

ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE EMISIÓN ACÚSTICA

Vesga-Ramírez A^{a,b}, Camilion E.^c y Gómez M. P.^{ab}

^a Grupo de Ondas Elásticas, ICES, CAC, CNEA, ARGENTINA

^b Grupo de Emisión Acústica, FRD, UTN, Campana, ARGENTINA

^c YPF-Tecnología, La Plata, ARGENTINA

[e-mail: alejandravesga@cnea.gov.ar](mailto:alejandravesga@cnea.gov.ar)

RESUMEN

La Emisión Acústica (EA) es un fenómeno en el cual, a expensas de una sollicitación, un material libera energía en forma de ondas elásticas. Estas ondas son producidas por un mecanismo, denominado fuente de EA, activado al recibir alguna clase de energía. De esta manera, al inducir inestabilidades dentro de un material, por ejemplo, mediante una carga mecánica, pueden ocurrir efectos como la reactivación de fracturas/fallas, propagación de fracturas y nucleación de microfracturas. Estas actuarán de fuentes de EA las cuales pueden ser detectadas y localizadas a partir de colocar sensores en la superficie del material estudiado. Identificar con precisión la ubicación de fracturas y daños microscópicos es la base científica para investigar el mecanismo de falla de materiales. Por tanto, localizar fuentes de EA puede ser crucial para predecir y controlar potenciales daños. El caso de interés del presente estudio es el desarrollo y prueba de algoritmos para la localización 3D de fuentes de EA. Para esto se simplifica el modelo de fuente, utilizándose una del tipo de Hsu Nielsen para generar pulsos en la superficie de un cubo de hormigón construido para este trabajo. Se utiliza hormigón por su semejanza con la roca, dado que este trabajo se enmarca en una tesis de doctorado en la cual se estudia la EA en rocas. Se presentan los resultados de la localización de EA, la cual está basada en el registro de los tiempos de arribo de las señales de EA, producidas por la fuente simulada, en varios sensores ubicados sobre la superficie del cubo. El algoritmo de localización, basado en el método de Geiger, se implementó en tres diferentes etapas: establecimiento de funciones de tiempo de arribo, preparación de los datos y linealización del problema. Así mismo, este trabajo presenta los factores que influenciaron la precisión de la localización, ventajas y desventajas con respecto a otros métodos, así como una discusión de los retos actuales en localización de fuentes de emisión acústica.

Palabras Clave: Emisión acústica, Hormigón, Mecanismos de falla

INTRODUCCIÓN

Localizar fuentes de emisiones acústicas (AE) es un método de ensayo no destructivo que se utiliza ampliamente en muchas aplicaciones, incluyendo túneles, minería de profundidad, industrias petroquímica y aeroespacial (Guo et al, 2020; Cai et al, 2019; Zhou et al, 2019; Zacarias et al, 2013; Muzet et al, 2007). Identificar con precisión la ubicación de fracturas y daños microscópicos es la base científica para investigar el mecanismo de falla de materiales, prediciendo explosiones de rocas y operando con seguridad grandes equipos industriales (Holford et al, 2017; Qi et al, 2020; Li et al, 2019; Fredianelli et al, 2020; Bolognese et al, 2020). Por lo tanto, vale la pena desarrollar un método de localización de fuentes de AE de alta precisión.

Los métodos de localización más usados usualmente están basados en el método clásico propuesto por Geiger en 1910 (Geiger,1910; Geiger,1912). Sin embargo, solo hasta finales de 1970, con el rápido desarrollo de la computación, el método de Geiger fue aplicado al campo de la localización de fuentes de microsismica/EA (Mowrey G,1975). La principal idea del método de Geiger es linealizar el problema, haciendo que el residuo del tiempo de llegada de la onda alcance un mínimo con cierta precisión (mediante el uso de cálculos iterativos), y finalmente obtener las coordenadas de la fuente (Dong et al, 2019)

METODOLOGIA

Algoritmo de localización

El método Geiger es una aplicación del método de Gauss-Newton, un algoritmo clásico para solucionar problemas no-lineales. Está basado sobre un punto inicial dado y a partir de este obtener el resultado a través de varias iteraciones. Definamos $F_i(m)$ como la función del tiempo de arribo en un sensor, donde $m = (x, y, z, t)$ son las coordenadas del evento y t el tiempo de origen del evento de EA. Si expandimos $F_i(m)$ a una localización cerca, m_0 , y expresamos la expansión por el primer polinomio de primer grado de Taylor:

$$F_i(m) = F_i(m_0 + \delta m) = F_i(m_0) + \frac{\delta F_i}{\delta x} \delta x + \frac{\delta F_i}{\delta y} \delta y + \frac{\delta F_i}{\delta z} \delta z + \frac{\delta F_i}{\delta t} \delta t \quad (1)$$

Donde

$$m = m_0 + \delta m$$

$m_0 = (x_0, y_0, z_0, t_0)$ es convencionalmente llamado *solución de prueba o solución trial*

El término de la izquierda de la ecuación (1), $F_i(m_0 + \delta m)$, representa el tiempo de arribo registrado en el sensor i . El significado físico de la ecuación (1) es que el tiempo observado es expresado por el tiempo de arribo calculado a partir de una localización cercana y por:

$$\frac{\delta F_i}{\delta x} \delta x + \frac{\delta F_i}{\delta y} \delta y + \frac{\delta F_i}{\delta z} \delta z + \frac{\delta F_i}{\delta t} \delta t \quad (2)$$

un factor de corrección, el cual está en función de las derivadas parciales de los parámetros del hipocentro.

Si reorganizamos la ecuación (1) en la forma:

$$\Delta d = \frac{\delta F_i}{\delta x} \delta x + \frac{\delta F_i}{\delta y} \delta y + \frac{\delta F_i}{\delta z} \delta z + \frac{\delta F_i}{\delta t} \delta t \quad (3)$$

Donde $\Delta d = F_i(m) - F_i(m_0)$

En notación de matrices tenemos lo anterior como

$$\begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & G_{n4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \\ \Delta m_3 \\ \Delta m_4 \end{bmatrix}$$

Es decir

$$\Delta d = G\delta m \quad (4)$$

Donde $G = \begin{bmatrix} \frac{\delta F_1}{\delta x} & \frac{\delta F_1}{\delta y} & \frac{\delta F_1}{\delta z} & \frac{\delta F_1}{\delta t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\delta F_m}{\delta x} & \frac{\delta F_m}{\delta y} & \frac{\delta F_m}{\delta z} & \frac{\delta F_m}{\delta t} \end{bmatrix}$

La solución por mínimos cuadrados satisface el sistema definido por la ecuación (4)

$$\delta m = (GG^T)^{-1}G^T \Delta d \quad (5)$$

Implementación del Algoritmo

El algoritmo del método de Geiger discutido anteriormente fue desarrollado para funciones que estiman tiempos de arriba, es decir, podemos usar este algoritmo para cualquier función de tiempo de arribo hasta que las funciones y sus derivadas parciales pueden ser evaluadas. A continuación, discutiremos la implementación del método de Geiger para un evento de Emisión Acústica.

La implementación del método de Geiger fue realizada en tres principales pasos. Primero se estableció la función de tiempo de arribo. Los tiempos de arribo de las ondas ocurridas por eventos sísmicos se ven afectados por muchos factores. Categóricamente, hay tres principales: estructura y composición de los medios donde se propagan las ondas de estrés, mecanismo fuente y orientación relativa de la fuente y los sensores, y la forma y geometría de la estructura en estudio. Si la posición de los sensores de Emisión Acústica está determinada por $X_i (x_{obs}, y_{obs}, z_{obs})$, ver figura 1, y la posición de la fuente es $X_o (x_0, y_0, z_0)$ emitida en un tiempo de origen t_0 , la distancia de la fuente al sensor puede ser obtenida por

$$D = \sqrt{(x_{obs} - x_0)^2 + (y_{obs} - y_0)^2 + (z_{obs} - z_0)^2} \quad (5)$$

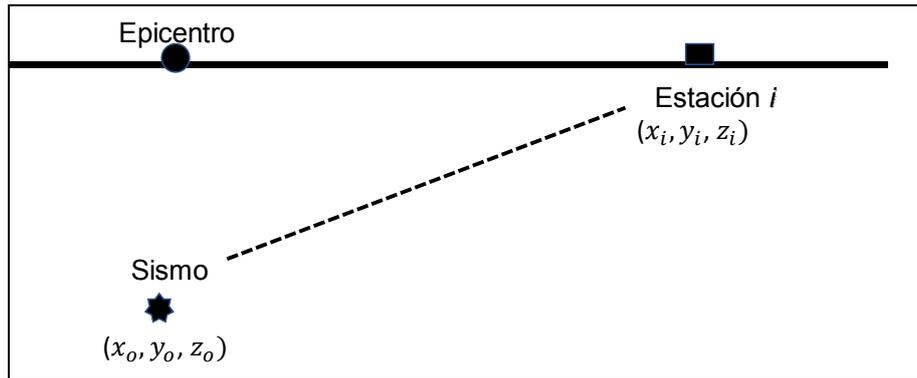


Figura 1. Esquema geométrico de localización de fuente de Emisión Acústica

El tiempo de arribo a partir de la posición de la fuente al sensor X_i esta dado por la ecuación

$$t_i = \frac{1}{V} [(x_{obs} - x_o)^2 + (y_{obs} - y_o)^2 + (z_{obs} - z_o)^2]^{1/2} + t_0 \quad (6)$$

Donde x, y, z son las coordenadas del evento de EA, t es el tiempo de origen del evento de EA, x_i, y_i, z_i son las coordenadas del sensor i y V es la velocidad de la onda P en el medio.

En el segundo paso en la implementación fue preparar los datos. Una vez que las funciones de arribo son establecidas, el siguiente paso es preparar los datos. Es conocida a partir de la ecuación (2) que hay cuatro datos que hay que preparar: la solución de prueba, los tiempos de arribo observados, los tiempos de arribo calculados y las derivadas parciales.

Finalmente, en la implementación del algoritmo se solucionó el anterior sistema de ecuaciones mínimos cuadrados. La solución de mínimos cuadrados para un sistema inconsistente está dada por la ecuación (3)

$$\delta m = (GG^T)^{-1}G^T \Delta d$$

Por lo general, el tamaño del vector de corrección, δm , disminuirá rápidamente y alcanzará una precisión prescrita en unas pocas iteraciones. Sin embargo, es posible que δm no converja: puede oscilar o incluso aumentar más allá sin controlar. El problema de la divergencia es un signo de la inestabilidad de la matemática asociada. sistema, que generalmente es el resultado de una geometría de matriz deficiente

RESULTADOS

Montaje experimental

El algoritmo de localización fue testeado en un cubo de hormigón con dimensiones de 30 cm x 30 cm x 30 cm como se muestra en la figura 2. Cuatro (4) sensores fueron acondicionados para el ensayo, y sus coordenadas se muestran en la tabla 1.

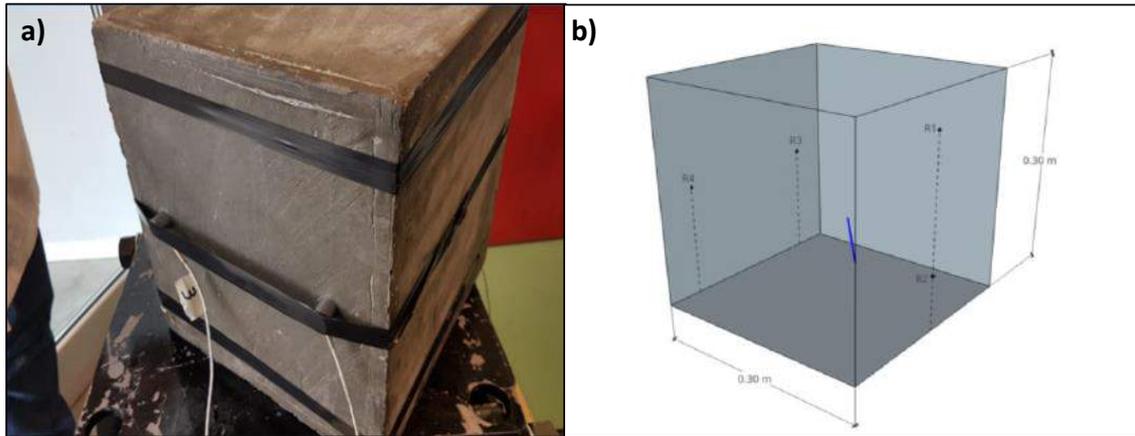


Figura 2. a) localización de los sensores en cubo de hormigón y b) Coordenadas de posición de sensores de EA.

Las coordenadas de los sensores de EA se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de localización de los receptores de emisión acústica

Descripción	x [cm]	y[cm]	z[cm]
Receptor 1 (R1)	15	0	25
Receptor 2 (R2)	15	0	5
Receptor 3 (R3)	25	30	15
Receptor 4 (R4)	5	30	15

Las señales de EA fueron amplificadas con un amplificador de 40db. Las señales fueron convertidas a través de dos (2) placas de adquisición PCI-2 de PAC y filtradas por un filtro pasa baja de 20Khz y un filtro pasa alta de 400kHz. Una frecuencia de 2000 muestras por segundo fue usada. El umbral de detección fue fijado en un valor de 45 dB basado en el ruido ambiental, los demás detalles se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2. Standard channel setup definido para el sistema de adquisición de EA.

Sensor	Thr [dB]	Pre Amp [dB]	Lower Freq [kHz]	Upper Freq [kHz]	Sample Rate [MSps]	Pre-Trig	Len [kS]
1	45	40	20	400	2	500.0000	10
2	45	40	20	400	2	500.0000	10
3	45	40	20	400	2	500.0000	10
4	45	40	20	400	2	500.0000	10

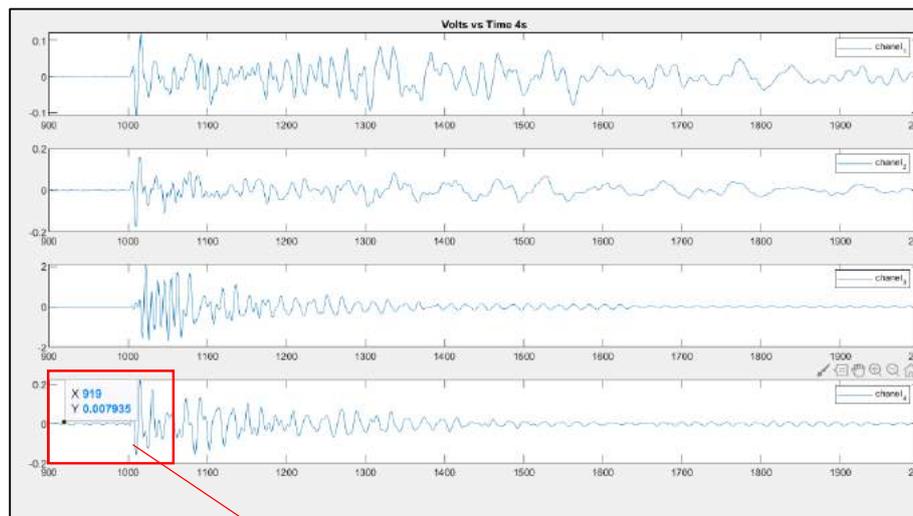
Todos los parámetros característicos de la EA fueron registrados en el software AEWIN. Además, siete (7) fuentes de EA fueron generadas en la superficie del bloque mediante la ruptura del lápiz, sus coordenadas se pueden ver en la tabla 3. El tamaño de la mina de lápiz HB es de 0,5 mm y fue rota a 30 ° con respecto a la superficie del hormigón.

Tabla 3. Coordenadas de localización de las fuentes de emisión acústica por ruptura de la mina de lápiz.

Descripción	x [cm]	y[cm]	z[cm]	t[s]
Fuente 1 (D1)	25	30	15	4,2
Fuente 2 (D2)	5	30	15	8,8
Fuente 3 (D3)	25	30	15	51,5
Fuente 4 (D4)	5	30	15	56,6
Fuente 5 (D5)	15	0	25	67,5
Fuente 6 (D6)	15	0	5	73,2
Fuente 7 (D7)	15	0	25	78,3

Tiempos de arribo observados

Antes de localizar una fuente de EA, los tiempos de arribo deben ser determinados. Se hizo una revisión de las formas de ondas para cada los tiempos de las ondas P y S para cada sensor y así verificar que el tiempo de disparo de la onda fuera el correcto. El tiempo correspondiente al primer punto de despegue se determina generalmente como el tiempo de arribo. La figura 3 muestra el principio de selección de los tiempos de arribo.



Zoom

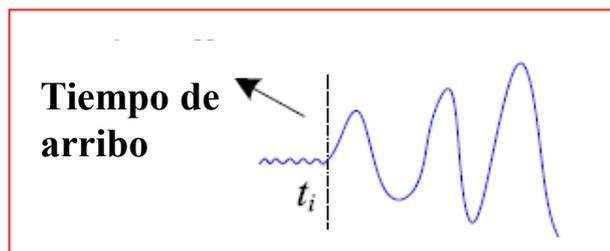


Figura 3. Principio de revisión de formas de ondas en cada sensor de EA.

Finalmente, se asumió una velocidad de propagación de ondas de 4000 m/s para un material tipo hormigón. Este valor fue comprobado asumiendo el tiempo de arribo de un canal a otro. La tabla 4 muestra los resultados de la localización. En la figura 5 se muestran los errores absolutos promedio de las fuentes de EA. La precisión de las soluciones finales se ve principalmente afectada por el punto de partida del algoritmo y el error del registro de los tiempos observados y de la velocidad de propagación en el medio.

Tabla 4. Coordenadas de localización de las fuentes de emisión acústica por ruptura de la mina de lápiz.

Fuente EA No	Localización Real EA (x,y,z) [cm]	Solución Inicial [cm]	Resultados Localización de Geiger	Iter	Error [mm]
1	(25, 30, 15)	(15, 15, 15)	(26, 32,16)	5	(1.0, 2.0,1.0)
2	(5.0, 30, 15)	(5.0, 24, 10)	(2.0, 31,15)	2	(3.0, 1.0,0.0)
3	(25, 30,15)	(20, 25, 15)	(24, 32,15)	2	(1.0, 2.0,0.0)
4	(5.0, 30, 15)	(10, 25, 15)	(3.0, 31,16)	2	(2.0, 1.0,1.0)
5	(15, 0.0, 25)	(10, 5.0, 20)	(16, -0.02,24)	2	(1.0,2.0,1.0)
6	(15, 0.0, 5.0)	(15, 2.0, 6.0)	(14, -0.02,7.0)	2	(1.0,2.0,2.0)
7	(15, 0.0, 25)	(10,2.0, 20)	(15, -0.02,25)	2	(0.0,2.0,1.0)

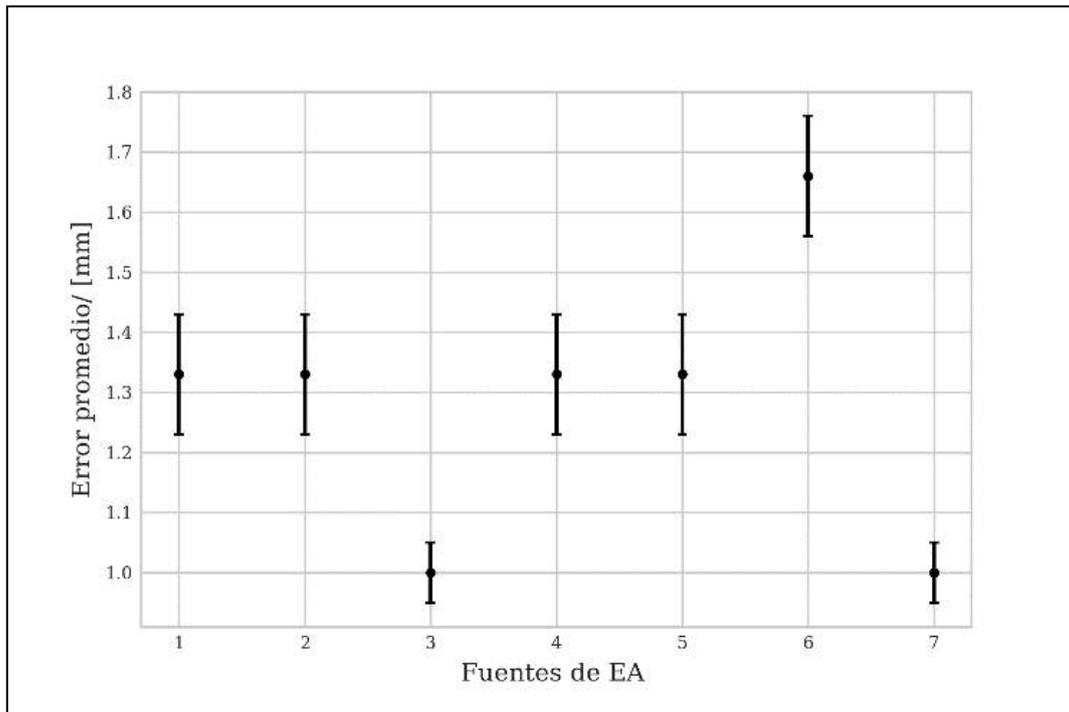


Figura 4. Los errores absolutos promedio de las fuentes de EA.

CONCLUSIONES

El algoritmo de localización, basado en el método de Geiger, se implementó en tres diferentes etapas: establecimiento de funciones de tiempo de arribo, preparación de los datos y linealización del problema. La precisión de las soluciones finales se ve principalmente afectada por tres factores: la solución inicial de partida del algoritmo, la precisión del registro de los tiempos observados y la velocidad del medio. Otro factor importante es la ruta de

propagación de la señal de AE que viaja desde la fuente hasta el sensor, esta puede cambiar con la ubicación de la fuente de AE. Por lo tanto, la velocidad de onda media de estas trayectorias también varía según la ubicación de la fuente.

REFERENCIAS

- Guo, Investigating the effect of rock bridge on the stability of locked section slopes by the direct shear test and acoustic emission technique. *Sensors*, Vol 20, pp 638 (2020).
- Cai, X. Water-weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: Phenomena and mechanisms. *Appl. Sci.*, 9, 4450 (2019).
- Zhou, Z.; Cai, X.; Li, X.; Cao, W.; Du, X. Dynamic Response and Energy Evolution of Sandstone Under Coupled Static–Dynamic Compression: Insights from Experimental Study into Deep Rock Engineering Applications. *Rock Mech. Rock Eng.*, 53, 1–27 (2019).
- Muzet, A. Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med. Rev.*, 11, 135–142 (2007).
- Zacarias, F.F.; Molina, R.H.; Ancela, J.L.C.; López, S.L.; Ojembarrena, A.A. Noise exposure in preterm infants treated with respiratory support using neonatal helmets. *Acta Acust. United Acust.*, 99, 590–597 (2013).
- Holford, K.M.; Eaton, M.J.; Hensman, J.J.; Pullin, R.; Evans, S.L.; Dervilis, N.; Worden, K. A new methodology for automating acoustic emission detection of metallic fatigue fractures in highly demanding aerospace environments: An overview. *Prog. Aerosp. Sci.* 2017, 90, 1–11.
- Qi, L.; Zeng, Z.; Sun, L.; Rui, X.; Fan, F.; Yue, G.; Zhao, Y.; Feng, H. An Impact Location Algorithm for Spacecraft Stiffened Structure Based on Posterior Possibility Correlation. *Sensors*, 20, 368 (2020).
- Li, L.; Yang, K.; Bian, X.; Liu, Q.; Yang, Y.; Ma, F. A Gas Leakage Localization Method Based on a Virtual Ultrasonic Sensor Array. *Sensors*, 19, 3152 (2019).
- Fredianelli, L.; Nastasi, M.; Bernardini, M.; Fidecaro, F.; Licitra, G. Pass-by Characterization of Noise Emitted by Different Categories of Seagoing Ships in Ports. *Sustainability*, 12, 1740 (2020).
- Bolognese, M.; Fidecaro, F.; Palazzuoli, D.; Licitra, G. Port Noise and Complaints in the North Tyrrhenian Sea and Framework for Remediation. *Environments*, 7, 17 (2020).
- Geiger L., “Herdbestimmung bei erdbeben aus den ankunftszeiten. Nachrichten von der gesellschaft der wissenschaften zu Göttingen,” *Mathematisch-Physikalische Klasse*, vol. 4, pp. 331–349 (1910).
- Geiger L., “Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only,” *Bulletin of Saint Louis University*, vol. 8, pp. 60–71, (1912).
- Mowrey G. L., “Computer processing and analysis of microseismic data,” in *Proceedings of the 1st Conference on AE/IMA in Geology Structures and Materials*, Pennsylvania State University, PA, USA (1975).
- Dong L., “Some Developments and New Insights for Microseismic/Acoustic Emission Source Localization”, *Shock and Vibration*, vol. 2019, pp 15 (2019).