

Cómo citar este artículo:

Polo Friz, E. G. (2023). Geotecnia y Arquitectura. Consideraciones sobre el paradigma actual en geotecnia y sus posibles desarrollos futuros. *Project, Design and Management, Monográfico* (2023), 57-65. doi: 10.35992/pdm.5vi1.1843.

**GEOTECNIA Y ARQUITECTURA. CONSIDERACIONES SOBRE
EL PARADIGMA ACTUAL EN GEOTECNIA Y SUS POSIBLES
DESARROLLOS FUTUROS**

Emilio Gastón Polo Friz

Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina)

emilio_polo@hotmail.com · <https://orcid.org/0000-0001-9283-5790>

Resumen. La comprensión del comportamiento del suelo es un elemento clave para el desarrollo tanto de obras de arquitectura, como de infraestructuras urbanas; ya que la mayor parte de los fallos en las construcciones, están relacionados con el desconocimiento relativo de la naturaleza del suelo. Teniendo en consideración la naturaleza heterogénea y compleja del suelo, ¿puede la geotecnia -según estándares actuales- lograr una comprensión de la dinámica terreno/obra construida? ¿o se requiere un cambio de paradigma con aporte de otras disciplinas, que permitan articular modelos más complejos y precisos? Siendo el objetivo de la presente investigación, el de explorar el paradigma actual en mecánica del suelo y exponer posibles escenarios futuros superadores para la disciplina, desde un diseño metodológico de tipo cuantitativo-cualitativo y utilizando técnicas de recopilación de datos; sistematización sobre un Sistema de Información Geográfica (GIS); con determinación de rasgos característicos -con análisis interpretativo y descriptivo- de la estructura soporte, se buscó determinar los rasgos característicos de los diferentes tipos de suelos encontrados en la ciudad de Mar del Plata, República Argentina, estableciendo zonas de caracterización geotécnica diferenciada. En la actualidad, existen líneas de investigación que buscan el desarrollo de modelos matemáticos que permitan describir un comportamiento realista del suelo; donde, en lo que refiere a la carencia de datos -siendo importante destacar que, si bien en la actualidad existe una gran cantidad de datos disponibles de diverso origen disciplinar, dicha información no se transversaliza e interrelaciona- la incorporación y sistematización de los mismos, sigue siendo la mayor dificultad.

Palabras clave: Planificación Urbana, instrumentos de gestión, políticas públicas, geotecnia y mecánica de suelos.

GEOTECHNICS AND ARCHITECTURE. CONSIDERATIONS ON THE CURRENT PARADIGM IN GEOTECHNICS AND ITS POSSIBLE FUTURE DEVELOPMENTS

Abstract. Understanding the behavior of the soil is a key element for the development of both architectural works and urban infrastructures; since most of the failures in the constructions are related to the ignorance relative to the nature of the soil. Taking into account the heterogeneous and complex nature of the soil, can geotechnics -according to current standards- achieve an understanding of the dynamics of the terrain/construction? Or is a paradigm shift required with contributions from other disciplines that allow more complex and precise models to be articulated? The objective of this research is to explore the current paradigm in soil mechanics and expose possible future scenarios for the discipline. From a quantitative-qualitative methodological design and using data collection techniques; systematization on a Geographic Information System (GIS); With determination of characteristic features -with interpretive and descriptive analysis- of the support structure, we sought to determine the characteristic features of the different types of soils found in the city of Mar del Plata, Argentina, establishing zones of differentiated geotechnical characterization. At present, there are lines of research that seek the development of mathematical models that allow describing a realistic behavior of the soil; where, with regard to the lack of data -it is important to highlight that, although there is currently a large amount of data available from different disciplinary origins, said information is not mainstreamed and interrelated- the incorporation and systematization of the same, remains the greatest difficulty.

Keywords: Urban planning, management instruments, public policies, geotechnics.

Introducción

La comprensión del comportamiento del suelo es un elemento clave para el desarrollo, tanto de nuestras obras de arquitectura como para las infraestructuras de ingeniería civil que requiera una ciudad o región; ya que, como indica Brandl (2004) el 80-85 por ciento de los fallos en las construcciones están relacionados con cambios en la dinámica de la estructura soporte, su comportamiento y las tensiones emergentes que se puedan dar con las construcciones que sobre él se asientan.

Es así que, cualquier incertidumbre relativa a naturaleza del suelo, las condiciones geotécnicas de una ciudad, o la dinámica entre la obra construida y el territorio sobre la cual se asienta, se deben principalmente a la dificultad en la obtención y análisis de datos del subsuelo y su interacción con las construcciones. Es por ello que, en los últimos años, la gestión estratégica del subsuelo ha llegado a representar un tema de relevancia para el desarrollo de las ciudades, constituyéndose un nuevo campo interdisciplinario conocido como "Geo-ciencias urbanas".

La ciudad de Mar del Plata -Provincia de Buenos Aires, República Argentina-, al igual que gran parte de las principales capitales en Latinoamérica, ha desarrollado su planificación urbana sin tener en consideración factores básicos de estructuración territorial, como son la geología y la geotecnia; desconociendo así, sus áreas vulnerables y/o sectores de potencial riesgo geotécnico.

En tal sentido, la ausencia de un conocimiento fundamentado y sistematizado sobre el comportamiento del suelo marplatense, dificulta en sobremanera la correcta implementación de instrumentos tanto para el diseño y ejecución de políticas municipales de desarrollo, así como la adecuada implantación de obras -de arquitectura y de ingeniería civil de mediana y alta complejidad-.

En base a la problemática expuesta, el Arq. Emilio Polo -autor del presente trabajo- viene desarrollando su tesis doctoral en la FAUD-UNMdP, la cual tiene por objeto -a partir de la recopilación de datos existentes y su sistematización sobre un Sistema de Información Geográfica (GIS)- determinar los rasgos característicos de los diferentes tipos de suelos presentes en la ciudad de Mar del Plata; estableciendo zonas de caracterización geotécnica diferenciada (áreas con potencial de desarrollo urbano, zonas de riesgo geotécnico, etc.) con el objeto de ofrecer nuevo conocimiento en el campo de la geotecnia local, centrado en las dinámicas propias del suelo marplatense, su interacción con la obra arquitectónica -construida y a construir- y las diferentes alternativas de cimentación utilizada. Como parte de este trabajo, y en base a las limitaciones conceptuales halladas sobre el conocimiento del comportamiento del suelo -y teniendo en consideración su naturaleza heterogénea y compleja-, ¿puede la geotecnia -según sus estándares actuales- lograr una comprensión acabada de la dinámica terreno/obra construida? ¿o se requiere un cambio de paradigma que se nutra desde las diversas disciplinas y que permita articular modelos más complejos y precisos?

Método

La investigación desarrollada, desde un diseño metodológico de tipo cuantitativo-cualitativo con análisis interpretativo y descriptivo, ha utilizado técnicas relacionadas con la recopilación de datos (estudios de suelo, imágenes satelitales, información georeferenciada, etc.); sistematización de información sobre un Sistema de Información Geográfica (GIS); y determinación de rasgos característicos de la ciudad de Mar del Plata; estableciendo sobre esta, zonas de caracterización geotécnica diferenciada (zonas con potencial de desarrollo urbano, zonas de riesgo geotécnico, etc.).

Para el presente artículo, se ha abordado una metodología de tipo descriptiva e interpretativa de análisis documental sobre fuentes secundarias, donde se analiza la evolución de la geotécnica como ciencia en el devenir del tiempo, así como el desarrollo de sus principios y cambios de paradigma. Como establecen Denzin y Lincoln (2017), la integración de los instrumentos metodológicos, lo documentado, lo observado y lo conversado, desembocan en la recursividad de procesos de análisis, síntesis e interpretación que habilitan diferentes perspectivas sobre una misma realidad.

Resultados

La ciencia del suelo, busca la comprensión de su propia naturaleza, de sus propiedades, dinámicas y funciones como parte de un sistema multidimensional que abarca aspectos físicos, químicos y mecánicos, pero que también analiza -o debiera analizar- el impacto de los aspectos sociales, de desarrollo urbano, económicos y territoriales, en relación de cómo los mismos influyen o afectan en su comportamiento como estructura de soporte.

En este contexto, no podemos desconocer que la dinámica de los suelos es compleja debido a su naturaleza heterogénea y diversa, donde su composición estructural originante coexiste con variables endógenas y exógenas que condicionan su respuesta -afectando su desempeño, en términos geotécnicos-. La interacción de las partículas sólidas con el fluido intersticial -que generalmente está compuesto por más de un fluido:

agua, contaminantes orgánicos e inorgánicos, gases, etc.-, desencadena comportamientos diferenciados dependiendo de la variación de los niveles de humedad, forma y estructura de las partículas granulares, heterogeneidad de las mismas, confinamiento, etc.; donde, las actividades humanas -procesos de urbanización, transformación del paisaje/territorio natural, incorporación o modificación de “cargas” a partir de la construcción de obras de arquitectura o ingeniería- afectan las condiciones originales del suelo, transformándolo.

A lo largo de la historia, como parte de este proceso de comprensión de la mecánica del suelo, ha existido una permanente preocupación por “dar una explicación” sobre los fundamentos de su comportamiento. Desde la consideración de los fallos como “actos de Dios” (Morley, 1996) hasta la aplicación de la “ley del talión” en el Código de Hammurabi -desde un principio jurídico de justicia retributiva, que han sentado las bases de los códigos actuales-, hasta el desarrollo de la geotecnia como ciencia en la última parte del siglo XIX y primera mitad del siglo XX. Donde, durante el siglo XVIII, podemos encontrar el desarrollo de los primeros modelos numéricos teóricos que pretenden explicar el comportamiento de las estructuras utilizando conceptos deterministas.

Pero, no es hasta la segunda mitad del siglo XX, con la incorporación de conceptos probabilistas, que se comienza a cuestionar el determinismo; donde la obra construida -o a construir- comienza a ser desarrollada teniendo en cuenta un contexto donde los aspectos físico-constructivos de la materialidad -donde se encuentra ubicada la estructura de soporte que conforma el territorio- son dinámicos y pasibles de cambio.

En este sentido, como propone Antonio Gens Solé (2005) en su discurso ante la Real Academia Europea de Doctores, aportes como los realizados por Coulomb (1736-1806) con el cálculo de los empujes del terreno sobre muros y el análisis de los fenómenos de rozamiento; las contribuciones de Rankine (1820-1872) con el desarrollo de sus investigaciones sobre estados de equilibrio límite en una masa de tierra semi-infinita; y la contribución de Boussinesq (1842-1929) con la solución del problema elástico de una carga puntual colocada sobre un semiespacio elástico isótropo semiinfinito; así como otros investigadores como: J.R. Perronet (1769) que aporta el primer estudio sobre estabilidad de taludes; G.C. Prony (1802), J.F. Français (1820), C.V. Poncelet (1840) y C. W. Hope (1845) quienes trabajan sobre empujes de tierra y muros; A. Collin (1846) que descubre la resistencia al corte sin drenaje de las arcillas; H.P.J. Darcy (1856) que propone la ley de flujo en medio poroso que ha resistido todos los embates del paso del tiempo; O. Reynolds (1887) que descubre la dilatación de las arenas; permiten sentar las bases de la Geotecnia como ciencia en los albores del siglo XX.

La comprensión -y formulación del principio- de los esfuerzos efectivos para suelos saturados planteada por Terzaghi en los años 20, fue uno de los grandes aportes a la disciplina, donde la consideración del suelo como material poroso (a diferencia de Coulomb y Rankine que lo consideraban como un sólido) le permitió avanzar donde estos no pudieron. Siendo el mismo Terzaghi, a partir de sus numerosas publicaciones -producidas entre los años 1936 y 1961- que abordan la desconexión existente entre los códigos y normas de la época con las fundamentaciones técnicas (lo que Terzaghi llama “el viejo código” en referencia a las ideas de principios del siglo XX), el que plantea un primer cambio de paradigma que lo acerca a la disciplina como ciencia.

El principio de tensiones efectivas implicó -para el momento- una gran unificación de los aspectos hidráulicos y mecánicos del comportamiento del terreno, pero aún se consideraba por separado la rotura (desarrollos a partir de los trabajos de Coulomb y Rankine) lo que no permitía integrar el comportamiento del terreno como un todo coherente. En busca de este objetivo, el grupo de Geotecnia de la Universidad de

Cambridge (Roscoe, Schofield y Wroth en los '60) se propuso lograr un modelo unificado que permitiera vincular los aspectos del comportamiento del terreno que -para ese momento- constituían entidades separadas, donde se incorpora el concepto de estado crítico y luego, el concepto de fase fluida mixta y suelos no saturados (Bishop, Aitchinson, Fredlund y Morgenstern en la segunda mitad de los '60).

Para esa misma época -1968-, Roscoe y Burland proponían el modelo Cam-clay Modificado que corregía algunos defectos importantes del Cam-clay original, dando origen a los modelos de estado crítico. Estos modelos permitían considerar una gran cantidad de las características de comportamiento del suelo de una forma unificada, conceptos como rotura, deformación, cambios de volumen, memoria del suelo, consolidación, estado crítico podían integrarse en un modelo que permitía comprensión más global del comportamiento del terreno.

Si bien es cierto que el paradigma representado por los modelos de estado crítico ha sido capaz de caracterizar en forma satisfactoria algunos de los comportamientos más comunes de los suelos, cuando se observa el comportamiento real de muchos suelos naturales, nos encontramos que el modelo Cam-clay es a menudo demasiado simplificado, necesitando una amplificación para su utilización efectiva.

En este sentido, las distintas clasificaciones de suelos existentes en la actualidad, tienen por objeto describir e integrar las principales características y comportamientos del suelo según las necesidades de las diferentes actividades o disciplinas -construcción de caminos y pavimentos, agricultura, minería, geomecánica, geología, etc.-, no lográndose hasta el momento una clasificación general unificada.

Algunas de las clasificaciones que se pueden referenciar son:

- 1) El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos -SUCS-.
- 2) El Sistema de la American Association of State Highway & Transportation Officials -AASHTO-.
- 3) El método propuesto por la Federal Aviation Administration -FAA-.
- 4) El sistema de US Department of Agriculture -USDA-.
- 5) y la taxonomía del Eurocódigo, entre otros.

En la actualidad, existen diversas líneas de investigación que buscan el desarrollo de modelos matemáticos que permitan describir un comportamiento realista del suelo, enfrentándose en gran medida -estos sistemas-, a la imprevisibilidad producto de la incertidumbre producto de la variabilidad de acción del material, según el cambio de las condiciones a las que se halla inmerso -cambios de niveles de humedad, mayores cargas, etc.-.

Según lo que establecen Baecher & Christian (2003), las fuentes de incertidumbre, en general, pueden venir en tres categorías principales:

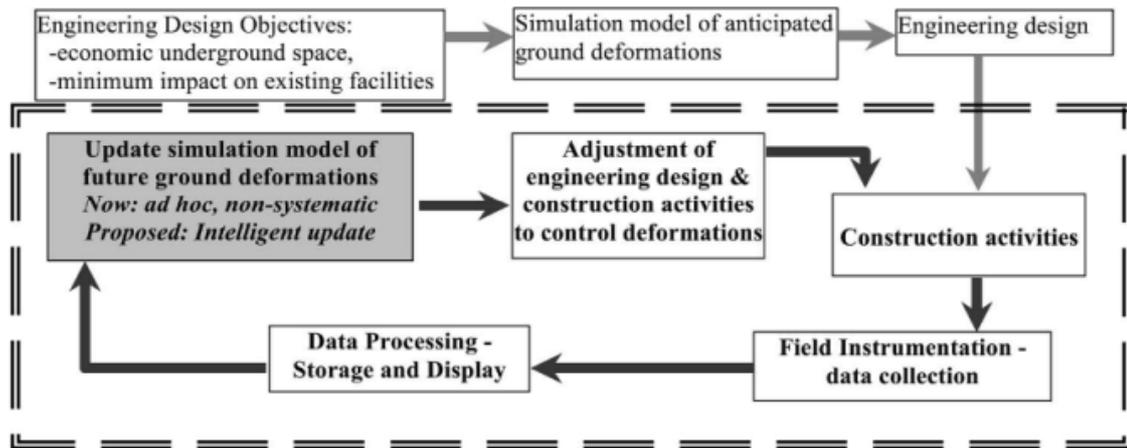
- Aquellas relacionadas con la variabilidad natural.
- Las relacionadas con la incertidumbre epistémica.
- Aquellas relacionadas con los modelos de decisión.

Donde la primera categoría está relacionada a la variabilidad del comportamiento del material suelo producto de su heterogeneidad y dinámicas de cambio.

La incertidumbre epistémica referida a la carencia de datos o falta de entendimiento de los procesos físicos emergentes; donde la incertidumbre en los modelos de decisión está determinada por la metodología de interpretación de datos y el logro de instrumentos que produzcan modelos que produzcan comportamientos realistas.

Figura 1

Procedimiento sistemático del método observacional



Nota. Fuente: Hashash, Marulanda, Ghaboussi, & Jung (2006).

En este sentido, cualquier incertidumbre relativa a las condiciones geológicas y geotécnicas se debe principalmente a las dificultades para la obtención, selección y sistematización de datos del subsuelo, su heterogeneidad y su dinámica mecánica. Por lo tanto, un enfoque multidisciplinario para el análisis de datos, se convierte en esencial.

En consonancia con este marco de acción, en los últimos años, la gestión estratégica del subsuelo de las ciudades ha llegado a representar un tema de relevancia para el desarrollo de las ciudades, constituyéndose un nuevo campo interdisciplinario conocido como "Geo-ciencias urbanas". Esta nueva disciplina estudia los ambientes geológicos de las ciudades con el fin de proporcionar una base científica para un uso racional en la planificación y desarrollo de la ciudad.

Donde, el avance de la ciencia geotécnica, además de la necesidad de proponer un sistema global de clasificación de suelos, se encuentra ante el enorme desafío de desarrollar nuevos modelos predictivos realistas que logren imitar -en forma precisa- el comportamiento de los suelos naturales y/o modificados, en cada una de sus condiciones -saturados, no saturados- teniendo en consideración las influencias del entorno medioambiental, agentes externos e internos, etc., así como su interacción con el objeto construido -obra de arquitectura / ingeniería civil-.

Discusión y conclusiones

La complejidad de la naturaleza del suelo -y la dinámica de su comportamiento emergente, producto de factores extrínsecos e intrínsecos- ha hecho que el avance del

entendimiento de la misma -en términos globales- haya sido limitado, a pesar incluso de las nuevas herramientas con la que se dispone en lo que refiere a métodos exploratorios.

Actualmente, la mayoría de las prospecciones se basan en perfiles unidimensionales verticales, donde la información obtenida es parcializada y de uso local -y/o regional en el mejor de los casos-, donde la integración de la información a través de su sistematización, en base de datos inteligentes, está muy lejos de ser extendida.

La integración de información cuantitativa, información observacional, de modelos matemáticos -descriptivos y predictivos-, es una línea de investigación abordada en forma limitada y que podría aportar grandes avances a la comprensión y desarrollo de instrumentos predictivos del comportamiento realista de la dinámica de los suelos-. En la actualidad -y gracias a la masividad de los medios digitales en todas sus formas- existe una gran cantidad de datos disponibles de diverso origen disciplinar, que describen o aportan información sobre el suelo en perspectivas multidimensionales -físicas, químicas, mecánicas-; esta información, muchas veces no es tenida en cuenta ya que no se sistematiza, transversaliza e interrelaciona en sistemas unificados de uso global.

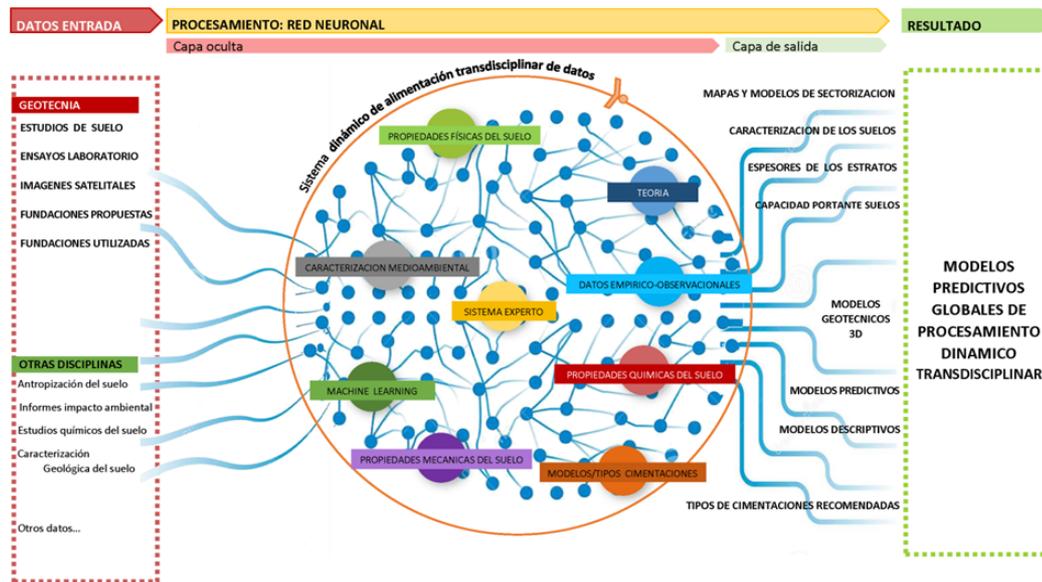
En la era de las tecnologías informáticas, el uso de la Inteligencia Artificial -desde su aporte en lo que refiere al aprendizaje automático (machine learning), el reconocimiento de patrones (pattern recognition) y el aprendizaje profundo (deep learning)- emerge como un instrumento indispensable para vincular los comportamientos de suelo en términos macroscópicos, con los micros y nano; lo local, con lo regional y global; la teoría científica con lo empírico-observacional; proponiendo -o requiriendo- nuevos sistemas de medición, donde la información obtenida se sistematice en modelos dinámicos tridimensionales de alcance global.

En este sentido, los algoritmos de I.A. ya han sido utilizados con gran éxito en diversos campos de la disciplina, como establecen Levasseur, Malécot, Boulon, & Flavigny (2008) para la caracterización de suelos a partir de ensayos de dilatómetro; en el análisis de parámetros de resistencia de macizos rocosos, según Ling, Zhang, Zhu, & Tang (2008); para el análisis de presas de tierra, como refieren Yuzhen, Bingyin, & Huina (2007); o como refieren LI & otros (2006) para el análisis en túneles; entre muchas de las diversas aplicaciones posibles.

Estos sistemas de Inteligencia Artificial permiten interrelacionar en un único instrumento, componentes tan disímiles como lo empírico -que emerge de la práctica y la observación del medio natural y su comportamiento-; lo teórico -como base científica-; los modelos descriptivos de los tipos posibles de suelos y la caracterización de los mismos; los modelos matemáticos y predictivos; las dinámicas emergentes entre las características físicas, mecánicas y químicas; donde dicho instrumento, puede y debe -preferentemente, a fin de obtener modelos más completos, complejos y cercanos a la realidad- ser alimentado con datos dinámicos desde las diversas disciplinas cuyo objeto de estudio es el suelo, o su interacción con el mismo.

Figura 2

Esquema de estructuración de Inteligencia Artificial específico para el desarrollo geotécnico, de tipo neuronal con incorporación de información transdisciplinar



Nota. Elaboración Propia.

Bibliografía

- Bárcena, A. y Romo, M.P. (1994). *RADSH: Programa de computadora para analizar depósitos de suelo estratificados horizontalmente sujetos a excitaciones dinámicas aleatorias*. Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Baecher, C. & Christian, J.T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. England. John Wiley & Sons.
- Cal, Y. (1995). Soil Classification by Neural-Network. *Advances in Engineering Software*, 22(2), 95-97
- Brand, E.W. (1981). Investigations for the restoration of the Phra Pathom Chedi pagoda. In *Proc. 10th. Int. Conf. Soil. Mech.* Stockholm, (pp. 853-854).
- Brandl, H. (2004). *The Civil and Geotechnical Engineer in Society: Ethical and Philosophical Thoughts, Challenges and Recommendations*. The Deep Foundations Institute, Hawthorne.
- Casagrande, A. (1960). Translation of Introduction to Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage (1925). In *From theory to practice in soil mechanics*. Wiley, New York.
- Cook, G. (1951). Rankine and the theory of earth pressure. *Géotechnique*, 2, 271-279.
- Denzin, N. & Lincoln, Y. (2017). *El arte y la práctica de la interpretación, la evaluación y la presentación*. Gedisa Editorial.
- Forero Dueñas, C. (1994). Conceptos y Metodología Básica de Zonificación Geotécnica. In *V Congreso Colombiano de Geotecnia*. Medellín.

- García, S.R., Romo, M.P., Figueroa-Nazuno, J. & Ramos, A. (2001). A RPs Approach for the Modelling of Mexico City Ground Motions. In *12th European Conference on Earthquake Engineering*. Elsevier Science Ltd.
- Gardner, M.W. & Dorling, S.R. (1998). Artificial neural networks (The multilayer perceptron) - A review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment*, volume 32 (14/15), 2627- 2636.
- Goh, A. T. C. (1994). Seismic Liquefaction Potential Assessed by Neural Networks. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(9), 1467-1480
- Goh, A. T. C., Wong, K. S., & Brons, B. B. (1995). Estimation of Lateral Wall Movements in Braced Excavations Using Neural Networks. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(6), 1059-1064.
- Kurkova, V. (1992). Kolmogorov theorem and multilayer neural networks. *Neural Networks*, 5(3), 1-5.
- Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1968). *Soil Mechanics*. Wiley. N.Y.
- Levasseur, S. (2008). *Analyse Inverse en Géotechnique; développement d'une méthode a base d'algorithmes génétiques*. Grenoble.
- LI, X. (2006). *Intelligent Back Analysis of Tunnel Rock Displacement and Its Application*. Underground Space.
- Ling, X., Zhang, F., Zhu, Z., & Tang, L. (2008). *Estimating mechanics parameters of rock mass based on improved genetic algorithm*. IEEE.
- Millar D L and Clarici E, (1994). Investigation of Backpropagation Artificial Neural Networks in Modeling the Stress-Strain Behavior of Sandstone Rock. In *IEEE International Conference on Neural Networks*. IEEE Service Center.
- Romo, M. P., Rangel, J. L., Flores, O., & García, S. R., (1998). Aplicación de redes neuronales artificiales a la geotecnia. In *XIX Reunión nacional de Mecánica de Suelos*. Puebla, México, 418-427.
- Santamarina, J.C. (2003). Creativity and Engineering-Education Strategies. In *Int. Conference on Engineering Education in Honor of J.T.P. Yao*, Texas (pp. 91-108).
- Santamarina, J.C. (2006). Geotechnology: Paradigm shifts in the Information Age. In *GeoCongress 2006 Geotechnology in the Information Age*. LG Baise, Eds.
- Sarmiento, N. (2001). *Evaluación de la respuesta sísmica en el Valle de México aplicando redes neuronales artificiales*. [Tesis de Maestría], DEPMI, UNAM, México
- Savioli, C. (1978). *El Suelo y las Cimentaciones*. Espacio Editora.
- Solé, A. G. (2005) *Geotecnia: Una Ciencia para el Comportamiento del Terreno*. Real Academia Europea de Doctores.
- Wong, F., Tung, A., & Dong, W. (1992). *Seismic hazard prediction using neural nets*. In *10th World Conference on Earthquake Engineering*, (pp. 339- 343).
- Yuzhen, Y., Bingyin, Z., & Huina, Y. (2007). An intelligent displacement back-analysis method for earth-rockfill dams. *Computers and Geotechnics*, 423-434.
- Zurada, J.M. (1992). *Introduction to artificial neural systems*. West Publishing, St. Paul.