SOBRE LA TEORÍA MATEMÁTICA DE LAS CATÁSTROFES Y EL ESTUDIO DE LOS TERREMOTOS

ON THE MATHEMATICAL THEORY OF CATASTROPHES AND THE STUDY OF EARTHQUAKES

Ricardo Ceballos Garzón [1]
Coordinador de Investigación, Candidato Doctoral Fundación Universitaria San Mateo, Universidad Central de Venezuela, FUSM, UCV, Colombia - Venezuela

RESUMEN

Se analiza como la Teoría Matemática de las Catástrofes Elementales puede contribuir en el entendimiento de la fenomenología propia de los Terremotos, en este sentido se procede a presentar la Teoría de las Catástrofes Elementales y en particular el Pliegue, en este sentido las principales consecuencias son una aplicación directa en la función de resistencia dependiente de la velocidad, lo cual tiene consecuencias frente a la forma en la que se ha interpretado tal función y los posibles efectos que tiene sobre modelos clásicos que dan cuenta del origen de un evento sísmico. Visto lo anterior se hace un recorrido sobre diferentes metodologías para dar cuenta de la ocurrencia de Terremotos a través del tiempo, resaltando que ninguna de ellas ha considerado la Teoría Matemática de las Catástrofes. Al final encontramos una proyección del trabajo a seguir desde esta perspectiva y cómo se podría utilizar en los Sistemas de Alerta Temprana, algo que sin duda alguna sería de gran utilidad en el campo de la Sismología y en general de la Geofísica.

PALABRAS CLAVE: Terremoto, catástrofe, modelo, sismología, geofísica.

[1] Ricardo Ceballos Garzón [CV] Coordinador de Investigación, Candidato Doctoral – Fundación Universitaria San Mateo, Universidad Central de Venezuela, FUSM, UCV, Colombia - VenezuelaPlamen Nechev Nechev, Doctor en Física – Investigador Independiente, Colombia investigaciontelecomunicaciones@sanmateo.edu.co, rceballosg@unal.edu.co, pnechev@abv.bg

1. INTRODUCCIÓN

El propósito de la investigación está relacionado con el estudio y comprensión que se tiene sobre la generación de terremotos, la Geofísica y en particular la Sismología han generado modelos para dar cuenta de tal fenómeno, uno bien conocido y citado es el modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967), el cual cuenta con más de 1800 citaciones en Google Scholar y se puede considerar como un referente para trabajos relacionados con modelar el comportamiento y génesis de un terremoto.

Siguiendo una metodología similar se tienen los trabajos de Walton, K. (1973), Backus, G., & Mulcahy, M. (1976) y Knopoff, L., & Chatterjee, A. K. (1982) y que algunos de los aspectos presentados en el trabajo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967).

Sin embargo, en el trabajo de Bak, P., Tang, C., & Wiesenfeld, K. (1988) se puede apreciar una nueva metodología basada en el concepto de autoorganización, que abre el camino para otros trabajos como los de Nakanishi, H. (1990) y Rundle, J. B., & Brown, S. R. (1991), de Sousa Vieira, M. (1992), Crisanti, A., Jensen, M. H., Vulpiani, A., & Paladin, G. (1992), de Sousa Vieira, M., Vasconcelos, G. L., & Nagel, S. R. (1993), aunque de forma paralela también se siguieron desarrollando trabajos a parte en referente es el de Carlson, J. M., & Langer, J. S. (1989), una variante es presentada en el trabajo de Comte, J. C., Dinda, P. T., & Remoissenet, M. (2002) y tiene que ver con la introducción de solitones, este artículo es retomado en la actualidad y podría considerarse como una metodología adicional, basta con considerar los trabajos de Nkomom, T. N., Ndzana, F. I., Okaly, J. B., & Mvogo, A. (2021) y Nkomom, T. N., Ndzana, F. I., Okaly, J. B., & Mvogo, A. (2021). La importancia de esta investigación tiene que ver con generar una metodología diferente a las ya presentadas teniendo en cuenta la Teoría Matemática de las Catástrofes Elementales y en particular la aplicación de la Catástrofe Pliegue, con lo cual se puede establecer una mejora en el modelo clásico que ha servido como referente (Burridge, R., & Knopoff, L. (1967)) ya que el considerar una función de fricción en términos de velocidad presentada usando la Catástrofe Pliegue puede tenerse un mejor entendimiento sobre la fenomenología que subyace al modelo, esto se puede evidenciar en el trabajo de Ceballos G, R., & Netchev, P. (2020).

2. MÉTODO

2.1. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS

El modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967) es sin duda alguna uno de los referentes más importantes para dar cuenta del origen de la actividad sísmica, en este sentido se puede considerar como un estudio de caso general que conlleva a la aplicación del método científico en el sentido más estricto, un componente teórico y experimental que finalmente hacen auto-consistente el modelo, en el presente trabajo se hace una descripción de los aspectos más importantes en cada una de las metodologías que siguieron tal modelo y cómo la Teoría Matemática de las Catástrofes Elementales puede aportar en la mejora del modelo, además de permitir una aplicación directa a los Sistemas de Alerta Temprana.

2.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La cantidad de trabajos generados acerca del modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967) es considerable, sin embargo se pudo delimitar en términos de las metodologías presentadas anteriormente, el uso de repositorios y programas computacionales que relacionan la información son imprescindibles en la clasificación, en este caso se utilizó la base de datos Scopus, y el buscador especializado de documentos académicos Google Scholar, adicional a ello se utilizó la herramienta computacional VOSviewer para construir y visualizar redes bibliométricas relacionadas con el caso de estudio.

2.3. INSTRUMENTOS DE RECOGIDA DE INFORMACIÓN

La primera herramienta empleada para consultar sobre los trabajos relacionados con el modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967) fue Google Scholar, siendo este un buscador o base de datos bibliográfico que permite el acceso a la información de una forma rápida y eficiente, de esta forma, al realizar una búsqueda simple sobre la temática en cuestión, aparecen 3780 resultados en un tiempo de 0.05 s, uno de ellos es el artículo original, citado por 1829 autores en el momento de la consulta (Recuperado de: https://scholar.google.com/scholar?q=related:A-rxVVmiMG8J:scholar.google.com/&scioq=Burridge%2Band%2BKnopoff+&hl=es &as_sdt=0,5), con 6 versiones y 48 artículos relacionados de forma directa.

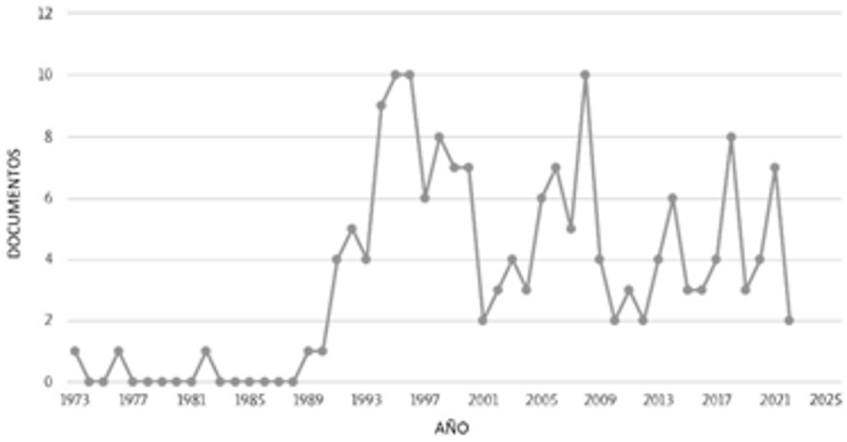
De igual forma se realizó la consulta mediante Scopus (Recuperado de: https://www.scopus.com/results/results.uri?src=s&sort=plf-t&st1=Burridge%2bKnopoff&sid=2cf3073f0b1c8d6c568d8d4577872b89&sot=b&sdt=b&sl=31&s=TITLE-ABS-KEY%28Burridge%2bKnopoff%29&cl=t&offset=1&ss=plf-t&ws=r-f&ps=r-f&cs=r-f&origin=resultslist&zone=queryBar), en donde se obtienen 170 documentos sobre tal temática y 37 documentos considerados como secundarios, toda la información recopilada es acorde en términos cronológicos y de contenidos con la citada anteriormente.

Se utiliza posteriormente el software VOSviewer con miras a construir y visualizar la información bibliométrica en términos de redes teniendo en cuenta términos claves, referencias cruzadas, autores y demás información relevante

2.4. PROCEDIMIENTO

La información suministrada por medio de Scopus permite analizar la forma en la que se ha abordado el modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967), en primer lugar, se visualiza la evolución cronológica de los trabajos relacionados:

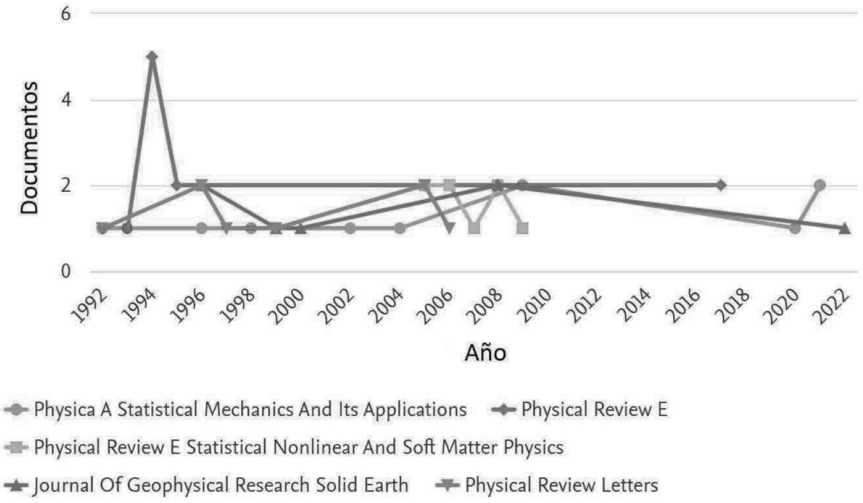
Figura 1. Número de Documentos por año relacionados con el modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967)



Fuente: Adaptado de https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=2cf307 3f0b1c8d6c568d8d4577872b89&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28Burridge%2bKnopoff%29&sort=plf-t&sdt=b&sot=b&sl=31&count=170&analyzeResults=Analyze+results&txGid=f8c9de04d8be3ee460581ae095dd9ce6

En la Figura 1 se puede notar una tendencia constante hasta el comienzo de los años noventa, en donde la producción aumenta de forma notoria y los trabajos presentados abordan las perspectivas presentadas anteriormente, es importante resaltar que tal temática sigue vigente con el pasar del tiempo y se realizan variantes o mejoras continuas al modelo original de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967). También es notoria la tendencia de los autores en cuanto a la selección de las revistas en las cuales se publica, como por ejemplo Physical Review E, Physical Review Letters y actualmente Physica A Statisticals Mechanics and Its Applications, tal como se presenta en la Figura 2:

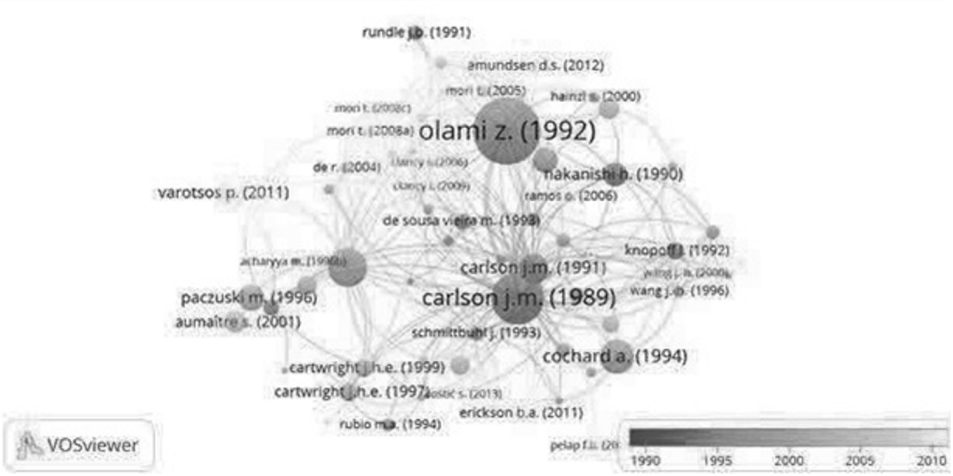
Figura 2. Número de Documentos por año en términos de los lugares de publicación relacionados con el modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967)



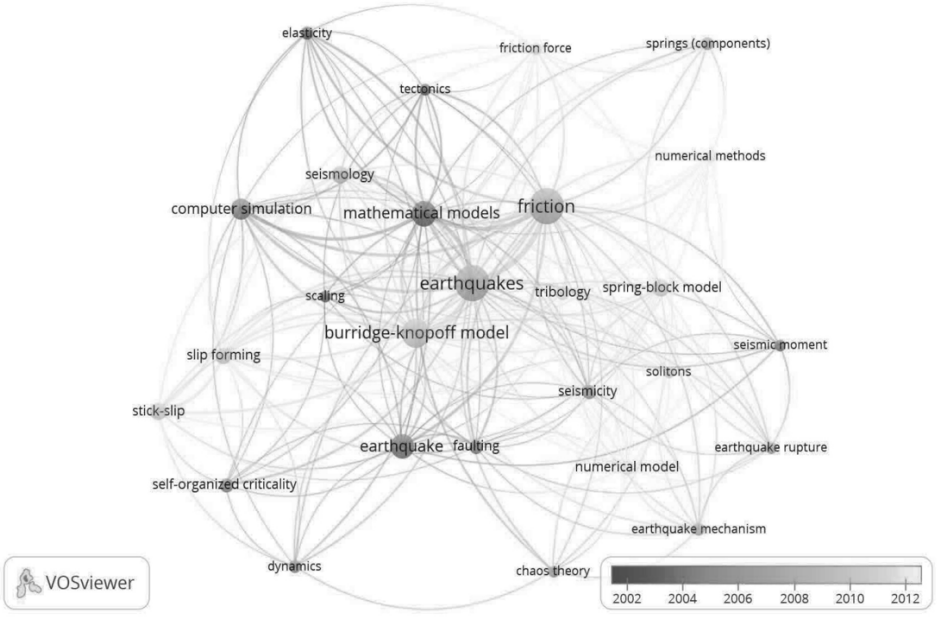
Fuente: Adaptado de https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=2cf3073f0b1c8d6c568d8d4577872b89&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28Burridge%2bKnopoff%29&sort=plf- t&sdt=b&sot=b&sl=31&count=170&analyzeResults=Analyze+results&txGid=1dfbc789cf98994e020c130c28aff2f4

Al utilizar el software VOSViewer con miras a consolidar algunos aspectos, uno significativo tiene que ver con los autores, quienes se identifican en términos del campo de trabajo y cuya trazabilidad es notoria, tal como se puede evidenciar en la Figura 3.

Figura 3. Algunos autores destacados con relación al modelo de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967)



Fuente: Adaptado desde el archivo csv. obtenido desde https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=2cf3073f0b1c8d6c568d8d4577872b89&ori gin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28Burridge%2bKnopoff%29&sort=plf-t&sdt=b&sot=b&sl=31&count=170&analyzeResults=Analyze+results&txGid=1dfbc789cf 98994e020c130c28aff2f4, mediante el software VOSviewer.



Por otra parte, los términos clave permiten caracterizar las diferentes perspectivas, en el caso particular del trabajo de Ceballos G, R., & Netchev, P. (2020) que tiene en cuenta la Teoría de las Catástrofes Elementales, se tiene en cuenta el modelo de resortes original prestando atención especial a la forma de la fuerza de fricción dependiente de la velocidad, que permite introducir de una manera simple pero a la vez formal la catástrofe elemental pliegue, una aplicación de tal perspectiva puede encontrarse en Ceballos G, R., & Netchev, P. (2022), que lleva a la consideración de una posible aplicación en los sistemas de alerta temprana.

3. RESULTADOS

En términos de la información obtenida en los repositorios y a partir de los resultados generados mediante el software VOSViewer es posible afirmar que la Teoría Elemental de las Catástrofes puede generar mejoras en el modelo original de Burridge, R., & Knopoff, L. (1967), son reconocidas las perspectivas mencionadas con anterioridad, sin embargo la introducción de esta nueva metodología no busca refutar o contradecir lo planteado, más bien busca mejorar los modelos y generar un mejor grado de entendimiento en aspectos tan importantes como lo es la función de fricción dependiente de la velocidad Ceballos G, R., & Netchev, P. (2020).

El interés en dar cuenta de la fenomenología subyacente al estudio de los terremotos es un campo de acción actual en la Geodinámica, en este sentido el desarrollo de nuevas metodologías como la revisada en este artículo resulta relevante y retoma la Teoría de las Catástrofes Elementales de Thom, R. (2018) y otros autores que desarrollaron posibles aplicaciones posteriores, tal como puede verse en Zeeman, E. C. (1979), Zeeman, E. C. (1979) y Zeeman, E. C. (1976).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El poder establecer modelos que representen un fenómeno físico como lo es un sismo conlleva a una gran complejidad desde el punto de vista físico matemático, en donde se evidencian perspectivas reconocidas que se desarrollan en torno a trabajos con notable importancia como lo es el presentado por Burridge, R., & Knopoff, L. (1967), aunque el objetivo es el mismo, el formalismo puede ser descrito de diferente forma y es en este sentido en donde la Teoría de las Catástrofes Elementales cobra relevancia, la revisión realizada evidencia que puede considerarse como una perspectiva no tradicional que puede ser introducida sin generar problemas en el modelo, más bien como una metodología que permite su mejora y cuya aplicación es directa al considerar los sistemas de alerta temprana Ceballos G, R., & Netchev, P. (2022).

Este capítulo muestra algunos de los resultados de la tesis doctoral Catástrofes Elementales y Terremotos, la cual está próxima a ser publicada.

REFERENCIAS

- *Backus, G., & Mulcahy, M. (1976). Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources I. Continuous displacements. Geophysical Journal International, 46(2), 341-361.*
- *Bak, P., Tang, C., & Wiesenfeld, K. (1988). Self-organized criticality. Physical review A, 38(1), 364.*
- *Burridge, R., & Knopoff, L. (1967). Model and theoretical seismicity. Bulletin of the seismological society of america, 57(3), 341-371.*
- *Carlson, J. M., & Langer, J. S. (1989). Mechanical model of an earthquake fault. Physical Review A, 40(11), 6470.*
- *Ceballos G, R., & Netchev, P. (2020). On the Burridge and Knopoff Model and the Theoretical Seismicity.*
- *Ceballos G, R., & Netchev, P. (2022). Earthqueake Forecasting with Elementary Catastrophe Theory. https://sinews.siam.org/Details-Page/earthquake-forecasting-with-elementary-catastrophe-theory*
- *Comte, J. C., Dinda, P. T., & Remoissenet, M. (2002). Discrete Burridge-Knopoff model, with exact solitonic or compactlike traveling wave solution. Physical Review E, 65(2), 026615.*

REFERENCIAS

- *De Sousa Vieira, M. (1992). Self-organized criticality in a deterministic mechanical model. Physical Review A, 46(10), 6288.*
- *De Sousa Vieira, M., Vasconcelos, G. L., & Nagel, S. R. (1993). Dynamics of spring-block models: Tuning to criticality. Physical Review E, 47(4), R2221.*
- *De Sousa Vieira, M. (1995). Chaos in a simple spring-block system. Physics Letters A, 198(5-6), 407- 414.*
- *Crisanti, A., Jensen, M. H., Vulpiani, A., & Paladin, G. (1992). Strongly intermittent chaos and scaling in an earthquake model. Physical Review A, 46(12), R7363.*
- *Knopoff, L., & Chatterjee, A. K. (1982). Unilateral extension of a two-dimensional shear crack under the influence of cohesive forces. Geophysical Journal International, 68(1), 7-25.*
- *Nakanishi, H. (1990). Cellular-automaton model of earthquakes with deterministic dynamics. Physical review A, 41(12), 7086.*
- *Nkomom, T. N., Ndzana, F. I., Okaly, J. B., & Mvogo, A. (2021). Dynamics of nonlinear waves in a Burridge and Knopoff model for earthquake with long-range interactions, velocity-dependent and hydrodynamics friction forces. Chaos, Solitons & Fractals, 150, 111196.*
- *Nkomom, T. N., Okaly, J. B., & Mvogo, A. (2021). Dynamics of modulated waves and localized energy in a Burridge and Knopoff model of earthquake with velocity- dependant and hydrodynamics friction forces. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 583, 126283.*
- *Olami, Z., Feder, H. J. S., & Christensen, K. (1992). Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. Physical*
- *Rundle, J. B., & Brown, S. R. (1991). Origin of rate dependence in frictional sliding. Journal of statistical physics, 65(1), 403-412.*
- *Thom, R. (2018). Structural stability and morphogenesis. CRC press.*
- *Walton, K. (1973). Seismic waves in pre-strained media. Geophysical Journal International, 31(4), 373-394.*
- *Zeeman, C. (2006, September). The classification of elementary catastrophes of Structural Stability, the Theory of Catastrophes, and Applications in the Sciences: Proceedings of the Conference Held at Battelle Seattle Research Center 1975 (pp. 263-327). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.*
- *Zeeman, E. C. (1979). Catastrophe theory. In Structural Stability in Physics (pp. 12-22). Springer, Berlin, Heidelberg.*
- *Zeeman, E. C. (1976). Catastrophe theory. Scientific American, 234(4), 65-83.*