

Detección automática de eventos sísmicos marcianos con algoritmo de reducción a una componente

Automatic detection of martian seismic events using a single-component reduction algorithm

Agustín R Gómez^{1,2} & Danilo R Velis^{1,2}

Resumen Analizamos la eficacia de tres métodos de detección automática de eventos sísmicos de tipo STA/LTA cuando son aplicados a sismogramas sintéticos marcianos en el marco del proyecto *Preparing for InSight*. Los sismogramas utilizados corresponden a un sensor de velocidad de corto período y tres componentes. Debido a la presencia de un significativo ruido ambiente y otros eventos sísmicos asociados, la relación señal/ruido (S/R) de los datos es considerablemente baja. En este contexto, con el fin de mejorar la efectividad de los algoritmos de detección, se propone un algoritmo que permite reducir la información contenida en las tres componentes del registro a una única serie de tiempo con una relación S/R mayor que la de cada componente por separado. Esto permite, además, minimizar el costo computacional y las ambigüedades que pudieran surgir al realizar la detección de cada componente por separado. Analizamos la efectividad de los métodos de detección en base al número de detecciones correctas obtenidas cuando se utiliza el sismograma reducido o los sismogramas originales por separado. Además, comparamos los resultados con los obtenidos por otros autores (grupo Géozur) que utilizaron los mismos datos. La comparación se realizó en primera instancia componente a componente, arrojando una coincidencia máxima de alrededor del 20 % con los eventos detectados por el grupo Géozur. Este porcentaje subió al 30 % luego de aplicar los métodos de detección al sismograma generado mediante el algoritmo de reducción a una componente. Estos resultados suponen una mejora significativa en la efectividad de los métodos de detección testeados.

Abstract *We analyze the effectiveness of three STA/LTA-type automatic seismic event detection methods when applied to synthetic Martian seismograms in the framework of the Preparing for InSight project. The seismograms used correspond to a short-period, three- component velocity sensor. Due to the presence of significant ambient noise and other associated seismic events, the signal-to-noise ratio (S/N) of the data is considerably low. In this context, to improve the effectiveness of the detection methods, an algorithm is proposed to reduce the information contained in the three components of the seismogram to a single time series with a higher S/N ratio than that of each component separately. This also allows minimizing the computational cost and the ambiguities that could arise when performing the detection of each component separately. We analyze the effectiveness of the detection methods based on the number of correct detections obtained when using the reduced seismogram or the original seismograms separately. In addition, we compare the results with those obtained by other authors (Géozur group) who used the same data. The comparison was first performed component by component, yielding a maximum coincidence of about 20 % with the events detected by the Géozur group. This percentage rose to 30 % after applying the detection methods to the seismogram generated by the one-component reduction algorithm. These results represent a significant improvement in the effectiveness of the detection methods tested.*

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina. Email: agusgo-mez@fcaglp.unlp.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), La Plata, Argentina.

INTRODUCCIÓN

La Sismología ha sido una herramienta fundamental para el estudio del interior terrestre. Mediante la detección de terremotos en series de tiempo que registran el movimiento del suelo (sismogramas), los sismólogos han podido mapear la distribución de velocidades y densidades de la Tierra en escalas regionales y globales. En ese sentido, la capacidad de detección de eventos sísmicos en sismogramas resulta fundamental. La metodología por excelencia para llevar a reas es la manual, donde un experto revisa las series de tiempo y reconoce visualmente las distintas fases de un sismo. Sin embargo, este método no solo es subjetivo, sino que resulta impráctico cuando se trabaja con grandes volúmenes de datos. Por ello, actualmente se busca utilizar métodos de detección automática. Básicamente, estos métodos consisten en la aplicación de técnicas matemáticas para distinguir eventos sísmicos (señal) por sobre el ruido observacional. La capacidad de detección de los métodos automáticos depende, además de los parámetros elegidos para cada uno de ellos, muy fuertemente de la relación señal/ruido (S/R) del sismograma sobre el cual se apliquen.

Hoy en día, la Sismología es considerada también como una valiosa herramienta para el estudio del interior de otros cuerpos celestes del Sistema Solar, tales como el planeta Marte. Un ejemplo es la misión InSight (*Interior exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport*) de la NASA (Banerdt et al., 2013). La misión InSight consistió en la instalación en el año 2018 de equipamiento geofísico para el estudio de Marte desde diversas perspectivas. Entre el equipamiento instalado, se encuentra un conjunto de dos sismómetros de alta ganancia denominado SEIS (Lognonné et al., 2019).

El proyecto *Preparing for InSight* (Clinton et al., 2017) consistió en la generación de datos sintéticos para anticiparse a los que luego se obtendrían mediante los dispositivos SEIS. Los sismogramas se sintetizaron modelando la distribución de velocidades, un catálogo de eventos, y fuentes de ruido determinista y estocástico. Con tres series de tiempo continuas de un año, se obtuvo un modelo de los sismogramas sintéticos realistas. Posteriormente, se convocó a múltiples grupos de investigación de todo el mundo para que realizaran una inversión de los datos “a ciegas”, donde se les proveyó solamente los sismogramas sintéticos. El objetivo fue obtener un catálogo de los eventos sísmicos junto con el modelo de velocidades que generaron las señales en las series de tiempo.

Una de las características fundamentales de estos sismogramas es su baja S/R. Esto se debe principalmente a que las condiciones de observación no son óptimas. Por un lado, la información se contamina con ruido ambiente de alta amplitud. Y por otro lado, martemotos tienen baja energía, puesto que la actividad tectónica de Marte es muy baja comparada con la de la Tierra. En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar la eficacia de tres métodos de detección automática convencionales del tipo STA/LTA (Sabbione & Velis, 2010) cuando son aplicados sobre los datos sintéticos marcianos. La elección de estos métodos se basó en su capacidad de detección de eventos tele sísmicos en trabajos previos (Sabbione et al., 2011). Entendiendo la baja S/R de los sismogramas y el amplio volumen de datos (una serie de tiempo continua de un año de duración con una frecuencia de muestreo de 2 Hz por cada una de las tres componentes), desarrollamos un algoritmo de reducción a una componente que permite construir un nuevo sismograma conteniendo la información de las tres componentes originales. Además de la reducción del volumen de datos, la estrategia permite obtener un dato con mayor S/R que cada componente por separado. La reducción a una componente se basa en la hipótesis de polarización lineal de las ondas. En esencia, el método obtiene el acimut e inclinación óptimos que maximicen la energía en la dirección de propagación. El segundo objetivo de este trabajo es verificar si el método de reducción a una componente permite mejorar la eficacia de los métodos de detección automática. Para comprobar esto, se cuantificó el porcentaje de detecciones correctas sin utilizar el algoritmo de reducción, y aplicando los métodos de detección a cada componente por separado. Posteriormente se aplicaron los mismos métodos a la componente nueva. Para determinar si una detección es correcta, se utilizaron como referencia los tiempos picados por el Laboratorio de Géoazur, uno de los equipos que participó del proyecto *Preparing for InSight*. Una detección se considera correcta si el tiempo de arribo detectado coincide con el obtenido por Géoazur dentro de

una tolerancia específica. Los resultados arrojan una coincidencia del alrededor del 20 % cuando no se utilizó el algoritmo de reducción a una componente, en tanto que este valor subió al 30 % tras la reducción.

MÉTODOS DE DETECCIÓN AUTOMÁTICA

Para este trabajo se seleccionaron tres métodos de detección automática: el método de Allen (Allen, 1978), el método de Earle-Shearer (Earle & Shearer, 1994) y el método de Allen modificado (Sabbione & Velis, 2010). Los tres métodos son del tipo STA/LTA (*long-term average/short-term average*). Los métodos STA/LTA son muy utilizados para la detección automática de terremotos (Sabbione et al., 2011). Estos utilizan dos ventanas móviles: una ventana de corta duración temporal T_{STA} y una de larga duración temporal T_{LTA} . La ventana corta se encuentra incluida en la larga. Una vez definidas las longitudes de cada ventana, se calculan dentro de cada ventana los promedios temporales de una función característica CF_i , la cual es definida a partir de la serie de tiempo original x_i . Luego, se realiza una comparación entre ambas: si dicha comparación supera un cierto umbral THR (definido *a priori*), entonces se declara una detección.

Método de Allen (RAM)

Este método fue diseñado por Allen (1978). En RAM, la función característica se define como

$$CF_i = x_i^2 + C_i x_i'^2, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

donde N es la cantidad de muestras, $x_i' = x_i - x_{i-1}$ es la diferencia sucesiva hacia atrás de la serie de tiempo (una aproximación discreta de la derivada de la señal), y C_i es una función de pesos definida por

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^i |x_j|}{\sum_{j=1}^i |x_j - x_{j-1}|}. \quad (2)$$

Los promedios STA y LTA se calculan mediante

$$STA_i = STA_{i-1} + C_3(CF_i - STA_{i-1}), \quad (3)$$

y

$$LTA_i = LTA_{i-1} + C_4(CF_i - LTA_{i-1}). \quad (4)$$

Las constantes C_3 y C_4 son parámetros arbitrarios (definidos por el intérprete) para modular los promedios STA y LTA . El algoritmo declara un evento en la i -ésima muestra de la serie de tiempo cuando el atributo $r_i = \frac{STA_i}{LTA_i}$ cumple $r_i > THR$.

Método de Earle y Shearer (ESM)

Este método fue desarrollado por Earle & Shearer (1994). En este caso, se utiliza la envolvente de la señal como función característica, la cual se obtiene mediante

$$e_i^2 = x_i^2 + \bar{x}_i^2, \quad (5)$$

donde \bar{x}_i es la transformada de Hilbert de la señal.

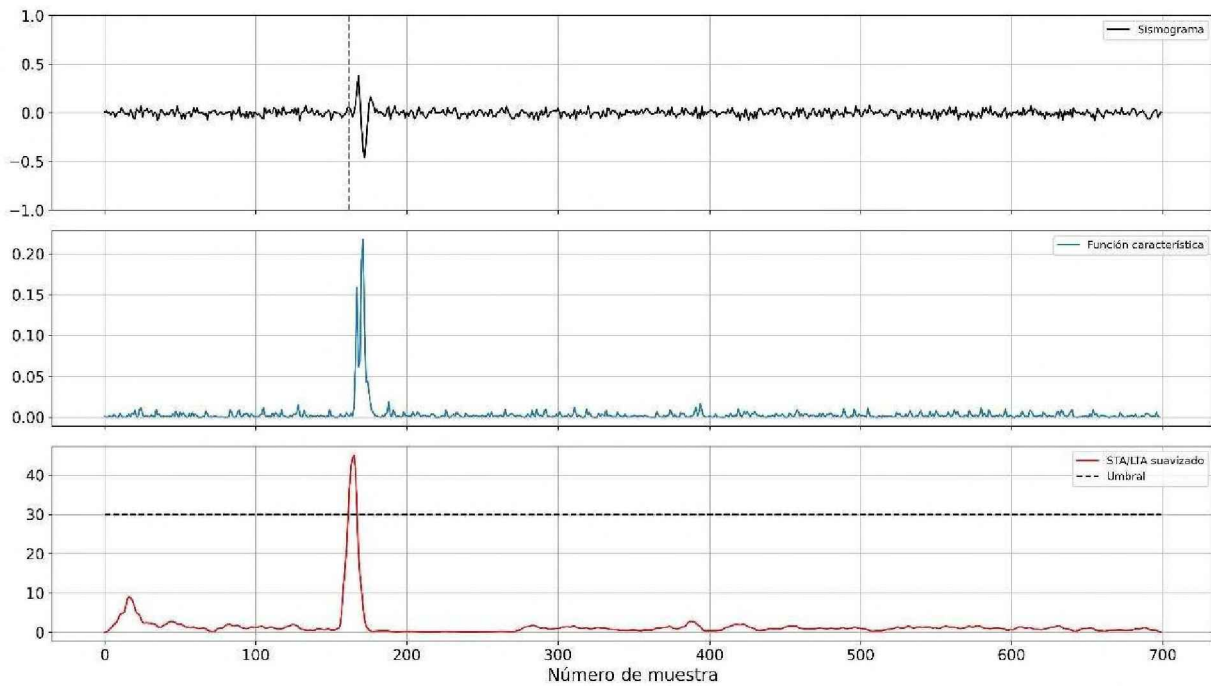


Figura 1. Método de Allen modificado (MAM). Arriba: sismograma sintético con un evento. Medio: Función característica asociada a MAM. Abajo: STA/LTA suavizado (curva roja) con umbral propuesto para detección (línea negra punteada).

Los promedios STA y LTA se definen de la siguiente manera:

$$STA_i = \frac{1}{N_{STA}} \sum_{j=i-N_{STA}+1}^i e_j, \quad (6)$$

y

$$LTA_i = \frac{1}{N_{LTA}} \sum_{j=i-N_{LTA}+1}^i e_j, \quad (7)$$

donde N_{STA} y N_{LTA} representan la longitud en muestras de las ventanas de corto y largo período respectivamente. Debido a que el cociente STA/LTA es algo inestable, se lo suaviza mediante una ventana de Hanning de longitud temporal T_{Hann} . El atributo al cual se aplica el criterio de detección una vez definido el umbral, es el cociente STA/LTA filtrado.

Método de Allen modificado (MAM)

Este método es una modificación al método de Allen propuesta por [Sabbione & Velis \(2010\)](#). El método utiliza la misma función característica que el método de Allen tradicional (ecuación 1), pero los promedios STA y LTA son calculados utilizando la estrategia del método Earle-Shearer (ecuaciones 6 y 7). Asimismo, al atributo $r_i = \frac{STA_i}{LTA_i}$ se lo suaviza con una ventana de Hanning. Finalmente, se aplica el criterio ya previamente descrito: se asigna a la i -ésima muestra un arribo si el atributo r_i suavizado supera un determinado umbral THR , y $r_{i-1} < THR$. La Figura 1 ilustra el funcionamiento de MAM para un evento sísmico sencillo.

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

La misión InSight consiste en la instalación de varios instrumentos geofísicos para poder estudiar el interior del planeta Marte. Los instrumentos fueron instalados en la superficie del planeta por el InSight Lander (Banerdt et al., 2013). Entre los instrumentos, se encuentran dos sismómetros de tres componentes con alta ganancia, conjuntamente denominados SEIS. Más información acerca de este proyecto, enmarcado en la misión InSight, puede encontrarse en Lognonné et al. (2019).

El proyecto *Preparing for InSight* generó datos sintéticos que modelan las series de tiempo que registrarían los sensores SEIS. Éstos son los datos que se utilizan en este trabajo. Fueron sintetizados a partir de un modelo de velocidades 1D de Marte, y basándose en un catálogo que involucra tanto eventos tectónicos como impactos de meteoritos. Los sismogramas son presentados como datos provenientes de un sensor de velocidades triaxial Streckeisen STS-2, que registra en tres canales MHU, MHV y MHW, con la unidad en cuentas y con una frecuencia de Nyquist de 1.0 Hz.

Como se mencionó previamente, la característica principal de estos datos es su baja relación señal-ruido, que generalmente es menor a la unidad. En ese sentido, se debe aplicar un filtrado en frecuencia de los datos a fin de eliminar los ruidos coherentes más energéticos.

Filtrado de los datos

En general, el ruido ambiente tiene una componente de gran energía en los períodos altos, lo que produce un enmascaramiento de la señal de interés. Análogamente, el ruido ambiente y el ruido instrumental generan contenido de alta frecuencia, cercano a la frecuencia de Nyquist.

Las señales fueron cortadas en porciones de 24 horas de longitud. Para remover el ruido coherente y de alta amplitud, se decidió aplicar un filtro pasa-altas Butterworth de fase cero y orden 4 con una frecuencia de corte en 0.2 Hz. No se filtraron las altas frecuencias para evitar la pérdida de energía de alta frecuencia de la señal de interés, lo que dificultaría su detección. También se aplicó una ventana de Hanning en los bordes de cada serie de tiempo truncada para evitar efectos de borde.

La elección de la frecuencia de corte se hizo mediante un análisis de prueba y error, considerando eventos visibles y observando de qué manera la amplitud máxima de algunos eventos variaba en relación con la del ruido. La frecuencia de corte obtenida a partir de este análisis coincide con la utilizada por Géoazur.

ALGORITMO DE REDUCCIÓN A UNA COMPONENTE

Dadas las características del ruido y de la señal, si bien en general el filtrado de los datos es necesario, no es suficiente para optimizar la relación señal/ruido de los sismogramas. Por otro lado, para reducir el riesgo de omitir eventos, sería necesario aplicar todos los métodos de detección a las tres componentes del sismómetro, lo que complejiza y dificulta la determinación de arribos. La razón de esto es que cada arribo y cada componente tiene asociada una relación señal/ruido diferente, que depende del acimut e inclinación del hipocentro asociado al sismo.

En ese sentido, para mitigar estas dificultades, se plantea la posibilidad de un algoritmo que precondicione los datos de tal manera que la relación señal/ruido mejore y que solo sea necesario trabajar con una componente en vez de con tres. Esto permite cierta independencia de la posición relativa entre el foco y el sensor, y la reducción de las incertidumbres que pudieran generarse en el caso de que las detecciones se realizaran componente a componente. Es decir, por un lado, se busca una forma de construir un sismograma que incorpore la información de las tres componentes en una sola, eliminando la incertidumbre antes señalada. Y por otro lado, se obtiene un sismograma con mejor relación S/R (Gómez & Velis, 2021).

En resumen, el método propuesto tiene dos objetivos fundamentales:

- Mejorar de manera significativa la relación señal/ruido de los eventos sísmicos a fin de que éstos puedan ser detectados con mayor facilidad.
- Permitir trabajar con un único sismograma en vez de con un sismograma por componente.

Características del método

En un medio elástico, las ondas internas se caracterizan, entre otras cosas, por estar linealmente polarizadas, mientras que las ondas superficiales presentan una polarización elíptica (Kulhánek, 1990). Esto implica que, para cada evento asociado a una onda interna, existe una única dirección (determinada por un acimut y una inclinación respecto del sistema de referencia dado por la orientación del sismómetro) para la cual la energía de las ondas compresionales (o transversales) es máxima. Esto implica que, dado un evento sísmico, la dirección de polarización se puede obtener rotando las componentes (U, V, W) del sismómetro hasta que la energía del mismo sea máxima en una componente y mínima en las dos restantes.

La metodología propuesta involucra, de manera general, las siguientes etapas:

1. Considerar un evento sísmico, asumiendo en principio que contiene fases linealmente polarizadas, de longitud δt en tiempo, o N_w en muestras.
2. Seleccionar arbitrariamente una componente y calcular en dicha componente la energía del evento.
3. A partir de las tres componentes del sismómetro, seleccionar un acimut (en un rango de 0 a 2π) y una inclinación (en un rango de 0 a π) y rotar la componente seleccionada en la dirección determinada por los ángulos elegidos.
4. Con la componente rotada, recalcular la energía.
5. Repetir los pasos 3 y 4 para todos los acimuts y para todas las inclinaciones.
6. Seleccionar los ángulos para los cuales la energía del evento es máxima, que se denominan ángulos óptimos.
7. Rotar la componente seleccionada respecto del acimut e inclinación óptimos.

Esta metodología garantiza que, finalizados los pasos previamente descritos, toda la energía calculada para ese evento esté contenida en la componente seleccionada. Repitiendo esto para todos los eventos, lo que se obtiene es un único sismograma, construido a partir de la información obtenida de las tres componentes, con la energía de los eventos maximizada. En este punto, es importante marcar que el método altera la forma, amplitud, acimut e inclinación de la fase sísmica, por lo que el dato reducido a una componente representa solamente una herramienta para los métodos de detección.

Sin pérdida de generalidad, en este trabajo maximizamos la energía de la componente W ("vertical"). No obstante, la elección de una componente u otra es arbitraria y los resultados no se alterarían. En lo que sigue, con el objeto de hacer más amena la explicación de los detalles del método, se hablará de la componente vertical cuando se haga referencia a la componente de energía máxima.

Maximización de la energía

En la práctica, el método de reducción a una componente se basa en el problema de maximizar la energía en función de dos ángulos, es decir, es un problema de optimización local 2D (ver Figura 2). Matemáticamente, la maximización de la energía puede descomponerse en dos rotaciones consecutivas:

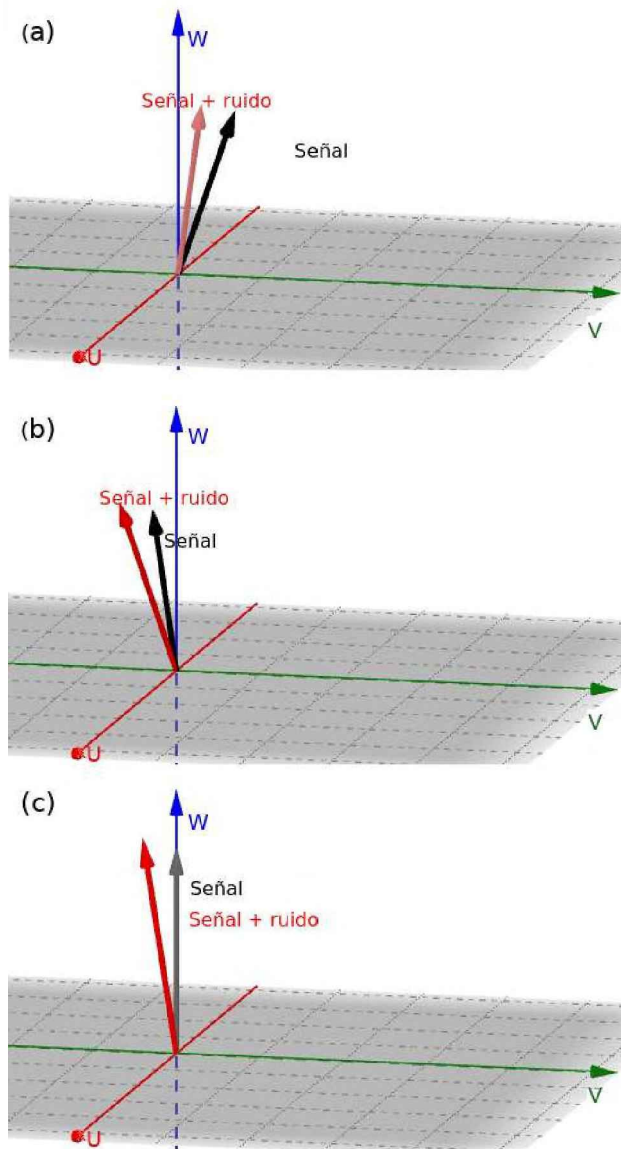


Figura 2. Esquema que resume los dos pasos para la rotación de la señal. (a) Señal (negro) y la misma señal contaminada con ruido (rojo). (b) Luego de la primera rotación, la energía queda contenida en el plano (U, W). La presencia de ruido afecta la rotación, habiendo un poco de energía todavía en la componente V . (c) Luego de la segunda rotación, la señal contaminada no está completamente proyectada sobre el eje W , por la presencia de ruido.

1. Rotar respecto de la componente vertical W hasta que la energía de la componente U sea máxima (o de manera equivalente, que la energía de la componente V sea máxima). Esto garantiza que, luego de la primera rotación, toda la energía del evento esté contenida exclusivamente en el plano (U, W) o (V, W).
2. Rotar respecto de la componente horizontal V (cuya energía fue minimizada en el paso anterior, o U si fue ésta la componente cuya energía se eligió minimizar) hasta que la energía de la componente W sea máxima.

Esto permite separar el problema único de optimización 2D en dos problemas de optimización 1D.

Energía en componentes rotadas

Se considera en primer lugar una rotación sobre el plano (U, V) de un ángulo ϕ . Este ángulo es análogo al acimut. La energía de la señal en la componente rotada V radianes ϕ ($E_V(\phi)$) puede calcularse para la i -ésima muestra mediante (Gómez, 2022)

$$E_V(\phi) = \sum_i (U_i \cos \phi + V_i \sin \phi)^2. \quad (8)$$

La primera etapa del método consiste en minimizar la ecuación (9). Puede demostrarse que el ángulo ϕ^* que minimiza la energía tiene la forma

$$\phi^* = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \sum_i U_i V_i}{\sum_i U_i^2 - \sum_i V_i^2} \right), \quad (9)$$

donde E_U y E_V representan la energía de las componentes U y V previo a la rotación (Gómez, 2022).

De manera análoga, luego de hallar ϕ^* y rotar el evento para proyectar el evento al plano (U, W) , obtenemos una señal cuya energía en las componentes U y W se vieron modificadas (aumentadas), que ahora se denominan $E_U^{(1)}$ y $E_W^{(1)}$, respectivamente. La inclinación óptima θ^* puede calcularse mediante (Gómez, 2022)

$$\theta^* = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \sum_i U_i^{(1)} W_i^{(1)}}{E_U^{(1)} - E_W^{(1)}} \right). \quad (10)$$

A pesar de contar con expresiones cerradas para calcular ϕ^* y θ^* , en este trabajo se adoptó una estrategia de minimización numérica y no analítica, por dos motivos:

1. Las ecuaciones (10) y (11) tienen dos soluciones, una para el mínimo de la energía y otra con un salto de $\pm\pi/2$. Esto implica que se requiere un criterio adicional para la determinación del valor mínimo, el cual se busca. Sin embargo, esto requiere cálculos adicionales.
2. Se ha observado que el cálculo analítico de los ángulos óptimos provoca saltos de $\pm\pi$. Si bien la energía no se modifica para cambios de $\pm\pi$, esto impide una adecuada interpretación de los ángulos cuando se los observa gráficamente como función del tiempo, puesto que los ángulos presentan discontinuidades. En ese sentido, es preferible una alternativa que asegure la continuidad de los ángulos para observar su comportamiento constante en presencia de un evento linealmente polarizado.

Para evitar estos inconvenientes, y por simplicidad, en este trabajo se estimaron los ángulos óptimos mediante el clásico método del gradiente descendente.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

En la práctica, en general no es posible conocer a priori la presencia de un evento. Por eso, el método se basa en el uso de una ventana móvil de longitud N_w que avanza muestra a muestra. El algoritmo de optimización se aplica sobre los datos abarcados por la ventana móvil y los ángulos óptimos son asignados a la muestra central de la ventana. La longitud de esta ventana móvil debe ser representativa de un evento, pero no debe ser demasiado grande para no incorporar ruido incoherente que dificulte la determinación de los ángulos óptimos.

Dentro de la ventana móvil puede o no haber señal, y ésta puede o no estar linealmente polarizada. Si sucede alguna de estas dos situaciones, el resultado de la optimización llevará a la situación de que no será posible concentrar toda la energía en una sola componente. Una ventaja importante del método es que, si existe una señal en la ventana en cuestión y ésta no está linealmente polarizada, la relación señal/ruido no empeora (Gómez, 2022).

Para cada posición de la ventana móvil, es necesario proveer al método de un ángulo inicial a partir del cual comenzar la iteración. Para la primera ventana, se hace un cálculo grueso de la energía del dato dentro de la ventana para un número pequeño de ángulos equiespaciados entre 0 y π , y se selecciona aquel para el cual la energía es mínima como valor inicial. Para las ventanas siguientes se toma como

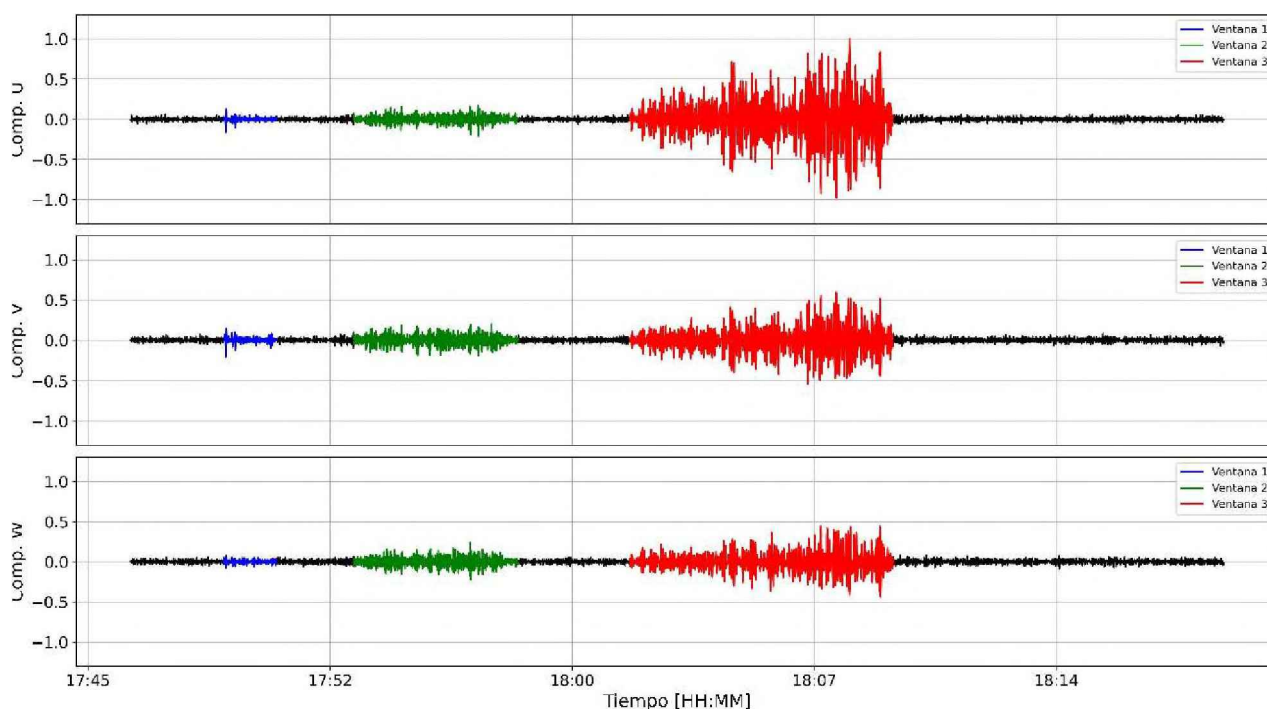


Figura 3. Posibles eventos seleccionados para ejemplificar la eficacia del algoritmo. Los tres eventos se corresponden con las ventanas azul, verde y roja. Arriba: Componente U. Medio: Componente V. Abajo: componente W.

ángulo inicial el ángulo óptimo obtenido en la ventana anterior. Esta estrategia asegura la continuidad de los ángulos en función del tiempo y evita los saltos de $\pm\pi$ que dificultan la interpretación gráfica.

Ejemplo de segmento de sismograma específico

Para verificar la eficacia del método, se seleccionó un segmento de la serie de tiempo con una duración de 34 minutos (ver Figura 3). Dicho segmento contiene tres eventos detectados manualmente. La ventana seleccionada contiene 3 posibles eventos con relación S/R y duración temporal variables.

Aplicando el método de reducción a la componente vertical W con una longitud de ventana móvil de $N_w = 51$ muestras, se obtuvieron los ángulos óptimos de la primera y la segunda rotación. En las Figuras 4 y 5 se observan los sismogramas antes y después de la primera y la segunda rotación junto con los ángulos óptimos obtenidos, respectivamente.

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para la relación S/R en la componente vertical de cada evento en cada etapa. Tanto el evento 1 como el evento 3 pudieron aumentar su relación S/R. Por su parte, el evento 2 no aumentó su S/R de manera considerable. Observando las series de tiempo del ángulo óptimo en la Figura 5, es claro que en la segunda rotación el evento no está linealmente polarizado, puesto que el ángulo no presenta un comportamiento constante. Por este motivo, el algoritmo no funciona adecuadamente para el evento 2. Sin embargo, incluso en el caso en que la señal no está linealmente polarizada, se verifica numéricamente que la relación S/R no disminuye, demostrando que la reducción a una componente no empeora la relación S/R de eventos con polarización no lineal.

Se puede observar gráficamente que no toda la energía de la señal fue transferida a la componente W , sino que, por la presencia del ruido, parte de la energía de la señal queda en el plano horizontal. Es decir, en presencia de ruido, los ángulos óptimos presentarán variaciones que impedirán una perfecta rotación a la componente vertical.

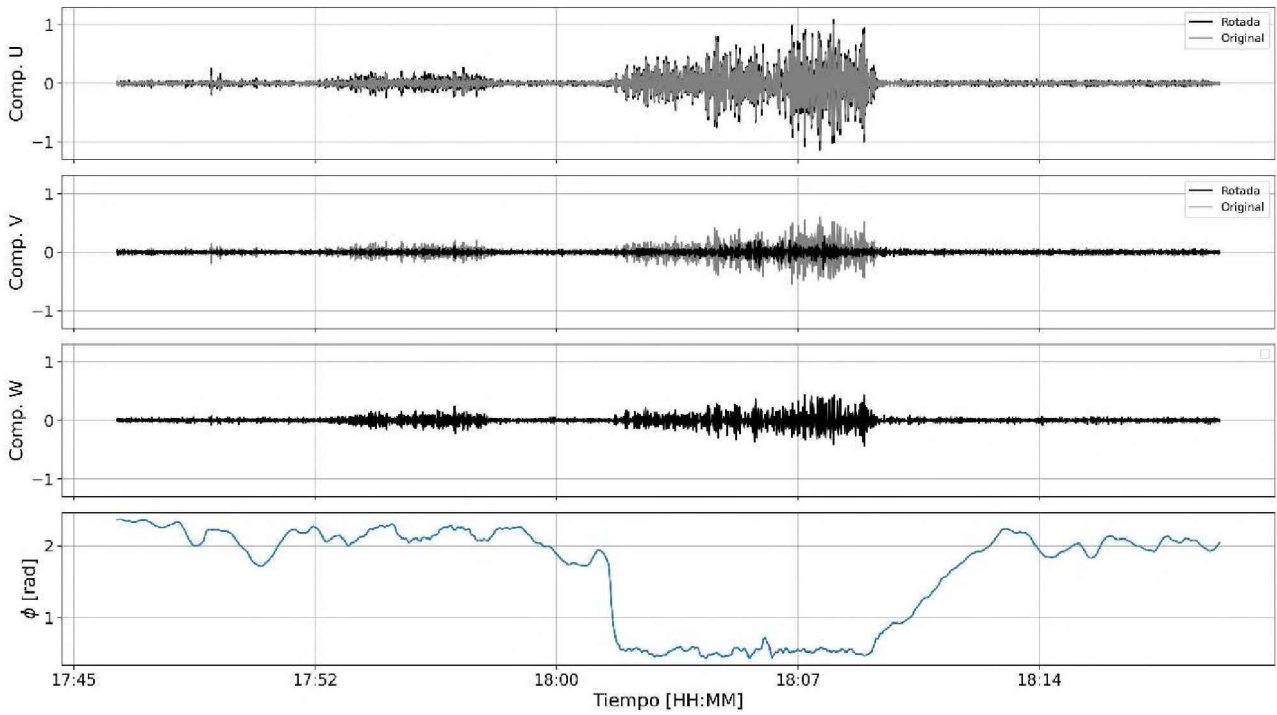


Figura 4. Sismograma antes (gris) y luego de la primera rotación (negro). Abajo: ángulo óptimo obtenido para cada muestra en la primera rotación.

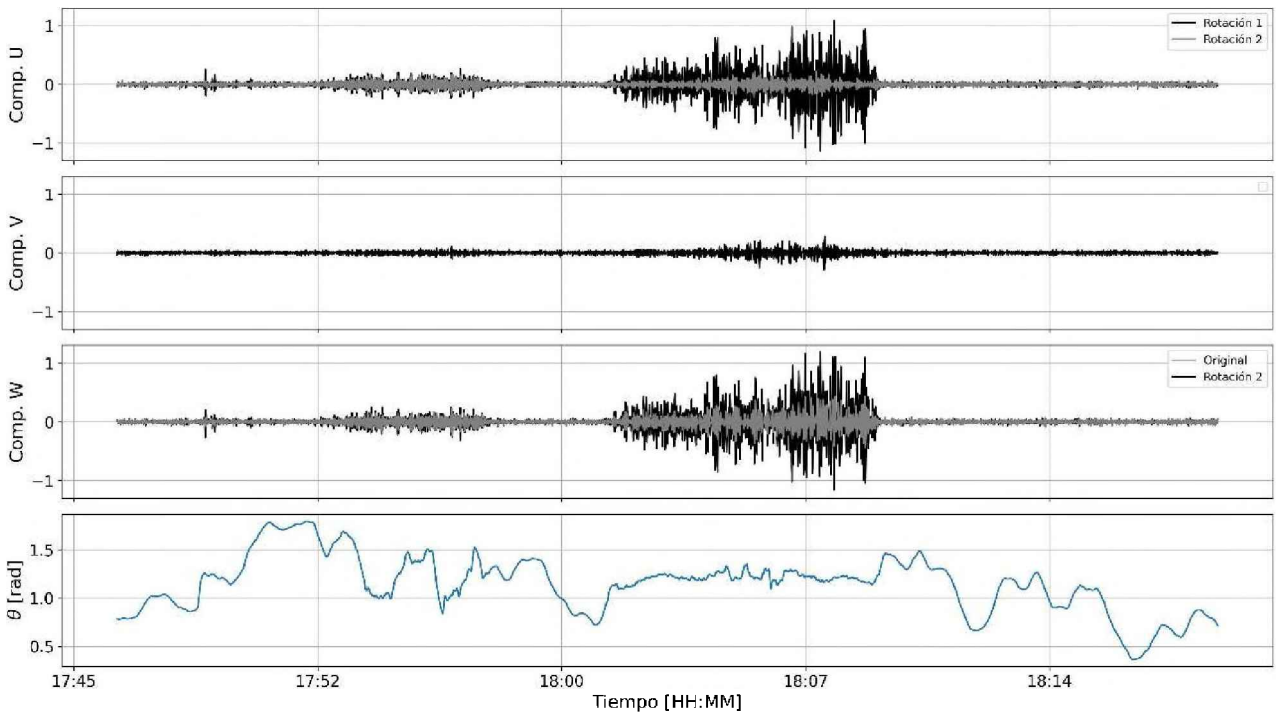


Figura 5. Sismograma antes (gris) y luego de la segunda rotación (negro). Abajo: ángulo óptimo obtenido para cada muestra en la segunda rotación.

RESULTADOS

Para evaluar los resultados de los métodos de detección automática, en todos los casos se utilizaron los parámetros indicados en la Tabla 2. Como referencia, se utilizaron las detecciones hechas por el equipo de Géozur (Rolly et al., 2019). El equipo de Géozur detectó 214 eventos que fueron remitidos oportunamente a los responsables del proyecto *Preparing for InSight*. Las 214 fases picadas por Géozur fueron comparadas con las detecciones resultantes de los métodos aplicados en este trabajo, previo y luego de la reducción a una componente.

Cabe destacar que las detecciones hechas por Géozur no son perfectas, ya que algunas pueden ser falsos positivos. Por otro lado, es posible que haya muchas fases no detectadas (van Driel et al., 2019). Aun así, el desempeño de Géozur fue muy bueno en comparación con otros equipos participantes.

Por simplicidad, dado que no se contó con los picados realmente “correctos”, a los fines del análisis se consideraron las detecciones de Géozur como referencia para estudiar la eficiencia de los métodos aplicados en este trabajo. En este sentido, se define un evento correctamente detectado como todo evento detectado por los métodos cuya distancia temporal respecto a un arribo picado por Géozur es menor a la tolerancia especificada. Las tolerancias utilizadas para la comparación fueron de 12 s, 18 s y 24 s. Cabe señalar que el objetivo fue realizar detecciones de arribos, y no determinaciones precisas de los tiempos de arribo de las fases.

Detecciones antes y después de la reducción a una componente

La detección sin reducción a una componente involucra aplicar los métodos de picado automático a cada una de las componentes por separado. Por un lado, se cuantificó el porcentaje de detecciones cuyos tiempos de arribo coinciden con los detectados por Géozur dentro de las tolerancias especificadas. Por otro lado, se calcularon la media y la desviación estándar de las diferencias. El mismo cálculo se realizó para el caso de los datos luego de la reducción a una componente.

Por cuestiones de espacio, en este trabajo se presentan los resultados numéricos solamente asociados a la componente vertical sin rotar. Los resultados obtenidos al aplicar los métodos de detección a las componentes U y V sin rotar son análogos (Gómez, 2022).

Componente W sin rotar

La Tabla 3 resume los resultados obtenidos tras aplicar los algoritmos de detección a la componente W sin rotar. El método MAM es el que más detecciones correctas obtuvo para bajas tolerancias. Para la tolerancia de 24 s, el número de detecciones coincide con ESM. Por otro lado, MAM arrojó un mayor número de detecciones que RAM y ESM, indicativo de falsos positivos. Estos resultados son consistentes en todas las componentes.

Los valores medios y las desviaciones estándar se resumen en la Tabla 4. Como es de esperar, las desviaciones estándar aumentan conforme la tolerancia aumenta. Los valores medios del método RAM son los más cercanos a cero para todas las tolerancias, en tanto que el método MAM es el que tiene el mayor valor medio. ESM supera al resto de los métodos tanto en valor medio como en dispersión para tolerancias altas.

Tabla 1. Relación S/R de cada evento luego de la reducción a la componente vertical.

Etapa	Evento 1	Evento 2	Evento 3
Original	2	7	26
Rotado	4	12	226

Tabla 2. Parámetros utilizados para cada uno de los tres métodos de detección automática. All time windows T are given in seconds.

Método	Parámetro	Valor
RAM	C_3	0.05
	C_4	0.01
	T_{taper}	120
	THR	3
ESM	T_{STA}	5
	T_{LTA}	50
	T_{Hann}	10
	T_{taper}	120
	THR	3
MAM	T_{STA}	5
	T_{LTA}	50
	T_{Hann}	10
	T_{taper}	250
	THR	8

Tabla 3. Número de detecciones y porcentaje de coincidencias con los resultados de Géozur para diferentes tolerancias, para el caso de la componente W sin rotar.

Método	12 s	18 s	24 s
RAM	5	10	13
ESM	8	11	21
MAM	14	19	21
Detecciones totales	193	213	430

Tabla 4. Media y desviación estándar (en segundos) de las diferencias entre los picados de Géozur y los métodos utilizados, para el caso de la componente W del sismograma sin rotar.

Método	12 s	18 s	24 s
RAM	-0.5 ± 7.0	-1.5 ± 11.5	-1.1 ± 14.5
ESM	-1.1 ± 7.2	1.2 ± 10.3	-6.1 ± 15.8
MAM	-3.2 ± 6.4	-1.2 ± 10.1	-0.6 ± 12.6

Componente W con reducción a una componente

La Tabla 5 resume la cantidad de detecciones por método aplicados a la componente W luego de la reducción a una componente. Se observa que la cantidad de eventos detectados es significativamente menor que en el caso sin rotación. Por otro lado, se observa que la cantidad de eventos coincidentes con Géozur aumenta considerablemente para todas las tolerancias consideradas.

La Tabla 6 resume los valores medios y desviaciones estándar de las diferencias entre los picados obtenidos por los métodos utilizados y los tiempos de Géozur, utilizando la componente W luego de la reducción a una componente.

Los métodos RAM y ESM muestran mejoras significativas en su valor medio, mientras que las desviaciones estándar disminuyen considerablemente para todas las tolerancias consideradas. En particular, para el método RAM los valores medios son más cercanos a cero que en las componentes sin rotar. Por su parte, MAM presenta dispersiones menores para todas las tolerancias.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La Figura 6 muestra el porcentaje de detecciones coincidentes con Géozur para cada componente previo a la rotación (barra blanca), y el porcentaje de detecciones realizadas luego de la rotación (barra azul). Se observa un aumento significativo de las detecciones para todas las tolerancias luego

Tabla 5. Número de detecciones y porcentaje de coincidencias con los resultados de Géozur para diferentes tolerancias, para el caso del sismograma rotado.

Método	12 s	18 s	24 s
RAM	21	24	26
ESM	24	27	30
MAM	16	19	24
Detecciones totales	172	217	348

Tabla 6. Media y desviación estándar (en segundos) de las diferencias entre los picados de Géozur y los métodos utilizados, para el caso de la componente W del sismograma rotado.

Método	12 s	18 s	24 s
RAM	-0.7 ± 6.0	0.0 ± 8.6	1.0 ± 10.7
ESM	1.4 ± 4.9	2.2 ± 7.1	2.7 ± 9.9
MAM	3.2 ± 5.2	2.4 ± 7.7	4.2 ± 11.1

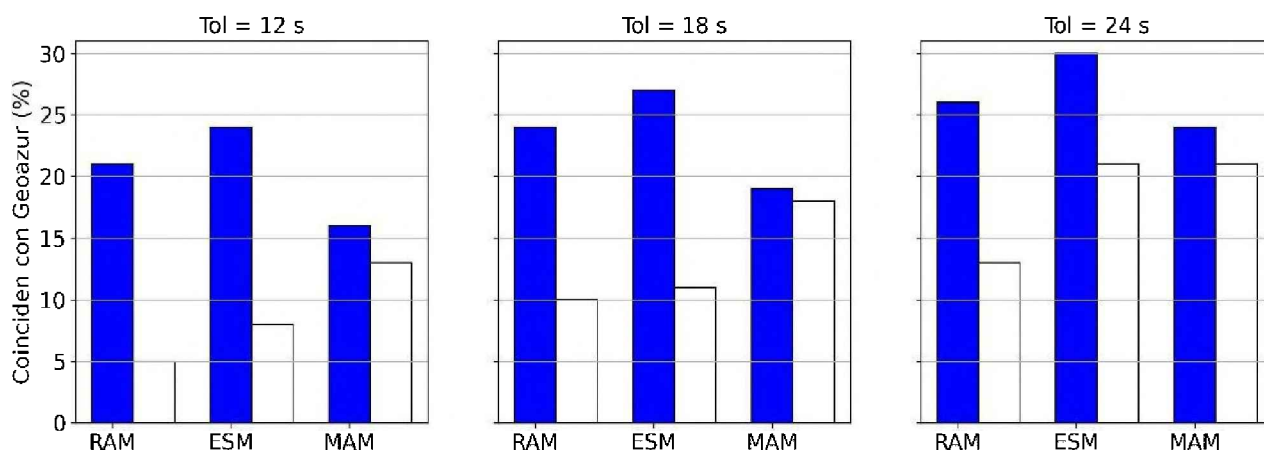


Figura 6. Porcentaje de detecciones coincidentes con Géozur para cada componente sin rotar (blanco) y para la componente W rotada (azul).

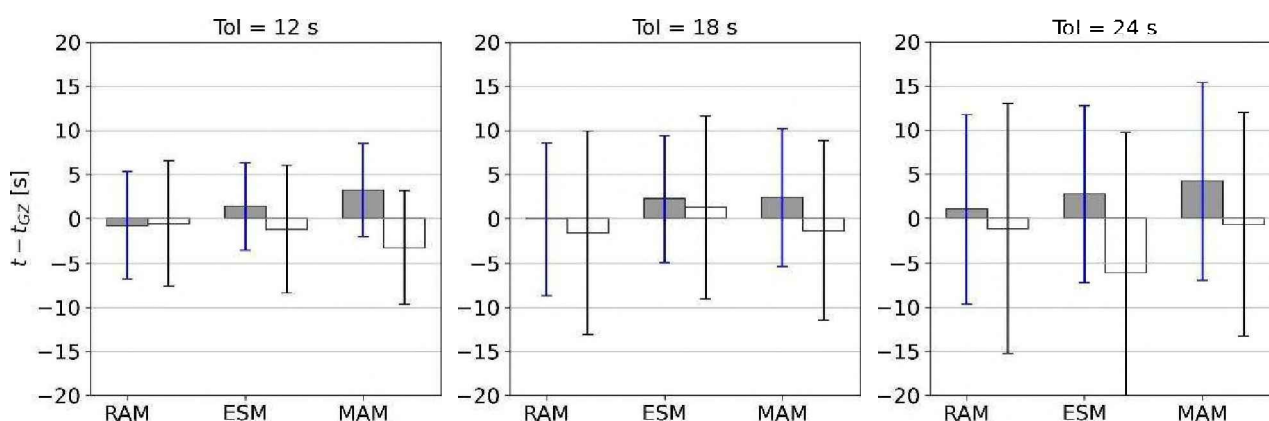


Figura 7. Porcentaje de detecciones coincidentes con Géozur para cada componente sin rotar (blanco) y para la componente W rotada (azul).

de aplicado el algoritmo de reducción. El comportamiento estadístico de los resultados se ilustra en la Figura 7.

Previo a la reducción a una componente, el método MAM presenta valores medios bajos, pero desviaciones altas. Éstas mejoran luego de la reducción a una componente. Por su parte, ESM es el método con más cantidad de eventos coincidentes con Géozur luego de la rotación. En el caso de MAM, se observan mejoras significativas en cuanto a la dispersión; sin embargo, el valor medio resultante de este método no disminuye, llegando a ser el método con mayor media para la tolerancia de 24 s. En resumen, la rotación provoca un incremento importante en la cantidad de eventos correctamente detectados.

CONCLUSIONES

Para poder realizar una comparación y estudiar la veracidad de los resultados obtenidos, se utilizaron como referencia los arribos picados por Géozur. Para su obtención, Géozur aplicó dos métodos de detección en paralelo, cuyos resultados fueron catalogados como correctos o falsos mediante una inspección manual. Esto representa una diferencia fundamental con respecto a cómo se realizaron las detecciones en este trabajo, donde solo se realizó una detección automática mediante los algoritmos descritos. En ese sentido, es razonable que el desempeño de los métodos cuando éstos son contrastados con las detecciones de Géozur sea bajo, independientemente del método utilizado.

Sin la rotación de la señal, aplicamos los métodos a las tres componentes y cuantificamos su desempeño para distintas tolerancias. Con el sismograma rotado, la cantidad de detecciones coincidentes con Géozur aumenta, pasando de una cantidad máxima de 21 % a 30 %. Además, la cantidad de detecciones total disminuye, lo que indica una reducción en la cantidad de detecciones falsas, sobre todo para el método MAM. Que el número de detecciones falsas descienda representa también una mejora de la eficacia de los métodos de detección, porque brinda mayor confiabilidad a los resultados.

Los resultados de los métodos de detección demuestran que el método de reducción a una componente no solo aumenta la relación S/R y por ende la cantidad de eventos detectados coincidentes con Géozur, sino que además conduce a una reducción en los valores medios y dispersiones de las diferencias.

Finalmente, los beneficios observados tras aplicar el algoritmo de reducción a una componente sugieren que la eficacia de otros algoritmos de detección automáticos de la Sismología (o la microsísmica) no testeados en este trabajo también podrían beneficiarse significativamente.

REFERENCIAS

- Allen, R. V. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68(5), 1521–1532. <https://doi.org/10.1785/BSSA0680051521>
- Banerdt, W., Smrekar, S., Lognonné, P., Spohn, T., Asmar, S., Banfield, D., Boschi, L., Christensen, U., Dehant, V., Folkner, W., *et al.* (2013). InSight: A discovery mission to explore the interior of Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, número 1719, 1915.
- Clinton, J. F., Giardini, D., Lognonné, P., Banerdt, B., van Driel, M., Drilleau, M., Murdoch, N., Panning, M., Garcia, R., Mimoun, D., *et al.* (2017). Preparing for InSight: An invitation to participate in a blind test for Martian seismicity. *Seismological Research Letters*, 88(5), 1290–1302. <https://doi.org/10.1785/0220170094>
- Earle, P. S. & Shearer, P. M. (1994). Characterization of global seismograms using an automatic-picking algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(2), 366–376. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840020366>
- Gómez, A. R. (2022). Detección automática de eventos sísmicos marcianos. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/135425>
- Gómez, A. R. & Velis, D. R. (2021). Preacondicionamiento de datos sísmicos 3C para mejorar la relación señal/ruido y favorecer la detección automática de eventos. *Libro de resúmenes de la XXIX reunión científica de la Asociación Científica de Geofísicos y Geodestas (AAGG2021)*, 178.
- Kulhánek, O. (1990). *Anatomy of Seismograms: For the IASPEI/Unesco Working Group on Manual of Seismogram Interpretation*. Elsevier.
- Lognonné, P., Banerdt, W. B., Giardini, D., Pike, W., Christensen, U., Laudet, P., De Raucourt, S., Zweifel, P., Calcutt, S., Bierwirth, M., *et al.* (2019). SEIS: InSight's seismic experiment for internal structure of Mars. *Space Science Reviews*, 215(1). <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6>
- Rolly, L., Ambrois, D., Chèze, J., Peix, F., Alemany, H., Mercerat, D., Balestra, J., Deschamp, A., & Twardzik, C. (2019). *Contribution of Géozur to the InSight blind test*.
- Sabbione, J. I., Rosa, M. L., Velis, D. R., & Sabbione, N. C. (2011). Análisis comparativo de diferentes métodos de picado automático de fases en terremotos registrados en la Estación Sismológica de La Plata (LPA). *Geoacta*, 36(2), 189–209.
- Sabbione, J. I. & Velis, D. R. (2010). Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms. *Geophysics*, 75(4), V67–V76. <https://doi.org/10.1190/1.3463703>
- van Driel, M., Ceylan, S., Clinton, J. F., Giardini, D., Alemany, H., Allam, A., Ambrois, D., Balestra, J., Banerdt, B., Becker, D., *et al.* (2019). Preparing for InSight: Evaluation of the blind test for Martian seismicity. *Seismological Research Letters*, 90(4), 1518–1534. <https://doi.org/10.1785/0220180379>