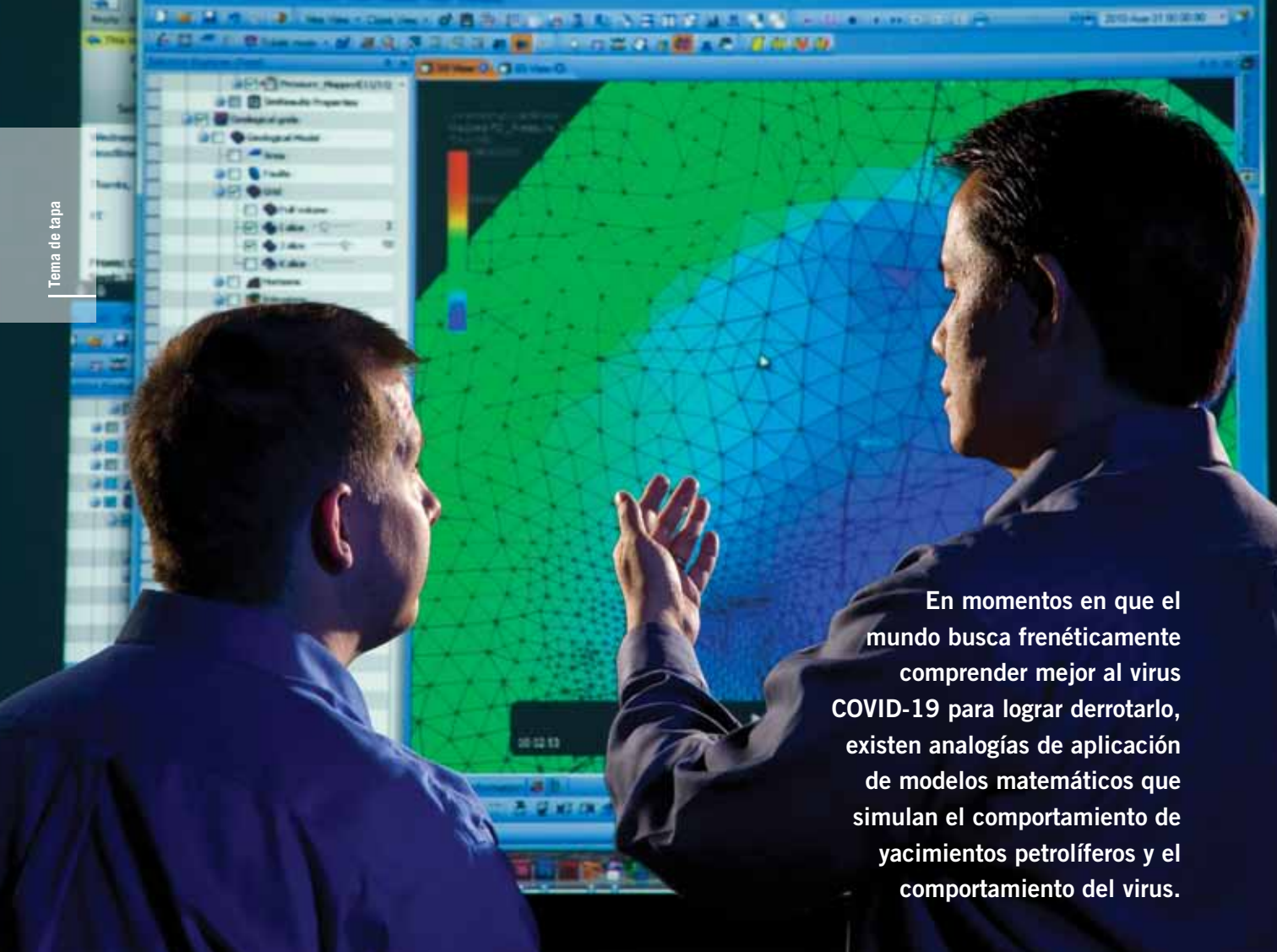




En momentos en que el mundo busca frenéticamente comprender mejor al virus COVID-19 para lograr derrotarlo, existen analogías de aplicación de modelos matemáticos que simulan el comportamiento de yacimientos petrolíferos y el comportamiento del virus.

La experiencia en Simulación Numérica usada en O&G para estudiar la evolución del COVID-19 en la Argentina

Por **Redacción de Petrotecnia**

La simulación numérica es una de las más completas herramientas que posee la industria de los hidrocarburos para tomar decisiones relativas al desarrollo de los reservorios, pero no es la única que la utiliza.

En momentos en que el mundo busca frenéticamente comprender mejor al virus COVID-19 para lograr derrotarlo, existen analogías de aplicación de modelos matemáticos a la simulación de yacimientos y al estudio del virus.

En efecto, la Dra. Gabriela Beatriz Savioli y el Dr. Juan Enrique Santos del Instituto del Gas y del Petróleo, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (IGPUBA-FIUBA) utilizan el modelo *Susceptible-Exposed-Infected-Recovered* (SEIR) en sus versiones clásica y fraccional, para analizar la evolución de la enfermedad en Buenos Aires y las áreas vecinas. Los parámetros del modelo se calibran utilizando el número de víctimas notificadas oficialmente. Dado que las soluciones infinitas respetan los datos, mostraron diferentes casos.

En todos ellos, la tasa de reproducción R_0 disminuye después del cierre temprano, pero luego aumenta, probablemente debido al aumento del contagio en los barrios marginales densamente poblados y a la circulación comunitaria del virus. Por tanto, es obligatorio revertir esta tendencia creciente en 0 aplicando estrategias de control para evitar un elevado número de individuos infecciosos y muertos.

El modelo brinda un procedimiento eficaz para estimar los parámetros de la epidemia (tasa de letalidad, probabilidad de transmisión por contacto, períodos de infección y de incubación) y monitorear las medidas de control durante su evolución, mostrando una vez más que desde las universidades, con apoyo de la industria, pueden tocarse temas de interés social directo.

En estas páginas *Petrotecnia* busca resumir la explicación de estos científicos en una reciente charla en el ciclo Petro

Charlas de Café, organizado por el IGPUBA, y los resultados del método SEIR clásico que pueden verse condensados en esta publicación: <https://arxiv.org/abs/2005.06297>

Aplicando el método

El 9 de marzo de 2020, el Ministerio de Salud argentino informó oficialmente el inicio de la nueva epidemia de coronavirus (COVID-19) en la Argentina. El número de casos ha seguido aumentando. La mayoría de los modelos matemáticos que replican los brotes de enfermedades dividen la población en compartimentos para analizar cuánto tiempo tardará un grupo en evolucionar hacia otro.

Para este análisis se usó el modelo SEIR que, en su versión clásica, consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, ODE (por su sigla en inglés: *Ordinary Differential Equation*) de primer orden para describir la propagación del virus, calcular el número de individuos infectados y estimar el número de muertes. Como ejemplos, el modelo SEIR se ha aplicado con éxito para estudiar la dinámica de transmisión de la tuberculosis y la varicela y específicamente en el caso de COVID-19 se lo ha usado para simular la epidemia en la región de Lombardía (Italia), con aproximadamente 16.800 bajas reportadas hasta la fecha (agosto de 2020). La importante amenaza que representa COVID-19 tiene su significado en el elevado número de trabajadores sanitarios infectados, como el 20% de los casos en Italia. Hoy el modelo se aplica en todo el mundo.

Para analizar el comportamiento de la epidemia, el modelo se calibra utilizando el número de muertos hasta la fecha, que consideramos más confiable que el número de individuos infecciosos. Los parámetros del modelo son probabilidad de transmisión por contacto, períodos de incubación e infecciosos y tasa de letalidad.

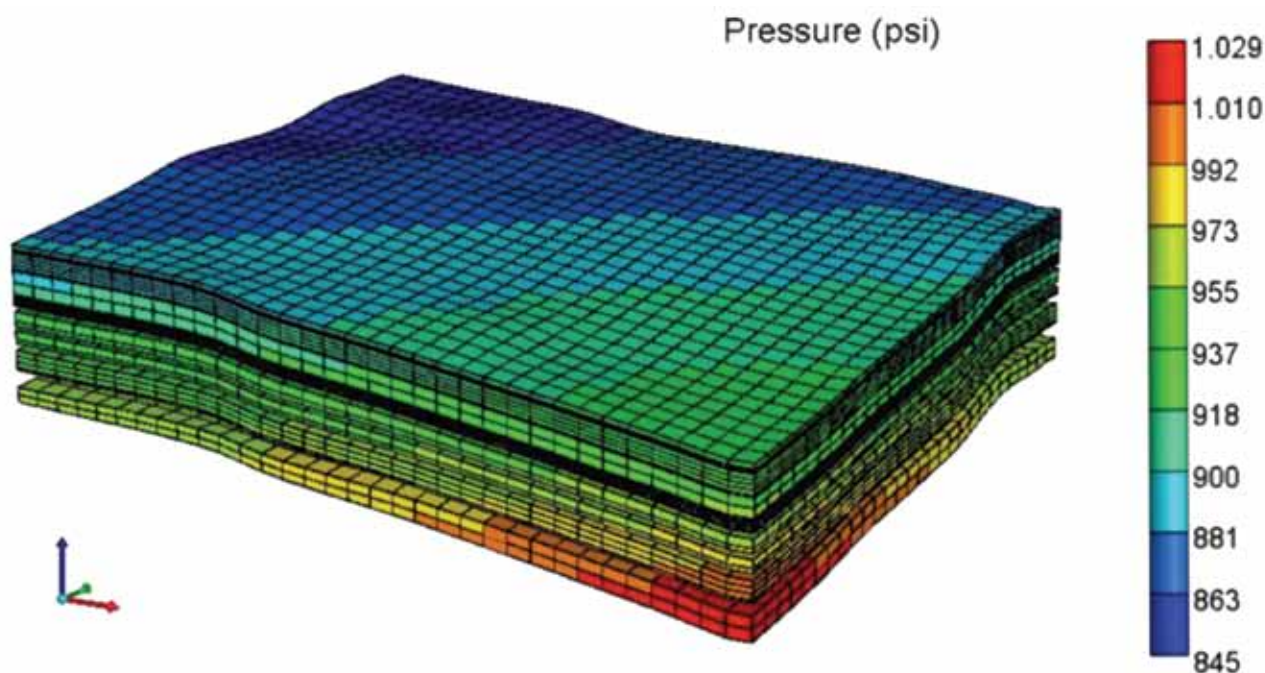
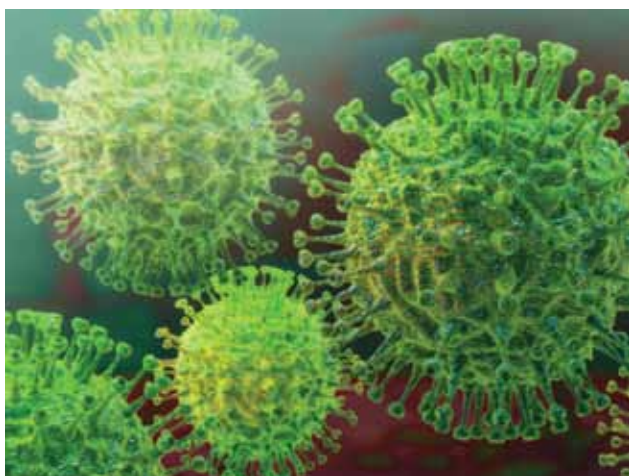


Figura 1. Modelación numérica aplicada a la industria de los hidrocarburos.



Para analizar el comportamiento de la epidemia, el modelo se calibra utilizando el número de muertos hasta la fecha, que se considera más confiable que el número de individuos infectados. Los parámetros del modelo son: probabilidad de transmisión por contacto, períodos de incubación e infección y tasa de letalidad.

Según la experiencia de China, Estados Unidos y la Unión Europea, se estima que la combinación de un diagnóstico rápido con medidas de aislamiento tiene un efecto

sustancial en la dinámica de las epidemias. Evaluar y cuantificar la efectividad de estos métodos es extremadamente importante y los simuladores numéricos contribuyen a lograr este fin.

En resumen, el objetivo de la simulación numérica es proporcionar un procedimiento efectivo para modelar la difusión del virus a lo largo del tiempo y analizar la efectividad de las medidas administrativas. De esta manera, el pico de individuos infectados y muertos por día en función del tiempo se puede predecir en función de los parámetros estimados durante la calibración.

Motivación y objetivos

Volviendo a la presentación del equipo, el Instituto del Gas y del Petróleo de la Universidad de Buenos Aires (IGPUBA), que aplica este caso en la Argentina, podemos afirmar que la evolución de una epidemia se puede modelar con ecuaciones de difusión cuya solución se obtiene con los mismos métodos numéricos utilizados para simular sismogramas y flujo de fluidos en yacimientos de hidrocarburos.

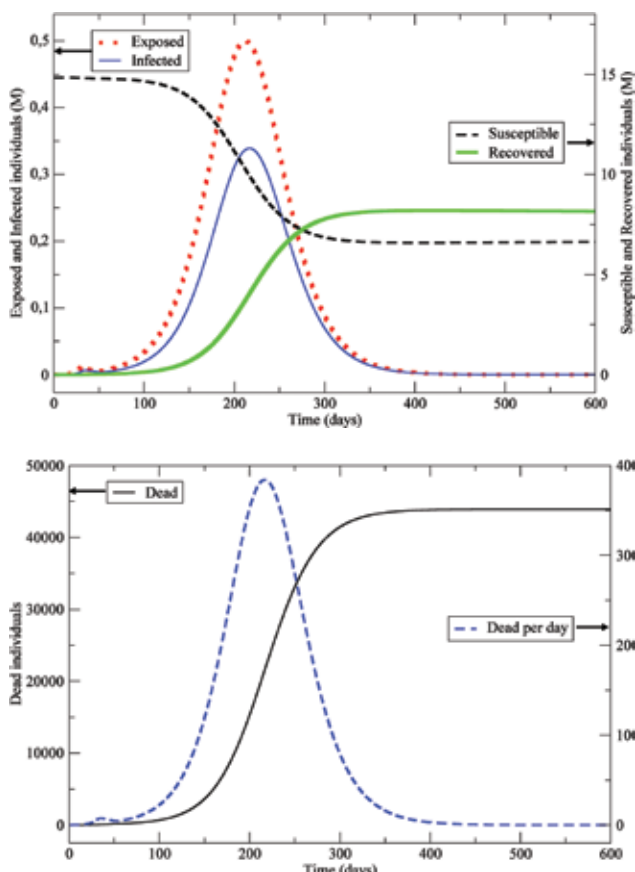


Figura 2. Ejemplo de simulación numérica aplicada al COVID-19.

Así, en IGPUBA se ha creado un grupo de trabajo interdisciplinario para simular el comportamiento de la epidemia COVID-19, que involucra matemáticos, físicos, médicos, geofísicos e ingenieros.

El objetivo es desarrollar modelos numéricos para realizar predicciones sobre el número de infectados, el número de recuperados y el número de muertos dependiendo de las medidas de mitigación.

La experiencia en otros países ha mostrado que las medidas de aislamiento y diagnóstico rápido han tenido un

MINDS OF ENGINEERS. PIONEERS AT HEART.

Wintershall y DEA se convierten en Wintershall Dea.
Exploramos y producimos gas y petróleo – en todo el mundo.
Responsable y eficientemente. Ahora avanzamos juntos.
Somos pioneros de corazón, con 245 años de experiencia
en ingeniería de excelencia.

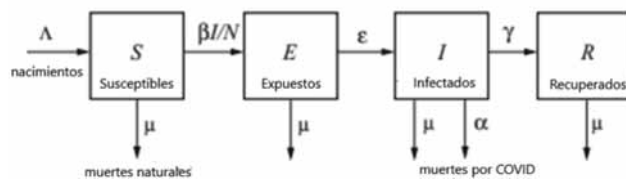
wintershalldea.com



fuerte impacto en la dinámica de la epidemia, de allí la importancia de contar con modelos numéricos que permitan analizar y cuantificar su eficiencia.

Modelo SEIR

Se divide a la población total $N(t)$ en cuatro categorías: susceptibles (S) a ser infectados, expuestos (E) en los que la enfermedad está latente, infectados (I) y recuperados (R). Los individuos se mueven de S a E dependiendo de la probabilidad β de transmisión del virus por contacto; de E a I en función de la progresión ϵ de expuestos a infectados, relacionada con el período de incubación; y de I a R dependiendo del índice γ de recuperación de la enfermedad. Cabe destacar que el parámetro β depende de las medidas de mitigación adoptadas, por lo que puede tomar diferentes valores en distintas etapas del curso de la pandemia. Se asume que los nacimientos y muertes naturales están balanceados, lo que es razonable en el corto lapso considerado.



β : trasmisión del virus por contacto (depende de las medidas de mitigación adoptadas)

ϵ : progresión de expuestos a infectados (ϵ^{-1} : período promedio de incubación)

γ : recuperación de la enfermedad (γ^{-1} : período promedio de infección)

α : fatalidad inducida por el virus

Λ : natalidad ; μ : mortalidad natural

Como medidas importantes para cuantificar la expansión del virus se pueden mencionar:

Índice de reproducción R_0 : medida epidemiológica clásica asociada al poder reproductivo de la enfermedad.

$$R_0 = \frac{\beta \epsilon}{(\epsilon + \mu)(\gamma + \alpha + \mu)}$$

Si $R_0 > 1$ ocurre la epidemia, si $R_0 < 1$, se extingue

Índice de fatalidad de la infección IFR: porcentaje de muertes sobre el total de infectados.

$$IFR(\%) = 100 \frac{D_\infty}{R_\infty + D_\infty} \approx 100 \frac{\alpha}{\gamma}$$

Modelo SEIR subdifusivo de orden fraccional

Es una generalización del modelo clásico que consiste en reemplazar en las ecuaciones diferenciales la derivada ordinaria por la derivada fraccional de Caputo de orden ν .

Ventajas del cálculo fraccional

El cálculo fraccional juega un rol fundamental en la representación de fenómenos anómalos (superdifusivos y subdifusivos), por lo que resulta sumamente apropiado en epidemiología. Se ha aplicado en muchas disciplinas: biología, física, geofísica, economía y bioingeniería, entre otras.

Su utilidad se basa en que los sistemas biológicos tienen “memoria”: el estado actual depende del pasado y no solamente de lo que ocurrió en el instante anterior.

Así, el modelo SEIR fraccional permite la incorporación de memoria, con propiedades hereditarias del sistema, y es una generalización del modelo clásico.

Además, el modelo fraccional provee un parámetro adicional ν (orden de la derivada fraccional) para lograr un mejor ajuste a los datos (en este caso, las víctimas fatales del COVID-19).

Aplicación a la evolución de la pandemia en Región Metropolitana de Buenos Aires

Tanto ν , ϵ , γ , α , β y $E(0)$ se ajustan periódicamente a partir de los datos diarios para realizar predicciones. β se considera constante a trozos en intervalos $[t_0, t_1]$, $[t_1, t_2]$,

Los datos son el número de individuos fallecidos provistos por el Ministerio de Salud de la Nación en sus informes diarios. El número de infectados no es representativo, pues hay una gran cantidad de individuos asintomáticos no diagnosticados.

Un ejemplo de los resultados obtenidos puede verse en la figura 2, donde se muestra la evolución de las 4 clases consideradas y del número de víctimas fatales en función del tiempo.

Observaciones

La disminución en el orden de la derivada fraccional ν causa:

- retraso en la fecha de los picos de infectados y de decesos por día,
- aumento en el pico del número de decesos por día,
- disminución en el número total de individuos recuperados,
- aumento en el número total de decesos.

Se ha estimado que los períodos de incubación e infección están en el rango de 4-7 días y 3-5 días, respectivamente, y la tasa de letalidad por infección (IFR) entre 0.5% y 2%. Un caso con un período de incubación de 11 días produce aproximadamente tres veces más bajas al final de la epidemia. Los resultados del método SEIR clásico pueden verse en la publicación <https://arxiv.org/abs/2005.06297>.



Conclusiones

La simulación con el método SEIR, calibrado mediante el ajuste del número de decesos, provee una metodología simple y efectiva para obtener las propiedades del virus, estudiar la evolución de la epidemia en la región metropolitana de Buenos Aires (área más afectada) y analizar la eficacia de las medidas de mitigación.

Los resultados muestran cómo las medidas de aislamiento, los períodos de incubación e infección, la probabilidad de transmisión, los individuos expuestos inicialmente y el orden de subdifusión afectan la evolución de la epidemia. El índice de reproducción R_0 primero disminuyó y luego aumentó, lo que predice un aumento drástico del número de muertos si este comportamiento persiste en el futuro. Así, los individuos infectados estarán entre 5 y 9 millones de personas si no se invierte la tendencia creciente de R_0 .

El objetivo primordial es que el simulador colabore en la elección de las medidas más adecuadas para controlar la evolución de la pandemia en cuanto a número de infectados, de manera que sean suficientes los recursos sanitarios disponibles para tratar a los enfermos. Constituirá entonces una herramienta de suma utilidad que contribuya en la toma de decisiones sanitarias.

En el futuro se pueden aplicar modelos más complejos, con más clases o compartimentos y/o considerando la difusión espacial. Esta alternativa lleva a modelos basados en sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales del tipo reacción-difusión ya implementados y resueltos numéricamente por el grupo del IGPUBA para la simulación de flujo de fluidos en medios porosos, con aplicación a la geofísica de hidrocarburos. ■

Gabriela Beatriz Savioli es licenciada y doctora en Ciencias Matemáticas de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Buenos Aires

y Profesora Asociada Exclusiva y directora del Laboratorio de Ingeniería de Reservorios en el Instituto del Gas y del Petróleo (IGPUBA) de la Facultad de Ingeniería de la UBA. Tiene más de 25 años de experiencia en Simulación Numérica de Reservorios: investigación y desarrollo, formación de recursos humanos, enseñanza universitaria de grado y de posgrado, cursos para la industria y transferencia. Ha publicado más de 70 trabajos de investigación y desarrollo en revistas científicas y congresos nacionales e internacionales de su especialidad. Ha dirigido proyectos de Investigación financiados por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y la UBA. Fue vicedirectora a cargo del IGPUBA entre 04/2011 y 05/2014. En 2016 recibió el premio "2016 Regional Distinguished Achievement Award for Petroleum Engineering Faculty, South America and Caribbean Region", otorgado por SPE International.

Juan Enrique Santos es computador científico y licenciado en Matemáticas en la FCEyN de la UBA, y Doctor en Matemáticas (PhD), Department of Mathematics, University of Chicago. Fue Profesor Adjunto de la FCEyN, Universidad de Buenos Aires (1983-1989), Profesor Titular (1991-2011) y Jefe del Departamento de Geofísica Aplicada, Observatorio Astronómico (1996-2011), Universidad Nacional de La Plata, y Professor of Mathematics, Department of Mathematics, Purdue University (1992-2018). Se desempeñó como Investigador del CONICET desde 1991 hasta su jubilación en 2018, en la categoría Investigador Principal. Es autor del libro *Numerical Simulation in Applied Geophysics*, Birkhauser, 2017, en colaboración con Patricia Gauzellino; y de 94 artículos en revistas internacionales de circulación periódica y 91 en Actas de Congresos. Dirigió seis tesis doctorales en las disciplinas de Geofísica, Física e Ingeniería. Es especialista en desarrollo de modelos diferenciales y numéricos para la caracterización estática y dinámica de rocas porosas saturadas, la propagación de ondas y diversos problemas inversos asociados en ambientes de reservorios de hidrocarburos. Desde 2018 es director del Laboratorio de Geofísica Numérica (LAGENU) del IGPUBA y Profesor Emérito del Department of Mathematics, Purdue University.