

Aplicación de los sistemas de información geográfica en la ingeniería civil

Ulises Mena H.

Describe los conceptos de los SIG y se comentan algunas de las aplicaciones que ha realizado el área de Ingeniería Civil del IIE para la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación de la Comisión Federal de Electricidad y para la Gerencia de Generación de Luz y Fuerza del Centro.

Antecedentes

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha incrementado notablemente en estos últimos años, gracias a que son un medio de integración de información que ayuda a orientar y a entender algunos de los problemas con mayor impacto, a los que se enfrenta el mundo actual. Es decir, son herramientas que permiten resolver problemas prácticos que van desde la visualización de información geográfica, pasando por el cálculo del movimiento de la tierra, hasta evaluar su impacto en una región susceptible a sismos. En esta primera parte del artículo, se hará una descripción general de los conceptos de los SIG y posteriormente se comentarán algunas de las aplicaciones que ha realizado el área de Ingeniería Civil (GIC) del IIE para la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación de la Comisión Federal de Electricidad y para la Gerencia de Generación de Luz y Fuerza del Centro.

Definición de los sistemas de información geográfica

Los SIG han surgido como una tecnología muy poderosa porque permiten integrar datos y métodos de análisis geográfico tradicionales (como el análisis de superposición de mapas), con nuevos tipos de análisis como el georreferencial y la modelación matemática.

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente en la captura, almacenamiento, análisis, transformación y presentación de toda la información geográfica y sus atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Los SIG son una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y surgió de la necesidad de disponer rápidamente de información, para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.



Figura 1. Principales componentes de un Sistema de Información Geográfica o GIS, por sus siglas en inglés (Mena, 2002).



Figura 2. Representación del mundo real en capas temáticas (Mena, 2002).



Componentes de los SIG

Para comprender mejor cómo se trabaja en un sistema de información geográfico, es importante conocer cuáles son los elementos que lo constituyen. Los principales componentes de un SIG son el *hardware*, el *software*, la información, los recursos humanos y las metodologías para resolver los problemas (Fig. 1).

En conjunto, los componentes de un SIG permiten representar de manera digital los datos geográficos (adquisición, codificación y almacenamiento), manejar de manera eficiente la codificación para editar, actualizar, manejar y almacenar los datos, brindarlos eficientemente para consultas complejas y crear formas de salida compatibles para diferentes usuarios, como puede ser con tablas, gráficas, etc.

Cómo trabaja un SIG

Un SIG almacena información real en capas temáticas, que pueden ser vinculadas junto con la geografía (Fig. 2). A cada objeto contenido en una categoría se le asigna un número único de identificación. Cada objeto está caracterizado por una localización (atributos gráficos con relación a unas coordenadas geográficas) y por un conjunto de descripciones (atributos no gráficos), relacionados por un modelo de datos. El análisis espacial de datos se realiza mediante numerosas operaciones (lógicas y matemáticas) ejecutadas por los SIG y entre ellas los procesos más comunes son la superposición y la reclasificación de mapas.

Conceptos generales de los datos geográficos

La información geográfica contiene una referencia explícita, tal como una coordenada geográfica (longitud y latitud) o coordenada UTM (x,y), y una referencia implícita tal como una dirección, código postal o nombre de extensión de censo. Estas referencias geográficas permiten ubicar aspectos del mundo real, tales como un bosque, ríos, ciudades, etc., y sucesos o eventos naturales, tales como un sismo o huracanes. Estos elementos se consideran datos espaciales o geográficos y se localizan utilizando mapas de la tierra en dos y tres dimensiones.

Coordenadas geográficas

Para representar el mundo real se utiliza un sistema de coordenadas en el cual, la localización de un elemento está dado por los valores de latitud y longitud en unidades de grados, minutos y segundos. La longitud varía de 0 a 180 grados en el hemisferio Este y de 0 a -180 grados en el hemisferio Oeste, de acuerdo con las líneas imaginarias denominadas meridianos (Fig. 3). Mientras que la latitud varía de 0 a 90 grados en el hemisferio norte y de 0 a -90 grados en el hemisferio sur, de acuerdo con las líneas imaginarias denominadas paralelos o líneas ecuatoriales. El origen de este sistema de coordenadas queda determinado en el punto donde se encuentran la línea ecuatorial y el meridiano de Greenwich.

Figura 3. División de la Tierra en meridianos y paralelos.



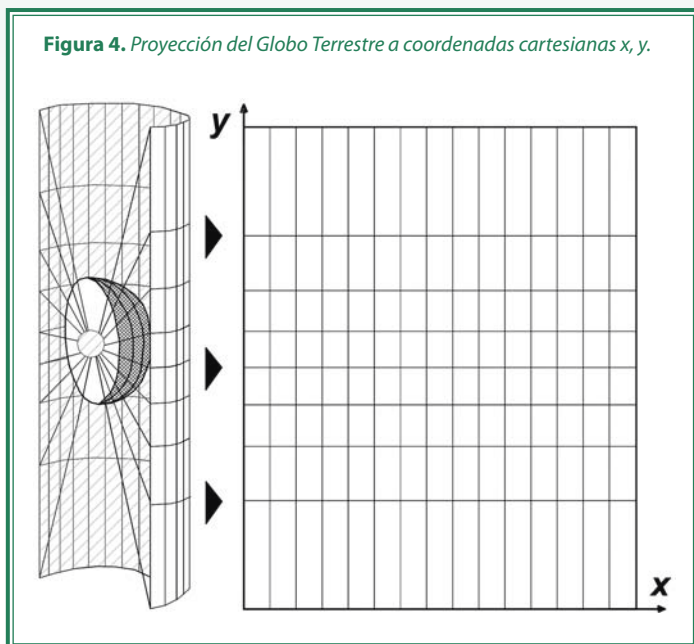
Coordenadas UTM

El Sistema de Coordenadas UTM o Universal Transversal de Mercator, es un sistema de coordenadas basado en la proyección geográfica transversa de Mercator, que se construye como la proyección de Mercator normal, pero en lugar de hacerla tangente al Ecuador, se la hace tangente a un meridiano. A diferencia del sistema de coordenadas tradicional, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros. En el sistema de coordenadas UTM, la tierra se divide de Este a Oeste en 60 husos (separados 6° y numerados del 1 al 60) y de sur a norte en 20 bandas (designadas por letra de la C a la W, separadas 8° y la X por 12°). En el sistema UTM se realizan proyecciones sobre un cilindro transversal hipotético que gira alrededor del eje Norte-Sur. Debido a que la deformación crece a medida que nos separamos del Ecuador, la proyección queda limitada entre los paralelos 84° N y 80° S y se completa con una proyección polar estereográfica para las regiones septentrionales del planeta (UPS).

Proyecciones

La superficie de referencia más usada para la descripción de localizaciones geográficas es una superficie esférica. Esto es válido aun sabiendo que la figura de la tierra se puede modelar más como un elipsoide que como una esfera. Se sabe, sin embargo, que para la generación de una base de datos que permita la representación de elementos correctamente georreferenciados y en unidades de medida comunes como metros o kilómetros, debe ser construida una representación plana.

Figura 4. Proyección del Globo Terrestre a coordenadas cartesianas x, y .



Las propiedades especiales de forma, área, distancia y dirección son conservadas o distorsionadas, dependiendo no sólo de la superficie de proyección (Fig. 4), sino también de acuerdo a su superficie geométrica, entre las que se encuentran las cónicas, cilíndricas y planas. Puesto que cada tipo de proyección requiere de una forma diferente de transformación matemática para la conversión geométrica, cada método debe producir distintas coordenadas para un punto dado.

Funcionamiento de los SIG

La construcción e implementación de un SIG es una tarea siempre progresiva, compleja, laboriosa y continua. Los análisis y estudios anteriores a la implantación de un SIG son similares a los que se deben realizar para establecer cualquier otro sistema de información. Sin embargo, en los SIG hay que considerar las características especiales de los datos utilizados y sus correspondientes procesos de actualización.

Los datos geográficos están organizados precisamente en bases de datos, considerados normalmente como la unión de datos referenciados junto a una descripción específica, que actúan como un modelo de la realidad. Estas bases de datos están compuestas por dos elementos esenciales: la posición geométrica y sus atributos o propiedades.

Los atributos son los datos descriptivos numéricos o alfanuméricos de los elementos geográficos, que representan el mundo real. Mientras que los datos geométricos o datos espaciales permiten modelar los elementos del mundo real, cuya posición es única en un sistema de coordenadas específico. Las formas más usadas para modelar los elementos del mundo real son los puntos, líneas y polígonos en su

representación más básica (datos vectoriales). Sin embargo, existen elementos avanzados para la modelación del mundo real, como son los modelos de superficies (TIN y GRID), elementos CAD, LATTICE e imágenes. Las superficies constituyen una cobertura temática muy importante en las bases de datos geográficas. Estas superficies se pueden utilizar para muchas aplicaciones como son: estudios de visibilidad, cálculos volumétricos, contornos, trazos de relieves sombreados, vistas de perspectiva de modelos 3D, etc.

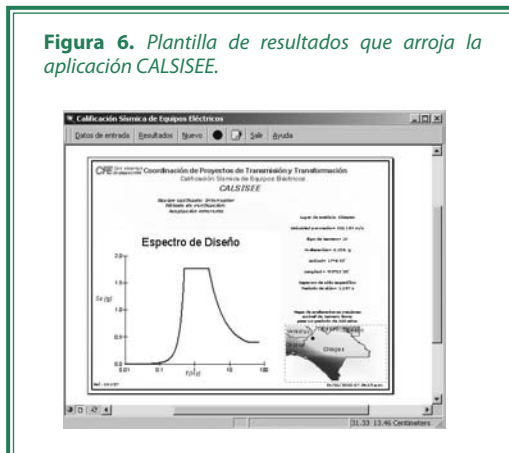
Aplicaciones en Ingeniería Civil

El área de Ingeniería Civil del IIE comenzó a utilizar los SIG desde el año 2004, con la incorporación y manejo del peligro sísmico actualizado de México, a través de una aplicación en ARCGIS llamada CALSISEE; continuando con la administración y ubicación geográfica de las subestaciones eléctricas de la CFE, elaborando la aplicación SIOC-SUB en el mismo sistema y la aplicación del módulo 3D ANALYST para el cálculo del movimiento de tierra, ofrecido a la CFE como un curso de entrenamiento.

Figura 5. Aplicación CALSISEE.



Figura 6. Plantilla de resultados que arroja la aplicación CALSISEE.



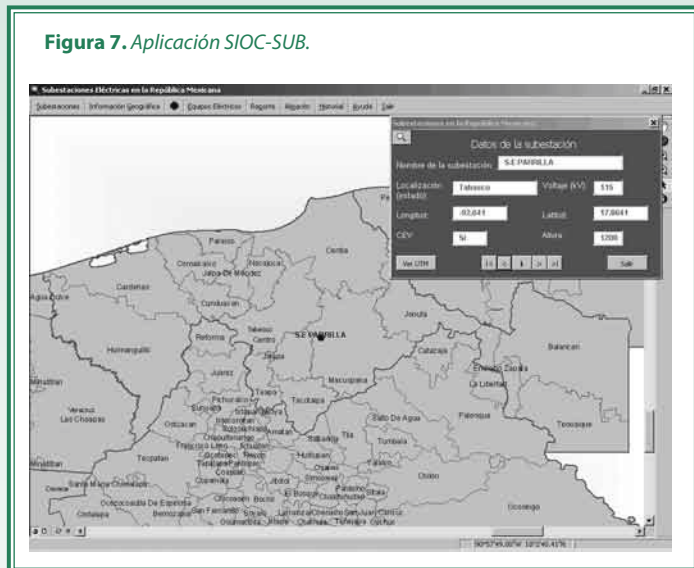
Calsisee

Los sismos de Manzanillo en 1995 y Tecomán en 2003, demostraron que fenómenos de esta naturaleza pueden ocasionar daños importantes a los equipos de las subestaciones eléctricas, causando pérdidas económicas muy altas. Esto se debe a que la reglamentación que controla el diseño sísmico de estos equipos ha sido insuficiente hasta la fecha. Por esta razón y tomando en cuenta la importancia que tienen dichos equipos, la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación de la Comisión Federal de Electricidad solicitó al IIE elaborar unas recomendaciones para el diseño sísmico de equipos eléctricos, con el objetivo de mejorar su desempeño por medio de una calificación sísmica (Fig. 5).

Para realizar dicha calificación de los equipos de las subestaciones eléctricas, se planteó como objetivo principal actualizar el peligro sísmico de México, con información sísmica hasta el año 2004. Con los nuevos mapas también se propuso un nuevo procedimiento para caracterizar el terreno de cimentación y así tomar en cuenta los efectos de sitio, con el fin proponer adecuadamente los espectros de diseño para el equipo que se está calificando. Con el objetivo de facilitar la definición de los niveles de calificación sísmica, que deben cumplir los equipos de subestaciones eléctricas de transmisión de nueva adquisición en México, se planteó como actividad complementaria la implementación de los mapas de peligro sísmico actualizados, para los periodos de retorno de 100, 200 y 500 años, junto con el procedimiento para caracterizar el sitio y el cálculo de los espectros de diseño dentro de un sistema de información geográfica.

Para esto se desarrolló la aplicación CALSISEE (**CAL**ificación **SIS**mica de **EQUI**pos **ELÉ**ctricos) en el sistema de información geográfica ARCGIS, utilizando el lenguaje de programación VBA. Esta aplicación se desarrolló de tal forma que su estructura fuera amigable, facilitando la introducción de los datos para la calificación sísmica de los equipos eléctricos y la visualización de los resultados. Los mapas de peligro sísmico se construyeron basándose en el mapa de la República Mexicana con coordenadas geográficas, el cual, además, contiene la división de los estados y municipios del país.

Figura 7. Aplicación SIOC-SUB.



3D Analyst

El módulo 3D Analyst ofrece a los usuarios de los SIG una efectividad en la visualización y análisis de datos de superficie. Utilizando el módulo 3D Analyst, se pueden ver superficies desde diferentes puntos de vista, realizar consultas, determinar la visibilidad desde una posición sobre la misma y crear una perspectiva realista de una imagen, superponiendo datos *raster* y vectoriales sobre una superficie. Esto se puede lograr a través de la generación de modelos de superficie, los cuales representan un fenómeno espacial que puede ser medido continuamente, sobre alguna parte de la tierra, siendo probablemente la elevación del terreno el ejemplo más representativo. Normalmente, los modelos de superficie en 3D se llaman modelos digitales del terreno o DEM (Digital Elevation Model). Los DEM representan la generalización de una realidad, sea cual sea el fenómeno que representen. A menudo se requieren de varios modelos de superficie para resolver un problema. Por ejemplo, para ubicar la mejor posición de una cabaña, se requieren modelos de superficie de la topografía, la exposición a la luz solar y la vegetación, entre otros factores.

El módulo 3D Analyst utiliza dos tipos de elementos para representar una superficie, éstos son: los GRID (cuadrícula de espacios geográficos) y los TIN (red de triángulos irregulares). En ambos casos, los valores se interpolan para crear una superficie continua utilizando diversos modelos matemáticos, entre las que se encuentran los métodos IDW, SPLINE, KRIGGING y TREND.

Aplicaciones del módulo 3D Analyst

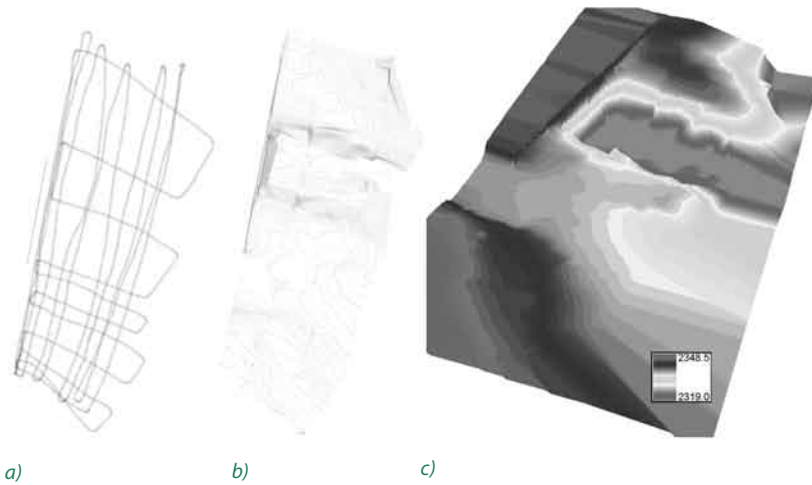
Se realizó un estudio para la Gerencia de Generación de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, el cual consistió en la evaluación de la estabilidad de la presa de Tepuxtepec, siendo una de las actividades del proyecto la realización de un levantamiento batimétrico, para conocer la configuración topográfica del fondo de la presa. Este levantamiento también permitió determinar la profundidad del tirante de agua y el ángulo del talud, con lo cual se podrá calcular la altura del azolve existente en la zona cercana a la cortina. La altura del azolve se utilizará para calcular las presiones hidrodinámicas a las que está sometida la cortina, debido al empuje provocado por el azolve. El estudio se realizó utilizando una ecosonda, la cual proporciona puntos con la distancia del fondo de la presa a

El resultado se proporciona a través de una plantilla (Fig. 6) con los datos que se introdujeron para la calificación sísmica, la zona geográfica de estudio y el espectro de diseño que debe usarse en los análisis de los equipos eléctricos.

SIOC-SUB

En una segunda aplicación con sistemas de información geográfica, la Coordinación de Proyectos de Transmisión y Transformación de la Comisión Federal de Electricidad solicitó nuevamente al IIE elaborar un procedimiento detallado que permita la captura de la infraestructura que integra una subestación eléctrica ya existente, para que quede almacenada en el sistema de información geográfica ARCVIEW y pueda consultarse. Por tal motivo, se elaboró la aplicación SIOC-SUB (Fig. 7), utilizando el lenguaje de programación VBA (Visual Basic For Applications), propio de ARCGIS. Esta aplicación se desarrolló en forma similar al programa CALSISEE, para que sea amigable y de fácil entendimiento.

Figura 8. a) Datos proporcionados por la ecosonda; b) Curvas de nivel del fondo de la presa y c) Modelo digital del terreno del fondo de la presa.

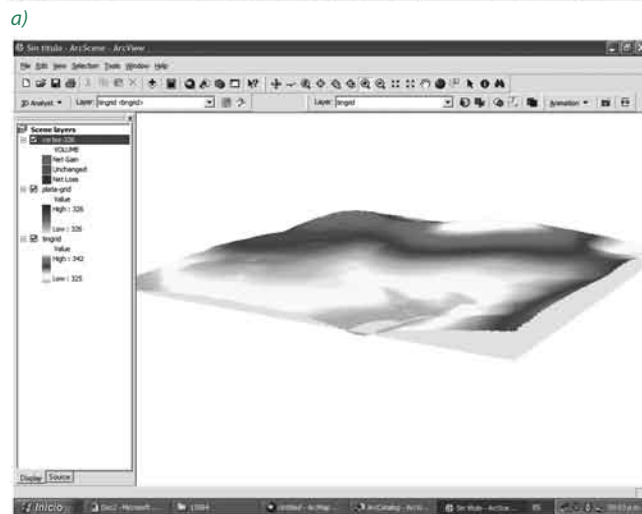
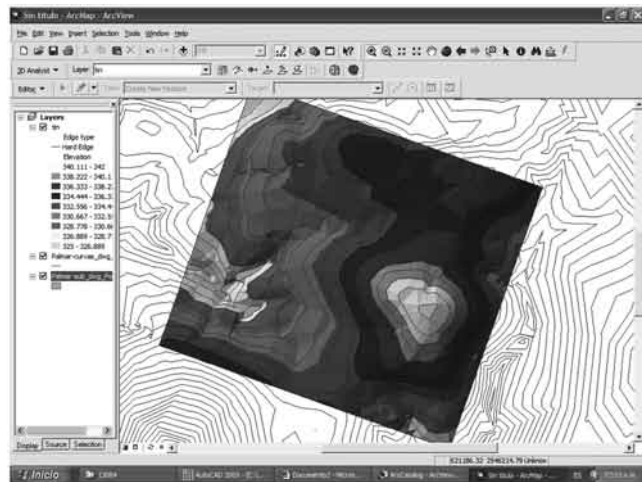


la superficie (Fig. 8a). Para poder visualizar la configuración interna de la presa, se procedió a construir un modelo digital del terreno, transformando los puntos de la batimetría a curvas de nivel (Fig. 8b) y posteriormente a un modelo GRID, dando como resultado la Fig. 8c, la cual permite visualizar en forma más clara el fondo de la presa.

Procedimiento para el cálculo del movimiento de tierra

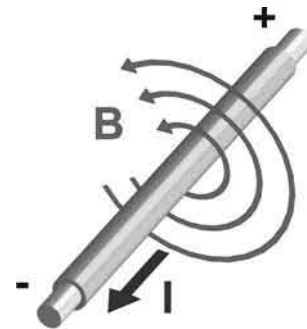
Una parte fundamental en el diseño conceptual de una obra civil (camino, fábricas, aeropuertos, etc.) es poder conocer cuál será el movimiento de tierra que deberá realizarse en la zona donde se planea construir. Esto evidentemente, dependerá de la topografía del sitio y de la extensión que la obra civil abarcará. Una aplicación muy poderosa de los SIG es el cálculo de volúmenes, a partir de un modelo digital de terreno.

Figura 9. a) Modelo digital del terreno y b) Planos utilizados para el cálculo del movimiento de tierra.



Para ejemplificar este procedimiento, en la Fig. 9a se muestra la construcción de un modelo digital del terreno a partir de curvas de nivel, utilizando elementos TIN. En la Fig. 9b se muestra el modelo digital visto en tres dimensiones, junto a una superficie plana que servirá como referencia de nivel, a partir del cual se desplantará la obra civil. Finalmente, la operación de *cut/fill* entre dos superficies, proporciona una imagen con las zonas de corte y relleno, y una tabla con los valores de áreas y volúmenes, los cuales determinan el movimiento de tierra que se requiere para la obra civil (Fig. 10).

Figura 10. Resultados del movimiento de tierra.



Conclusiones

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han demostrado ser una herramienta valiosa para la administración, consulta, visualización y análisis de datos, y por ende para su aplicación en temas relacionados con la Ingeniería Civil. Las aplicaciones elaboradas en los proyectos mencionados se están utilizando para los fines solicitados, en donde incluso se está trabajando en nuevas aplicaciones, como es el manejo de mapas de viento, análisis de riesgos por huracanes, etc. Finalmente, estos proyectos sólo han permitido vislumbrar el amplio rango de aplicaciones que tienen los SIG, en donde se espera que el área de Ingeniería Civil del IIE siga trabajando.

Referencias

ESRI (1994). *Arclnfo, Map Book 1993*, Environmental System Research Institute, Inc., Redlands, California.

Mena, U. (2002). *Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas*, Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Ulises Mena Hernández

Ingeniero Civil por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla en 1983. Maestro en Ingeniería con la especialidad en Estructuras, por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en 1995 y Maestro y Doctor en Ingeniería por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), España, en 1996 y 2002 respectivamente.

Durante su estancia en la UPC, participó en el desarrollo de diversos proyectos financiados por la Comunidad Europea y colaboró con el Instituto Cartográfico de Cataluña en la Unidad de Geología; con la Universidad Politécnica de Valencia en el Departamento de Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría y con el Instituto de Investigación en Riesgo Sísmico (IRRS-CNR) en Milán, Italia.

Desde 2002 labora en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, realizando trabajos de investigación y desarrollo dentro del sector energético a través de la dirección de proyectos, contribuyendo a la solución de problemas en el área de ingeniería civil, fortaleciendo al grupo de trabajo y formando recursos humanos en el marco de becarios del IIE. Las líneas de investigación que desarrolla son riesgo sísmico de líneas vitales; instrumentación sísmica; inspección de daño en estructuras de concreto, entre otras.

Ha publicado diversos artículos en revistas internacionales y ha participado como expositor en varios congresos también internacionales. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel Candidato.

umena@iie.org.mx