural de asfaltenos de yacimientos argentinos. Se detalla la estrategia para estudiar e intentar comprender la composición a nivel molecular de la fracción de asfaltenos, avanzando hacia la formación y estabilidad de sus nanoagregados. Asimismo, se presentan resultados que permiten elucidar el rol de las resinas en estos sistemas. Finalmente, se exponen los hallazgos sobre la interacción molecular entre los asfaltenos y diversos inhibidores, con el fin de comprender su efectividad para prevenir la precipitación.

2. Determinación de la Estructura Química de Asfaltenos.

2.1 Métodos experimentales

2.1.1 Separación de los Asfaltenos

Como resultado de la naturaleza operativa de su definición, una amplia variedad de compuestos presentes en el petróleo es clasificada como asfaltenos. Por esta razón, la cantidad y composición de asfaltenos extraídos a partir del crudo, depende en gran medida del tipo de solvente utilizado y de las condiciones bajo las cuales se realiza la separación (tiempo de contacto con el solvente, temperatura, proporción entre crudo y solvente, entre otros). La ausencia de estandarización en los procesos de separación, cuantificación y caracterización de estos compuestos dificulta aún más la interpretación de los resultados, sobre todo cuando se intentan comparar datos obtenidos por diferentes laboratorios o grupos de investigación. La falta de uniformidad complica la estandarización de tratamientos o el desarrollo de modelos predictivos.

El diagrama del análisis SARA utilizado en nuestra línea de trabajo, en el cual el petróleo muerto (sin componentes gaseosos) puede ser separado en base a la diferencia de solubilidad, polaridad y peso molecular en las fracciones: Saturados, Aromáticos, Resinas I y II y Asfaltenos, se muestra en la Figura 1.

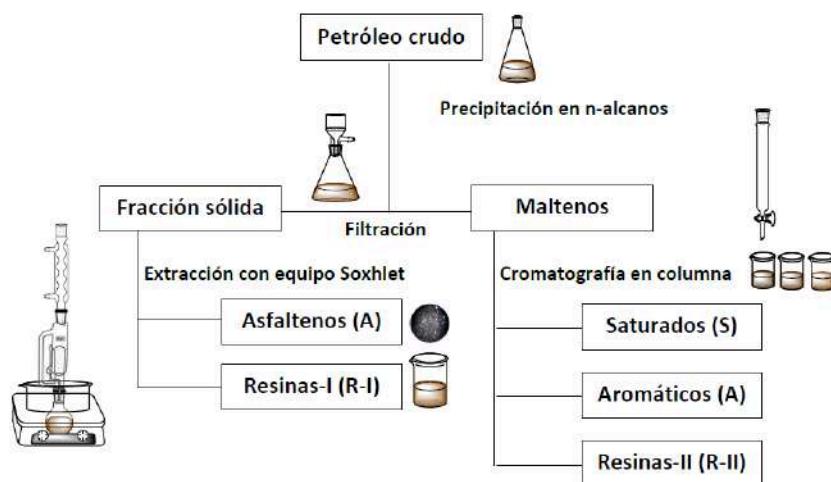


Figura 1. Diagrama de flujo del análisis SARA.

Los asfaltenos se aíslan utilizando una adaptación del método estándar IP-143 mientras que los componentes restantes se separan empleando una cromatografía en columna.^{16, 17} En términos generales, los asfaltenos se aíslan del crudo mediante la adición de un *n*-alcano en una proporción de 40 ml por cada gramo de muestra, seguido de un periodo de reposo de 16 horas. Transcurrido ese tiempo, el sólido precipitado se separa del resto de los maltenos mediante filtración al vacío.

Dado que una parte de las resinas (Resinas I) coprecipita junto con los asfaltenos, es necesario llevar a cabo un proceso de lavado riguroso del sólido para lograr una separación adecuada de ambas fracciones.

Aunque no existe un protocolo estandarizado para la purificación de los asfaltenos respecto de las resinas que coprecipitan con ellos, este paso es esencial para obtener muestras representativas y confiables. La presencia de resinas sin separar puede alterar significativamente la caracterización de los asfaltenos, afectando tanto los resultados estructurales como las propiedades fisicoquímicas reportadas. En nuestro laboratorio, la purificación de asfaltenos se realiza mediante el método de extracción Soxhlet, utilizando *n*-alcano como solvente. El proceso se continúa hasta que el solvente recuperado se torna incoloro, lo que garantiza un lavado exhaustivo del precipitado.

Tras el lavado, hemos observado que, a temperatura ambiente, las Resinas I presentan un aspecto sólido, gomoso, de color marrón oscuro y brillante, mientras que los asfaltenos se manifiestan como sólidos negros, brillantes y quebradizos. Estas diferencias en el aspecto físico confirman la necesidad de分离 ambas fracciones de manera efectiva.

Es conocido que la cantidad de asfalteno precipitado se incrementa cuando disminuye el número de carbonos del agente precipitante, y también que a partir del *n*-heptano, la cantidad precipitada presenta muy poca diferencia con respecto a aquella producida por los alcanos más pesados.¹⁸ Por eso, el *n*-heptano es el estándar internacional en muchos métodos de análisis de asfaltenos, ya que representa un buen equilibrio entre efectividad y reproducibilidad.

Por otro lado, en nuestra línea de trabajo, la separación de los maltenos en saturados, aromáticos y resinas tipo II se lleva a cabo siguiendo una versión modificada del método ASTM D4124.¹⁹ En términos generales, la fracción soluble en *n*-heptano se concentra mediante la eliminación del solvente por evaporación, y posteriormente se procede a la separación de las tres fracciones mediante cromatografía en columna, utilizando gel de sílice como fase estacionaria. Esta separación se logra a través de una elución secuencial con distintos disolventes orgánicos.

2.1.2 Técnicas Experimentales

Las técnicas analíticas y espectroscópicas suelen proporcionar las características promedio de la fracción de asfaltenos, la cual está compuesta por una distribución de moléculas muy complejas. Estas moléculas presentan diferencias significativas en sus propiedades químicas, como el peso molecular, la aromaticidad, el grado de sustitución alquílica, los grupos funcionales, la presencia de heteroátomos y el contenido de metales. Cada técnica resulta útil para obtener información sobre un aspecto específico de los asfaltenos, pero es necesario integrar los resultados de varias técnicas para poder extraer conclusiones más generales. En nuestra línea de investigación, las muestras son caracterizados por análisis elemental, Espectrometría de Masas ESI FT-Orbitrap, Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopía Raman, Espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Difracción de Rayos-X de polvo.

A continuación, se expone la información específica que puede obtenerse a partir de cada una de las técnicas empleadas.

2.1.2.1 Análisis Elemental

El análisis elemental, por sí solo, no ofrece información suficiente, ya que solo indica la cantidad total de elementos como carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, así como metales como vanadio y níquel presentes en la muestra, sin revelar cómo se organizan en estructuras moleculares específicas. No obstante, es posible obtener información relevante, como el grado de aromaticidad, a partir de la relación entre hidrógeno y carbono (H/C). En las muestras analizadas, se evidenció una diferencia notable entre los asfaltenos precipitados con *n*-heptano y aquellos obtenidos mediante *n*-pentano. El análisis elemental reveló que las fracciones extraídas con *n*-heptano presentan un mayor grado de aromaticidad, así como un contenido más elevado de heteroátomos, en comparación con las precipitadas con *n*-pentano. Estos resultados son consistentes con la idea de que la elección del solvente influye de manera importante en las características químicas de los asfaltenos separados del crudo.

Asimismo, fue posible emplear la relación V/Ni y el contenido de azufre como indicadores geoquímicos que vinculan la especiación del vanadio con los ambientes de depósito, facilitando así la correlación entre los crudos y sus respectivas rocas generadoras.²⁰

2.1.2.2 Espectroscopia Infrarroja

La espectroscopia infrarroja permite la identificación de los distintos grupos funcionales presentes en las muestras. A partir del análisis de los espectros FTIR se pueden calcular los siguientes parámetros estructurales promedio: la relación CH₂/CH₃ que da información de la longitud de las cadenas alifáticas, el grado de sustitución de los anillos aromáticos, el grado de condensación, la aromaticidad de los asfaltenos, y el índice de grupos carbonilos.⁵ Asimismo, el número e intensidad relativa de las bandas localizadas entre 900-700 cm⁻¹ atribuidas a las deformaciones C-H aromáticas fuera del plano nos brinda información estructural del sistema de anillos aromáticos condensados que conforman a los asfaltenos. Así, es posible clasificar a los compuestos poliaromáticos en por ejemplo *peri*-condensados, *cata*-condensados, entre otros.

2.1.2.3 Espectroscopia de Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

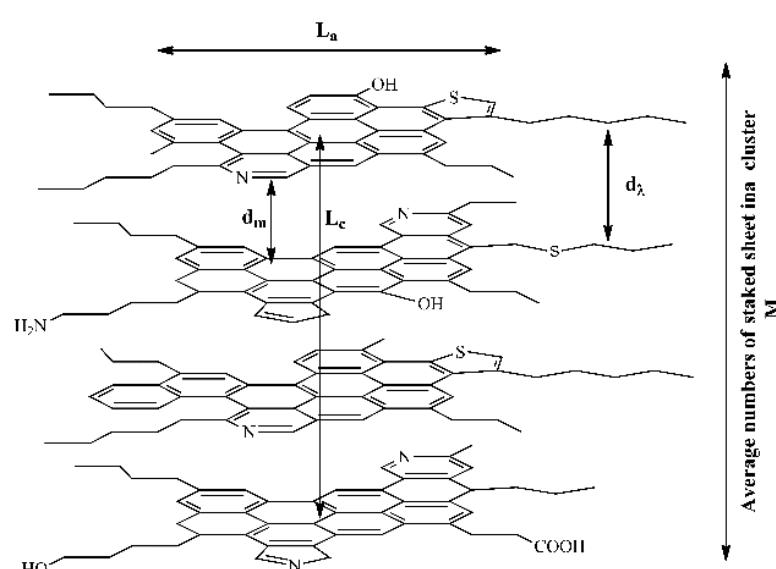
Del análisis de los espectros RMN también es posible obtener información estructural de las fracciones del petróleo a partir de diferentes parámetros promedios.²¹

A modo de ejemplo, integrando los espectros de ¹H-RMN para las muestras de asfaltenos en la región de las señales de compuestos aromáticos y en la correspondiente a alifáticos, se puede determinar los parámetros que permiten estimar el índice de aromaticidad, la longitud de cadena, el grado de sustitución de los anillos aromáticos y el grado de ramificación de las cadenas. Asimismo, mediante la espectroscopia de ¹³C-RMN, se puede obtener información directa sobre la estructura promedio del esqueleto carbonado de las moléculas presentes en mezclas de hidrocarburos. Los parámetros moleculares promedio, como la fracción de carbono aromático, el número promedio de átomos de carbono por cadena lateral alquilo y el grado medio de sustitución del carbono aromático, se pueden calcular combinando los resultados de las espectroscopias de ¹H- y ¹³C-RMN.

2.1.2.4 Difracción de Rayos-X de polvo

Los patrones de difracción de rayos X obtenidos para los asfaltenos evidencian tres picos característicos 1) la banda (002) en $2\theta \approx 25^\circ$, atribuida a estructuras tipo grafito formadas por anillos aromáticos condensados 2) la banda γ en $2\theta \approx 19^\circ$, relacionada con las fracciones alifáticas y las aromáticas no condensadas 3) la banda (10) a bajos ángulos, asociada con el ordenamiento espacial de los núcleos grafíticos dentro de los agregados de asfaltenos, cuya presencia suele ser más evidente en asfaltenos con mayor contenido aromático.²²

La estructura de los asfaltenos sólidos puede considerarse como unidades repetitivas de láminas aromáticas condensadas, estabilizadas por interacciones de apilamiento $\pi-\pi$, tal como se muestra en la Figura 2.²³



A partir del análisis de los espectros de Rayos-X de polvo es posible obtener la siguiente información estructural de los asfaltenos: la distancia entre planos aromáticos apilados (d_m), el espesor promedio de anillos apilados (L_c), la distancia entre dos cadenas saturadas (d_s), el número promedio de planos apilados ($M = d_m/L_c + 1$), el factor de aromaticidad (f_a) y el diámetro medio del plano de anillos fusionados (L_a).

Figura 2. Vista en sección transversal de la estructura de un clúster de asfaltenos con los principales parámetros cristalinos.

2.1.2.5 Espectroscopia Raman

En los espectros Raman de asfaltenos la mayor información se obtiene del análisis de la intensidad y posición de dos bandas características, ubicadas a 1367 y 1599 cm⁻¹, usualmente denominadas como bandas D1 y G.²⁴ A partir de las intensidades de estas bandas, es posible calcular el diámetro del plano de anillos aromáticos (L_a) y conociendo L_a se puede estimar el número promedio de anillos aromáticos fusionados por plano (R_a) en la estructura molecular de los asfaltenos. En nuestros estudios, se encontró que los valores de L_a y R_a son congruentes con los determinados a partir de difracción de Rayos-X de polvo.

2.1.2.6 Espectrometría de Masas ESI FT-Orbitrap

La espectrometría de masas de alta resolución se ha consolidado como una herramienta fundamental para el análisis de la composición química del petróleo. En la actualidad los analizadores de masa de resonancia de ciclotrón iónica por transformada de Fourier (FT-ICR) y Orbitrap superan a cualquier espectrómetro de masa comúnmente usado, debido a su resolución y la precisión de masa se pueden lograr de forma rutinaria, incluso para una pequeña cantidad de iones.²⁵

En nuestra línea de trabajo, empleamos un espectrómetro de masas FT-Orbitrap con ionización por electrospray (ESI) en modo positivo y negativo. Esta técnica permite obtener información sobre los pesos moleculares promedio y su distribución, las distribuciones de hidrocarburos representadas en gráficos de índice de deficiencia de hidrógenos (DBE) en función de número de átomos de carbonos, así como las clases de heteroátomos identificados para cada compuesto molecular identificado en los espectros de masas.

Con el conjunto de estos datos es posible analizar y describir la distribución de los compuestos presentes en cada fracción de asfaltenos, considerando su peso molecular, grado de aromaticidad e insaturación, longitud de las cadenas alifáticas y tipo de heteroátomos presentes.

Como se indicó previamente, cada método empleado ofrece información estructural parcial, que de manera aislada resulta insuficiente para describir adecuadamente este sistema. Para proponer una estructura promedio hipotética que representa a los asfaltenos analizados, es necesario combinar e interrelacionar los resultados derivados del análisis conjunto de diferentes técnicas.

2.1.2.7 Estudio de los heteroátomos empleando Radiación Sincrotrón.

Las fracciones de asfaltenos y resinas presentan un contenido significativamente elevado de heteroátomos —alrededor del 10% en peso—, superior al observado en los petróleos originales. Estos heteroátomos, al formar parte de grupos funcionales polares y con carga, influyen notablemente en las propiedades químicas de dichas fracciones, particularmente en su comportamiento frente a diferentes solventes.²⁶ Dado que los asfaltenos se definen justamente por su solubilidad, resulta fundamental comprender tanto la distribución como las formas químicas en que se presentan estos elementos.

Entre los heteroátomos, el azufre es el más abundante en el petróleo —ya sea en crudo o en gas natural— y tiende a concentrarse especialmente en las fracciones de asfaltenos y resinas.²⁷ Es importante destacar que los compuestos sulfurados ocasionan diversos problemas en la industria petrolera, incluyendo la corrosión de ductos y equipos de extracción y refinación, así como la desactivación de catalizadores durante el procesamiento. Además, el contenido de azufre influye considerablemente en las propiedades físicas y químicas de las distintas fracciones del crudo, por lo que el conocimiento detallado de su química resulta esencial para abordar estos desafíos.²⁸

En nuestra línea de investigación empleamos la técnica de espectroscopía de absorción de rayos X conocida como XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure), considerada una de las más adecuadas para el estudio de la especiación de elementos químicos. Esta técnica, no destructiva y de alta resolución, utiliza radiación sincrotrón y permite una alta selectividad química, lo que la hace especialmente útil para el análisis de sistemas complejos y heterogéneos.²⁹ Su aplicación permite obtener información cualitativa y cuantitativa sobre los estados de oxidación y los entornos químicos de los átomos de interés.

En nuestra línea de trabajo, se determina la composición de los grupos funcionales que contienen azufre en muestras de resinas y asfaltenos, utilizando la técnica XANES en el borde de absorción K (1s) de los heteroátomos. Este análisis se complementa con un estudio paralelo de compuestos modelo seleccionados

en función de sus diferentes entornos químicos y estados de oxidación del azufre, con el objetivo de realizar comparaciones cualitativas con las muestras reales de asfaltenos y resinas.

Para ilustrar este análisis, en la Figura 3 se presentan los espectros XANES en el borde K del azufre correspondientes a muestras de petróleo crudo argentino, así como a las fracciones de asfaltenos, resinas I y resinas II extraídas de cada muestra mediante precipitación con *n*-heptano. En la misma figura se muestra también la estructura molecular promedio propuesta para los asfaltenos argentinos obtenidos bajo estas condiciones. La forma de azufre predominante corresponde al grupo tiofénico, integrado en los anillos aromáticos fusionados que conforman el núcleo de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) del modelo tipo isla. Por su parte, las formas de sulfuro, disulfuro y sulfóxido se localizan en las ramificaciones de las cadenas alifáticas que sustituyen a dichos núcleos aromáticos.²⁹

De igual forma, la técnica XANES en el borde K del vanadio permite obtener información más precisa sobre el estado de oxidación y el entorno químico del vanadio presente en las muestras de asfaltenos argentinos.

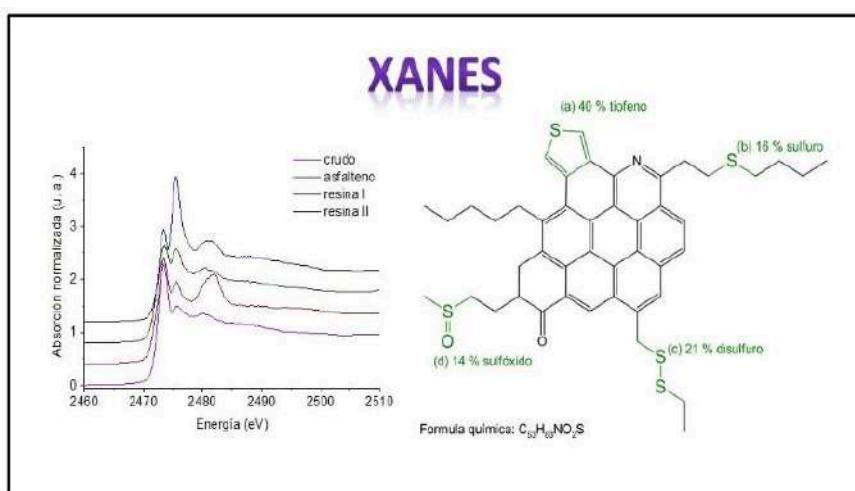


Figura 3. Espectros XANES en el borde K del azufre de petróleos crudos argentinos y de sus fracciones, junto con la representación esquemática de los posibles entornos del azufre.

3. Estructura de los Agregados de Asfaltenos.

3.1. Estudio de los Nanoagregados y Clusters de asfaltenos solubles

Para estudiar y caracterizar morfológicamente los nanoagregados y clústeres de asfaltenos argentinos, en nuestra línea de trabajo empleamos dos técnicas complementarias: Dispersión de rayos X a bajos ángulos (SAXS) y Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).^{30,31}

A través de la técnica SAXS se obtiene información sobre la forma, el tamaño y la superficie de los nanoagregados y clústeres solubles presentes en soluciones modelo de asfaltenos en tolueno, analizados a diferentes concentraciones. Mediante la técnica AFM es posible analizar los perfiles de distribución del tamaño de los agregados de asfaltenos solubles.

Estos estudios resultan valiosos para evaluar cómo influyen los inhibidores de precipitación de asfaltenos y las propias resinas extraídas de los crudos en la estabilización de los agregados.

3.2. Estructura de asfaltenos durante la precipitación

Recientemente hemos abordado el estudio cinético de precipitación de asfaltenos mediante el uso combinado de técnicas de dispersión de rayos X a ultra bajo ángulo (USAXS) y técnicas microscópicas, tales como microscopía confocal y microscopía electrónica de barrido.

En la línea de luz CATERETÊ del nuevo sincrotrón Sirius, se encuentra disponible las técnicas de Dispersión de rayos X a bajo ángulos (SAXS) y a ultra bajo ángulo (USAXS), ambas con resolución temporal.³² Mediante USAXS, es posible acceder a un rango de tamaños entre 1 nm y 5 μm , lo que permite caracterizar simultáneamente agregados (clústeres) de asfaltenos insolubles mayores a 50 nm y agregados solubles menores a 50 nm. Esta técnica representa una herramienta poderosa para comprender el efecto de inhibidores químicos sobre la precipitación de asfaltenos y su morfología.³³

Para estudiar los cambios estructurales de los agregados de asfaltenos durante la precipitación, se llevan a cabo experimentos con soluciones de asfaltenos en tolueno a las que se añaden distintas proporciones de heptano. Las curvas de dispersión se registran en función del tiempo, lo que permite un seguimiento temporal del proceso.

Asimismo, con el objetivo de entender el impacto que pueden tener los inhibidores sobre la estructura y la dinámica de agregación de los asfaltenos, se realizan mediciones adicionales en soluciones modelo que contienen inhibidores de la precipitación.

Además, se emplea la microscopía confocal para determinar el inicio de la precipitación de asfaltenos (onset) antes de realizar las mediciones de USAXS en el sincrotrón. El onset se define como la concentración mínima de n-heptano requerida para que las partículas de asfaltenos ($\geq 0,5 \mu\text{m}$) sean detectables mediante microscopía confocal, dentro de un lapso inferior a cinco minutos tras la adición del solvente. Esta técnica también permite evaluar el efecto de distintos inhibidores sobre el onset de precipitación. Otra técnica utilizada para determinar el onset de precipitación de asfaltenos es el método “indirecto”, basado en espectrofotometría UV-visible. A diferencia de los métodos ópticos directos, este enfoque analiza los cambios en las propiedades ópticas del sobrenadante, en lugar de observar directamente las partículas precipitadas. Es la única técnica actualmente disponible con sensibilidad suficiente para detectar partículas tan pequeñas como 100 nm de diámetro.^{34,35}

A modo de ejemplo, se presenta un diagrama que ilustra las distintas etapas del proceso de agregación de los asfaltenos, junto con algunas de las mediciones experimentales realizadas por nuestro grupo de investigación, como se muestra en la Figura 4.

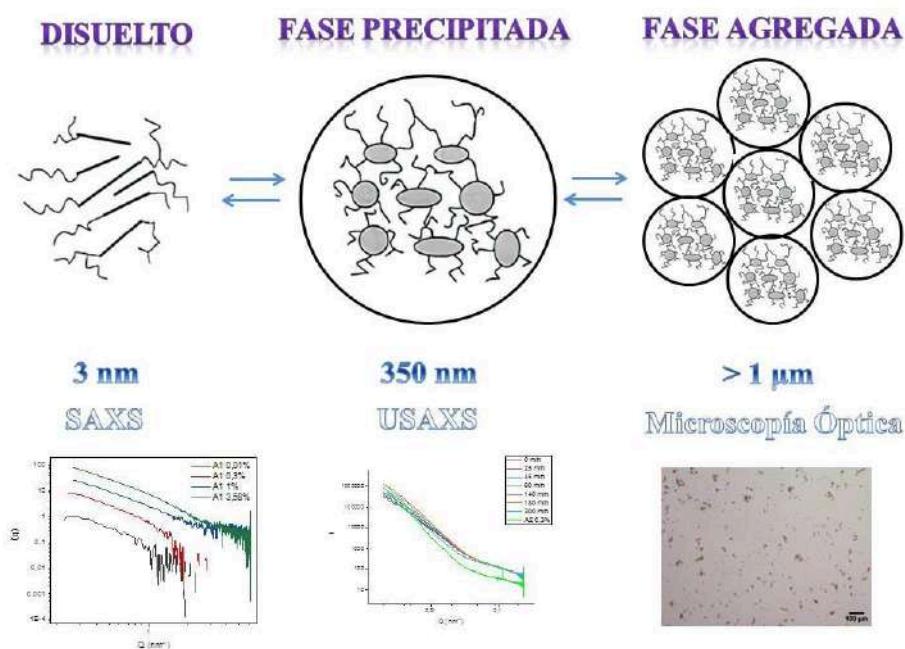


Figura 4. Diagrama mostrando las diferentes etapas de agregación acompañadas cada una con medidas experimentales llevadas a cabo en nuestro grupo.

Conclusiones

La precipitación y deposición de asfaltenos, que constituyen la fracción más pesada y compleja del petróleo, representa uno de los desafíos operativos y económicos más significativos en la industria petrolera. A pesar de los avances, la naturaleza intrínseca de este fenómeno implica que su mitigación efectiva aún no se ha alcanzado por completo, lo que conlleva costos elevados y soluciones que a menudo se basan en enfoques reactivos.

El presente capítulo pretende contribuir a la comprensión de este problema mediante una estrategia integral que combina metodologías avanzadas de caracterización estructural, estudios de agregación en solución y la evaluación sistemática de inhibidores. Como conclusión principal, se demostró la viabilidad y el valor de un enfoque integrado, que articula técnicas experimentales de diversa sofisticación -tanto de acceso local como mediante cooperación internacional- para abordar el problema de la precipitación de asfaltenos desde múltiples escalas, molecular y supramolecular.

La aplicación de esta estrategia permitió, en primer lugar, determinar la estructura de asfaltenos y resinas, para luego profundizar en los mecanismos moleculares responsables de la estabilidad y agregación de los asfaltenos de crudos argentinos. Esta comprensión fundamental es un prerrequisito indispensable para el desarrollo de soluciones racionales y predictivas, superando el paradigma tradicional de ensayo y error. En segundo término, se estableció una metodología robusta para evaluar la eficiencia y el modo de acción de inhibidores comerciales y novedosos. El estudio de las interacciones a nivel molecular entre el inhibidor y los asfaltenos proporciona criterios científicos para seleccionar y optimizar formulaciones, orientados a prevenir la precipitación de manera más efectiva.

Como perspectiva derivada de este trabajo, los conocimientos y metodologías desarrollados sientan las bases para abordar una problemática más compleja y menos explorada: la formación de depósitos mixtos de asfaltenos y parafinas, de especial relevancia para yacimientos no convencionales, como Vaca Muerta. Tradicionalmente, estos dos problemas de flujo se han estudiado de forma aislada, aunque la evidencia industrial indica que frecuentemente coexisten e interactúan. Se ha observado que los asfaltenos pueden actuar como núcleos para la cristalización de parafinas, y que la presencia de estas últimas altera la estabilidad y comportamiento de deposición de los asfaltenos.

En definitiva, la línea de trabajo aquí expuesta no solo contribuye al conocimiento fundamental de los asfaltenos, sino que también proporciona el marco metodológico y conceptual para enfrentar desafíos de flujo más complejos e integrados. Este trabajo reafirma que un compromiso activo con la investigación científica de base es la vía más efectiva para enfrentar estos desafíos, subrayando que la ruta hacia soluciones optimizadas pasa necesariamente por una comprensión profunda de los fenómenos moleculares y supramoleculares. Los hallazgos presentados constituyen un paso significativo en esa dirección y ofrecen un marco de referencia para futuras investigaciones en el sector energético.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la UNLP (11/X918), ANPCyT (PICT 2021-GRF-TI-00513), CONICET (PIP 1938) y al Laboratorio Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) SIRIUS por los turnos de medida otorgados.

Asimismo, los autores expresan su agradecimiento a los Dres. Yanina B. Bava y Lisandro J. Giovanetti pertenecientes al Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA) y al Dr. Leandro R. Andrini del CMaLP Centro de Matemática La Plata por sus valiosos aportes y participación en las medidas.

Referencias

- [1] Tavakkoli, M., S. R. Panuganti, V. Taghikhani, M. R. Pishvaie, and W. G. Chapman. 2014. Understanding the polydisperse behavior of asphaltenes during precipitation. *Fuel* 117: 206–217.
- [2] Crick, F. (1988). *What Mad Pursuit, a Personal View of Scientific Discovery*, Basic Books, New York.
- [3] Mullins OC, Sheu EY, Hammami A, Marshall AG. Asphaltenes, heavy oils, and petroleomics. New York: Springer; 2007.
- [4] Sheu, E. Y.; Storm, D. A. *Asphaltenes: Fundamentals and Applications*; Sheu, E. Y., Mullins, O. C., Eds.; Springer Science +Business Media, LLC: Chicago, 1993.
- [5] Mullins, O. C.; Sheu, E. Y. *Structures and Dynamics of Asphaltenes*; Mullins, O. C., Sheu, E. Y., Eds.; Springer US: Boston, MA, 1998.
- [6] Zhang, D.; Creek, J.; Jamaluddin, A.; Marshall, A. G.; Rodgers, R. P.; Mullins, O. C. *Asphaltenes-Problematic but Rich in Potential*. *Oilf. Rev.* 2007, 22–43.
- [7] Evdokimov I. N. Optical Interrogation of Petroleum Asphaltenes: Myths and Reality. En *Analytical Characterization Methods for Crude Oils and related products*. Shukla A. K. Wiley (2018). Cap. 2, pp. 13-75.
- [8] Mullins, O. C. The Modified Yen Model. *Energy Fuels* 2010, 24, 2179–2207.
- [9] Murgich, J.; Abanero, J. A.; Strausz, O. P. Molecular recognition in aggregates formed by asphaltene and resin molecules from the Athabasca oil sand. *Energy Fuels* 1999, 13, 278–286.
- [10] Sheremata, J. M.; Gray, M. R.; Dettman, H. D.; McCaffrey, W. C. Quantitative molecular representation and sequential optimization of Athabasca asphaltenes. *Energy Fuels* 2004, 18, 1377–1384.
- [11] Schuler B, Meyer G, Peña D, Mullins OC, Gross L. Unraveling the molecular structures of asphaltenes by atomic force microscopy. *J Am Chem Soc* 2015; 137:9870–6.
- [12] Schuler B, Fatayer S, Meyer G, Rogel E, Moir M, Zhang Y, et al. Heavy oil based mixtures of different origins and treatments studied by atomic force microscopy. *Energy Fuels* 2017; 31:6856–61.
- [13] Chacón-Patiño, M. L.; Rowland, S. M.; Rodgers, R. P. Advances in Asphaltene Petroleomics. Part 3. Dominance of Island or Archipelago Structural Motif Is Sample Dependent. *Energy Fuels* 2018, 32, 9106–9120.
- [14] Mullins, O. C. The Modified Yen Model. *Energy Fuels* 2010, 24, 2179–2207.
- [15] Andersen SI, Speight JG. Petroleum resins: separation, character, and role in petroleum. *Petrol Sci Technol* 2001; 19:1–34.
- [16] ASTM D6560: Determination of Asphaltenes (Heptane Insolubles) in Crude Petroleum and Petroleum Products, 2001.
- [17] Bava Y.B., Geronés M., Buceta D., De La Iglesia Rodríguez D., López-Quintela M.A., Erben M.F. Elucidation of the average molecular structure of Argentinian asphaltenes. *Energy & Fuels* (2019), 33 (4), 2950–2960. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b04318.
- [18] ASTM D4124-97. Standard Test Methods for Separation of Asphalt into Four Fractions. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2001. www.astm.org.
- [19] Mitchell, D. L.; Speight, J. G. The solubility of asphaltenes in hydrocarbon solvents. *Fuel* 1973, 52, 149–152.
- [20] López L., Lo Mónaco S., Galarraga F., Lira A., Cruz C. V/Ni ratio in maltene and asphaltene fractions of crude oils from the west Venezuelan basin: correlation studies. *Chemical Geology* (1995), Vol. 119 (1-4), 255-262, DOI: 10.1016/0009-2541(94)00100-M.
- [21] Silva, S. L.; Silva, A. M. S.; Ribeiro, J. C.; Martins, F. G.; Da Silva, F. A.; Silva, C. M. Chromatographic and spectroscopic analysis of heavy crude oil mixtures with emphasis in nuclear magnetic resonance spectroscopy: A review. *Anal. Chim. Acta* 2011, 707, 18–37.
- [22] Yen, T. F.; Erdman, J. G.; Pollack, S. S. Investigation of the Structure of Petroleum Asphaltenes by X-Ray Diffraction. *Anal. Chem.* 1961, 33, 1587–1594.
- [23] Tanaka, R.; Sato, E.; Hunt, J. E.; Winans, R. E.; Sato, S.; Takanohashi, T. Characterization of asphaltene aggregates using X-ray diffraction and small-angle X-ray scattering. *Energy Fuels* 2004, 18, 1118–1125.
- [24] Abdallah, W. A.; Yang, Y. Raman Spectrum of Asphaltene. *Energy Fuels* 2012, 26, 6888–6896.
- [25] Gabriela Vanini, Thamara A. Barra, Lindamara M. Souza, Natâa C.L. Madeira, Alexandre O. Gomes, Wanderson Romão, Débora A. Azevedo, Characterization of nonvolatile polar compounds from Brazilian oils by electrospray ionization with FT-ICR MS and Orbitrap-MS, *Fuel*, 282, 2020, doi.org/10.1016/j.
- [26] Mitra-Kirtley S, Mullins OC, Ralston CY, Sellis D, Pareis C. Determination of sulfur species in asphaltene, resin, and oil fractions of crude oils. *Appl Spectrosc* 1998; 52:1522–5.

- [27] Han Y, Zhang Y, Xu C, Hsu CS. Molecular characterization of sulfur-containing compounds in petroleum. *Fuel* 2018; 221:144–58.
- [28] Ren L, Wu J, Qian Q, Liu X, Meng X, Zhang Y, et al. Separation and characterization of sulfoxides in crude oils. *Energy Fuels* 2019; 33:796–804.
- [29] Bava, Y. B., Geronés, M., Giovanetti, L. J., Andriani, L., Erben, M.F., 2019, —Speciation of Sulphur in Asphaltenes and Resins from Argentinian petroleum by using XANES spectroscopy||. *Fuels*, 256, 115952.
- [30] Espinat D, Fenistein D, Barre L, Frot D, Briolant Y. Effects of temperature and pressure on asphaltenes agglomeration in toluene. A light, X-ray, and neutron scattering investigation. *Energy & Fuels* 2004; 18:1243–9.
- [31] Eyssautier J, Levitz P, Espinat D, Jestin J, Gummel J, Grillo I, et al. Insight into asphaltene nanoaggregate structure inferred by small angle neutron and X-ray scattering. *J Phys Chem B* 2011;115:6827–37.
- [32] Petrov, Yves. (2017). Radiación de Sincrotrón en Brasil UVX y Sirius. *Ciência e Cultura*, 69 (3), 18-22. <https://dx.doi.org/10.21800/2317-66602017000300007>.
- [33] Yang, Y.; Chaisoontornyotin, W.; Hoepfner, M. The Structure of Asphaltenes During Precipitation Investigated by Ultra-Small-Angle X-ray Scattering. *Langmuir* 2018, 34 (35), 10371–10380.
- [34] Tavakkoli, M., M. R. Grimes, X. Liu, C. K. Garcia, S. C. Correa, Q. J. Cox, and F. M. Vargas. 2015. *Energy Fuels* 29 (5).
- [35] Juan M. Padró, Agostina Novotny, Clara Smal, Martín Cismundi, Upstream Oil and Gas Technology, 10, 2023, 100087

AUTORES

Mauricio F. Erben

:: Centro de Química Inorgánica, CEQUINOR (UNLP, CONICET CCT-La Plata), Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Blvd. 120 N°1465, CC 962, La Plata (CP 1900), Argentina.

Axel D. Toledo

:: Centro de Química Inorgánica, CEQUINOR (UNLP, CONICET CCT-La Plata), Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Blvd. 120 N°1465, CC 962, La Plata (CP 1900), Argentina.

Mariana Gerones

:: CEQUINOR-UNLP
La Plata, Argentina.
mgerones@quimica.unlp.edu.ar

La Dra. Mariana Gerones es investigadora del CEQUINOR (Centro de Química Inorgánica, UNLP-CONICET) y Profesora Adjunta en la Facultad de Ingeniería (UNLP). Se especializa en la caracterización de sistemas complejos del petróleo, mediante el empleo de diversas técnicas espectroscópicas.

GAS Y PETRÓLEO

INNOVACIÓN, EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD DESDE LA **UNLP**

EDUCACIÓN
PÚBLICA
Y GRATUITA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA