

# Matemáticas para explicar los sismos:

CIENCIA DE FRONTERA

la influencia de Friedrich Wilhelm Bessel en la carrera académica de Francisco José Sánchez Sesma

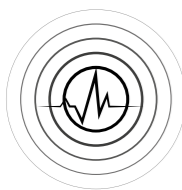
María Josefa Santos-Corral\*

\*Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad de México, México.  
Contacto: mjsantos@sociales.unam.mx



**F**rancisco José Sánchez Sesma es ingeniero civil por la UNAM en 1974. Donde también obtuvo la maestría y el doctorado en Estructuras, en 1976 y 1979, respectivamente. Desde 1975 ingresó como ayudante de investigador al Instituto de Ingeniería del que fue director de 1999 a 2003. Dentro de sus temas de estudio destacan: la propagación de ondas elásticas para entender la respuesta sísmica de suelos blandos y los efectos de la geología local en las amplificaciones del movimiento del terreno.

Desde 2005 se ha interesado en el ruido sísmico ambiental y los campos difusos, este último concepto proviene de la física estadística. Temas que tienen aplicaciones en la exploración y la estimación del peligro sísmico, y sobre ellos ha publicado numerosos y muy citados trabajos científicos, ha impartido cursos y dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Ha sido profesor visitante en diversas instituciones del mundo. Entre las distinciones académicas que el Dr. Sánchez Sesma ha recibido destacan el Premio Nacional de Ciencias y Artes 1994 y el Premio Universidad Nacional 1998. En 2015 obtuvo el "Premio DPRI" de la Universidad de Kioto, Japón. En 2016 el SNI lo distinguió como Investigador Nacional Emérito y en febrero de 2019 fue nombrado Investigador Emérito de la UNAM.



## ¿Cómo y cuándo descubre el doctor Sánchez Sesma su vocación por la ingeniería?

En realidad, pienso que las vocaciones no existen. Uno hace algo y si le agrada sigue por ahí, pero es aleatorio. En la preparatoria me interesaba todo, quería ser médico, sociólogo, abogado, luego me di cuenta de que no era bueno para la comunicación, al tiempo que descubrí que las matemáticas me gustaban en demasía. Primero pensé en física o matemáticas; sin embargo, la gente me decía: "si estudias eso vas a terminar dando clase", cosa que entonces no sabía que disfrutaría mucho. Fue quizá por ello que me decidí por ingeniería civil en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Carrera que terminé, aunque a la mitad hubiera querido cambiarme a la Facultad de Ciencias.

Al final no pude hacerlo pues, aun cuando me sentía decepcionado por los contenidos de algunas asignaturas y las cátedras de varios docentes, había adelantado muchas materias que no me revalidaban en Ciencias, así que me quedé donde estaba y terminé en cuatro años. Afortunadamente en el tercero tuve una clase con un profesor maravilloso, Neftalí Rodríguez Cuevas, quien me enseñó la Mecánica del Medio Continuo y me hizo recuperar la fe en la ingeniería, por el lado de las matemáticas. Empecé a analizar cómo se comportan los sólidos deformables y los líquidos. Eso salvó la carrera, y me permitió decantarme por el tema de las estructuras. Con Gustavo Rafael Aranda Hernández y Víctor José Palencia Gómez hicimos la tesis profesional con el ingeniero Francisco de Pablo Galán en el área de respuesta sísmica de estructuras, este último fue director de Obras en la UNAM y le tengo un gran afecto.

Posterior a mi licenciatura llegué a trabajar como auxiliar de investigador en el Instituto de Ingeniería (II), no fui a estudiar un posgrado en el extranjero porque no había dinero, ni en el país ni en mi casa, mi madre era viuda y yo era el mayor de los hermanos. Las cosas eran complicadas. Para ayudar en el hogar lavaba coches, impartía clases particulares de matemáticas, hacía lo que fuera antes de dejar la escuela. Durante el segundo año en la Facultad de Ingeniería enseñé en secundaria. En los últimos semestres logré dar clases en Arquitectura mientras estudiaba. También comencé a hacerlo de manera medio ilegal en la Facultad de Ingeniería, porque al ser alumno de maestría de tiempo completo sólo debía dedicarme a eso.

Mis primeras investigaciones en el posgrado las hice con Luis Esteva, pero no terminé el proyecto que tenía con él. Poco después, por azares del destino, conocí a Emilio Rosenblueth, quien necesitaba un auxiliar y levanté la mano, por suerte, me quedé con él, siguiendo un tema de aguas: cálculo de la respuesta sísmica de un tanque esférico semilleno o semivacío que había trabajado en una clase con don Arturo Arias Suárez, un espléndido profesor chileno. Sólo me cambié a examinar las presiones hidrodinámicas en la cortina de una presa rígida con depósito cilíndrico, semicircular.

Para analizar el problema comencé a usar las funciones de Bessel, de las que no sabía nada, pero me maravillaron, al grado que pensé en estudiar matemáticas. Contra todos los augurios, pues los compañeros decían que el doctor Rosenblueth era un profesor muy exigente y estricto, me llegaron a decir que destruía a las personas. Finalmente, me quedé trabajando con él una buena temporada. Cuando lo nombraron subsecretario de Planeación Educativa en la SEP, obtuve mayor libertad y fue una delicia hacer la tesis de doctorado con él. Terminé 10 años después haber ingresado a la Facultad de Ingeniería. Ingresé en enero del 69 y me gradué de doctor en enero del 79, a los 28 años.

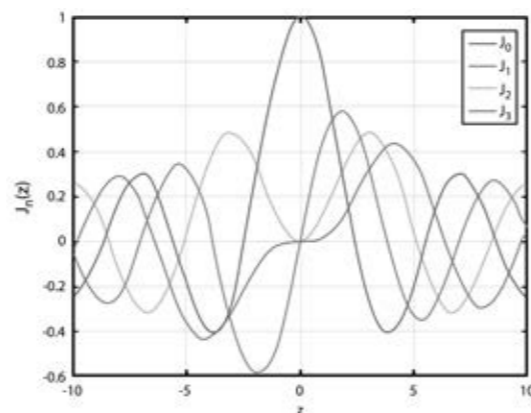


## ¿Qué lo hace decantarse por el análisis científico de los sismos?

Desde que trabajaba con el doctor Luis Esteva, pero sobre todo con Emilio Rosenblueth comencé a interesarme por las cuestiones sísmicas, específicamente, modelos matemáticos de propagación de ondas de manera casi obsesiva. Las matemáticas son mi eje de conducta, en especial las funciones de Bessel que sigo usando en la mayoría de mis trabajos; me parecen un monumento a la creatividad humana. Con frecuencia, encuentro nuevas aplicaciones de estas en los temas de sismología y de geofísica matemática.

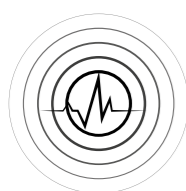
En 1973 ingresé al Instituto de Ingeniería como becario, en 1975 me convertí en ayudante de investigador y en investigador asociado en 1976, lo que me permitió en 1982 realizar una estancia sabática primero en el Ins-

titute de Physique du Globe, en París, y posteriormente en el Politécnico de Milán. Cuando estuve en París me inscribí y me aceptaron para un curso de dos semanas en la academia Enrico Fermi en Varenna, Italia. Completé el año sabático con una estancia en Milán, ahí di clase e hice investigación. Luego de mi regreso a México, me invitaron a participar en una escuela de verano en la isla de Guadalupe, en el Caribe. Allí conocí a Keiiti Aki, reconocido sismólogo, quien me propuso colaborar con él primero en el MIT y más tarde en USC en Los Ángeles, donde estuve un tiempo trabajando con él en diversos temas de sismología y poco después en aspectos muy significativos del terremoto de Michoacán de 1985 que devastó la Ciudad de México.



Ahí empecé mis contribuciones con Kojiro Irikura y más adelante con Michel Campillo. Desde hace 24 años investigo en la línea de física estadística que aplico a la sismología. Estoy usando formalismos de esta para caracterizar el ruido sísmico, y recurriendo a palabras de la física que nunca pensé que iba a usar en artículos de ingeniería, la radiación de fondo, por ejemplo. Me interesan la astronomía, la cosmología, la teoría de la relatividad y diversos temas de física, pero la mecánica de los medios continuos y la elasticidad dinámica son mis pasiones.

Tuve la enorme fortuna de ser formado por dos grandes maestros: Emilio Rosenblueth y Keiiti Aki, ingeniero sísmico uno y sismólogo el otro, ambos de clase mundial, de hecho, los mejores del planeta. Eso encaminó irremediamente los temas de mi investigación.



## ¿Cómo impactó su trabajo en el IMP en sus investigaciones?

Al Instituto Mexicano del Petróleo me invitó en 1997 el Dr. Gustavo A. Chapela Castañares, su entonces director, para pasar un sabático allá. Me atrajo con la idea de hacer investigación. En aquel tiempo yo había planteado crear un laboratorio universitario de propagación de ondas, al que denominé LUPO y el Dr. Chapela me propuso montarlo en ese lugar. Estuve dos años, y en la práctica me dediqué más a la parte administrativa y de gestión que a la investigación. Mi principal actividad fue organizar un sistema de evaluación del personal académico.

Sin embargo, también estudié cosas nuevas. IncurSIONÉ en el tema de la dinámica de pozos (los petroleros le llaman estática), donde tuve la oportunidad de explorar las ondas que se propagan en éstos, ahí aprendí bastante sobre su modelación matemática con funciones de Bessel. Pero no hubo entonces, ni hay ahora, voluntad política para desarrollar esas áreas. Se requiere de mucho esfuerzo y dinero. Fue una experiencia muy interesante que culminó cuando regresé a la dirección del Instituto de Ingeniería donde, entre otras cosas, pudimos terminar de construir la Torre de Ingeniería, edificio en el que estamos y que empezó el Dr. José Luis Fernández Zayas.

El plan original era montar un Parque Tecnológico con empresas asociadas a la UNAM y terminó siendo una obra con dos pisos para el Instituto de Ingeniería y cuatro destinados a la administración central de la UNAM y el Patronato. Cuando terminé mi periodo como director ya tenía mi proyecto de investigación en puerta, basado en los campos difusos y el ruido sísmico ambiental y nuevamente me involucré con especialistas de otras latitudes.



## ¿Cómo armó sus redes internacionales en universidades de Europa y Japón?

Las de Europa comenzaron con mi sabático en 1982. Le escribí una carta a Raúl Madariaga, a quien había conocido en una visita previa a París y me dijo "vente para acá, aquí podemos ofrecerte un puesto de profesor asociado en la Universidad Pierre y Marie Curie", y con esa oferta bajo el brazo, jalé hacia allá. Durante los siete meses que estuve en el Laboratorio de Sismología me relacioné con toda la gente que laboraba allí, ahora son muy reconocidos en todo el mundo y ahí empecé a hacer mi red. Me tocó la devaluación del peso y me deprimí solo un día, porque estaba muy feliz trabajando en los temas que había llevado de México, como la propagación de ondas. Tuve muchísimas experiencias con personas sensacionales. Después de siete meses me fui a Italia, al Politécnico de Milán, rápidamente aprendí italiano e impartí un curso de propagación de ondas sísmicas en ese idioma. Además, casi al terminar, conocí a la que hoy es mi esposa.

Mi primer viaje corto a ese país se debió a que, estando en París, vi un anuncio de la Escuela Internacional de Física Enrico Fermi en Varenna, hice una solicitud para participar como estudiante posdoctoral y me dieron una beca para ir un par de semanas a un curso de sismología de terremotos. En esa reunión me encontré a Michel Campillo de Grenoble, a Albert Tarantolá, conocido desde París, y a otros sismólogos del mundo, por ejemplo Dario Albarello quien, con un texto de poesía latinoamericana traducida al italiano, que leíamos en las tardes, me apoyó para mejorar en esa lengua, asunto que ayudó mucho pues, cuando meses después fui a Milán, entre sus lecciones y las primeras quince de un librito que compré en Londres, titulado *Italian for Beginners*, me defendí bastante bien en el idioma.

Luego, al regresar a México, los franceses coordinaron una escuela de verano en la isla de Guadalupe en el Caribe y ahí me reuní con otros colegas con los que, eventualmente, colaboraría. En una de las excursiones a la isla de San Jacques, me tocó estar en un muelle viendo las ruinas de las fortificaciones y me encontré a Keiiti Aki; luego de platicar de las guerras y los piratas en esa zona, me extendió una invitación para ir al MIT. Poco después, él recibió la beca Keck (la organización que donó a la NASA un telescopio que está en órbita) y se cambió a la Universidad del Sur de California (USC) en Los Ángeles, donde finalmente terminé visitándolo.

Ahí permanecí tres meses y escribí el mismo número de artículos. Mi estancia en Los Ángeles fue maravillosa, ir a clase con el doctor Aki, acudir a la sala de estudio, conocer a la gente que llegaba a participar con él, como Kojiro Irikura, quien unos años después me invitó a visitarlo en Japón con un financiamiento que consiguió en la Sociedad Japonesa de Promoción de la Ciencia y pues me fui para allá. Ahí trabajé en el DPRI, fui a bibliotecas de las que guardo recuerdos maravillosos. Por ejemplo, ahí descubrí un diagrama que me llevó a una solución matemática nueva, usando funciones de Bessel, trece años después. No aprendí japonés, sólo a decir ciertas cosas. He conservado las redes que hice desde el inicio de mi carrera académica e incluso he continuado colaboraciones con los estudiantes de mis colegas que se han retirado. Tengo varios coautores internacionales, algunos porque me invitan al conocer mis artículos.

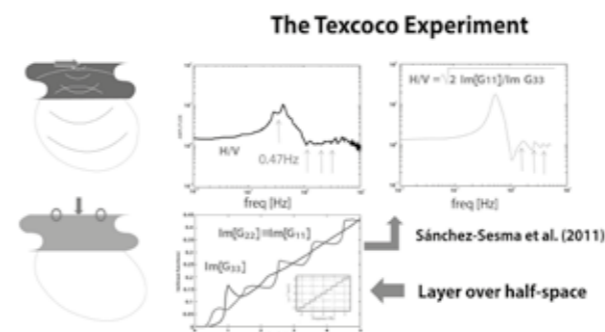


## ¿Cómo ha nutrido su labor científica el estudio y gestión de los sismos?

En realidad, mi enfoque ha sido más bien el modelado matemático de la propagación de las ondas sísmicas con el fin entenderlas y educar la intuición. Los fenómenos sísmicos suelen ser de gran complejidad, pues hay reflexiones, refracciones, difracciones, atrapamientos de energía que ocurren simultáneamente. Los patrones, aun los más sencillos, pueden ser útiles para desentrañar enigmas.

Me tocó participar en los análisis de los registros del temblor de 1985 y trabajar de cerca con Emilio Rosenblueth y un grupo de jóvenes investigadores. La particularidad de ese terremoto es que fue mayor de lo esperado, debemos recordar que la sismología es una ciencia joven. Hay apuntes de sismos en Europa y Japón desde finales del siglo XIX, pero los datos instrumentales de las aceleraciones de movimientos telúricos de gran magnitud apenas llegan a 100 años. Anteriormente se asentaban sólo los temblores lejanos y fuertes, con péndulos Wichert de 17 toneladas, como el que teníamos en Tacubaya, uno de los poquitos que registró el sismo.

Me tocó analizar los datos de las pocas estaciones acelerométricas (unas siete) de la Ciudad de México y con eso se empezó a hacer mucha de la investigación en ingeniería. Nos basamos en los espectros de Fourier, para identificar cuánta energía viene empaquetada en distintas frecuencias. Con ello se sabe si el movimiento es armónico o caótico. Aquí el amo del cálculo es Fourier. Entonces, estudiando los espectros de Fourier de los acelerogramas, que son gráficas de las amplitudes de las ondas en las diferentes frecuencias que componen los registros, podíamos identificar en cuáles se observaban las mayores amplificaciones y su relación con la naturaleza de los suelos. Participé con el doctor Rosenblueth en el cálculo de las especificaciones de diseño. Los niveles de aceleración que se le van a poner a las estructuras si se desea estimar las fuerzas dinámicas que el movimiento sísmico induce en estas.



Con los espectros de los datos que calcularon mis colegas, en aquel entonces yo no contaba con las herramientas y programas para hacerlo, dibujé unas gráficas de promedios con el objetivo de inferir la firma del sacudimiento en su espectro de Fourier. El resultado fue un trapecio que le propuse a don Emilio y le gustó, pues así teníamos el espectro del temblor y, usando la teoría desarrollada por David Boore del USGS de los Estados Unidos, aplicada en ese tiempo por Mario Ordaz en su tesis doctoral, se armó la normativa que dio origen al Reglamento de las Construcciones del entonces Distrito Federal. Mi participación en esta quizá no fue tan intensa como la de otros colegas, pero mi estimación del espectro sobrevivió a distintos escrutinios. El tema de la propagación de ondas sísmicas y los efectos de sitio han sido áreas en las que continúo trabajando.

Después del temblor se consiguieron donaciones de la Fundación ICA y de otras organizaciones para colocar instrumentos de medición de aceleraciones del terreno en la Ciudad de México. La Fundación Javier Barros Sierra, creada por el Dr. Rosenblueth a principios de los setenta, con el dinero que ganó del premio Luis Elizondo que otorga el ITESM, destinó esas donaciones a establecer la Red Acelerométrica de la Ciudad de México (RACM). Para ello, en la Fundación, además del de Prospectiva, se hicieron dos centros más: uno de Investigación Sísmica (CIS) y otro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), de donde más adelante salió el Sistema de Alerta Sísmica (SAS).

El CIRES es ahora independiente y opera con pocos recursos, porque muchas de las entidades (estados de la Federación) no pagan su cuota. Participé en su creación y en este momento soy el presidente del Consejo de Asociados. El SAS ha tenido un desempeño satisfactorio a pesar de las dificultades económicas. El Estado mexicano debería involucrarse más en apoyar dichas tareas.

Puedo decir que mi trabajo es mayormente teórico. Ahora, por primera vez en un proyecto, estoy pidiendo dinero que se utilizará en la compra de instrumentos, tendremos dos o tres aparatos. Normalmente me baso en los datos que calculan otros estudiantes o colegas con vocación para la búsqueda. Yo hago mucha más teoría, ecuaciones y algunas veces simulación numérica sin ser un gran experto sigo programando en Fortran, un lenguaje antediluviano.

Una de las cosas con impacto social de lo que he hecho últimamente es esto del ruido sísmico ambiental. Yo sabía que existía, que hay una vibración de fondo de la Tierra, que el viento y el océano están moviendo la tierra sólida, que el agua del mar interactúa con las costas y con el fondo del mar y transmite vibraciones a la Tierra de manera casi permanente. Estas equivalen a tener un sismo continuo de magnitud 5, los cuales con equipos de hace cinco años eran muy difíciles de detectar. Con el advenimiento de la teoría de campos difusos, suponiendo que el ruido lo es, pude conectar la energía del movimiento promedio del suelo con la función de Green o respuesta impulsiva y modelar los cocientes espectrales H/V, que son de gran utilidad para identificar el periodo dominante del terreno y hacer una buena zonificación sísmica.



## ¿Qué le ha dado la UNAM al doctor Sánchez-Sesma y usted que le ha dado a la UNAM?

La UNAM me ha dado la posibilidad de acceder a una formación gratuita con profesores esplendidos y otros no tan buenos. Eso me permitió estudiar y hacer una carrera académica que, de otra manera, con los recursos que había en casa, no hubiese podido ser. También en ella forje redes de amigos y colegas de distintas formaciones y de todas las clases sociales. Ingresé a la UNAM desde la preparatoria en 1966 y me tocó participar en el movimiento estudiantil del 68, una experiencia riquísima en acción y me hice activista político, queríamos cambiar el mundo.

Debido a lo anterior, como dice la campaña, “¡Cómo no te voy a querer!”. A pesar de sus problemas, es una gran universidad. En palabras de don Javier Barros Sierra: “Es el espejo del mejor México posible”.

Lo que yo le he dado a la UNAM es mi trabajo, mi dedicación y mi entusiasmo. Pienso que es una Institución que debemos cuidar conservar y defender.

Descarga aquí nuestra versión digital.



**Muchas gracias, doctor Sánchez Sesma.**

**Matemáticas para explicar los sismos: la influencia de Friedrich Wilhelm Bessel en la carrera académica de Francisco José Sánchez Sesma**

**Mathematics to explain earthquakes: The influence of Friedrich Wilhelm Bessel on the academic career of Francisco José Sánchez Sesma**

**RESUMEN**

El doctor Sánchez Sesma es un especialista en diseños matemáticos para explicar el comportamiento de los sismos, especialmente en las zonas de cuencas. Desde la propagación de las ondas elásticas y modelado sísmico hasta, recientemente, el ruido sísmico ambiental y los campos difusos, sus trabajos han contribuido en la exploración y estimación del peligro sísmico. Junto con otros investigadores participó en la creación de la normativa para el Reglamento de las Construcciones del entonces Distrito Federal y en el diseño del Sistema de Alerta Sísmica.

Palabras clave: fenómenos sísmicos, funciones de Bessel, ondas elásticas, alerta sísmica.

**ABSTRACT**

*Dr. Sánchez Sesma is a specialist in mathematical models for explaining earthquake behavior, particularly in basin areas. From the propagation of elastic waves and seismic modeling to, more recently, ambient seismic noise and diffuse fields, his work has contributed to the exploration and estimation of seismic hazard. Along with other researchers, he participated in drafting the building codes for what was then the Distrito Federal and in designing the Seismic Alert System.*

*Keywords: Seismic phenomena, Bessel functions, elastic waves, seismic alert.*

