

COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE RUIDO SÍSMICO PARA DATOS REGISTRADOS EN LA REGIÓN DE LAS CUENCAS PARANÁ, CHACO-PARANÁ Y PANTANAL

Melina Lunansky^{1,2}, María Laura Rosa², Martin Schimmel³

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

² Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata

³ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera - CSIC

mlunansky@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

La extracción de la función de Green a partir de la correlación cruzada de datos de ruido sísmico entre pares de estaciones debe su éxito a que las ondas son registradas en ambas estaciones sin la necesidad de ocurrencia de un terremoto. El stack de las correlaciones cruzadas sobre largos lapsos de tiempo mejora las formas de onda y contribuye a disminuir las dificultades generadas por la distribución irregular de fuentes de ruido. En este trabajo comparamos dos metodologías de cálculo de correlación cruzada, la Correlación Cruzada Geométricamente Normalizada y la Correlación Cruzada de Fase, y dos metodologías de cálculo de stack, el Stack Lineal y el Stack Pesado por la Fase, utilizando datos de ruido sísmico registrados en la región de las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal, en Sudamérica. El análisis de la similitud en función de la cantidad de días sumados en el stack, permite definir ciertos parámetros del preprocesamiento, como las frecuencias de corte del filtro pasabanda y la longitud de los registros. A partir de dicho análisis, hemos determinado que la Correlación Cruzada de Fase resulta ser la mejor opción para los datos utilizados, siendo un año de datos suficiente para obtener la estabilidad adecuada en los resultados. En cuanto a la comparación en las metodologías de stack, los resultados alcanzados son similares en ambas.

Palabras clave: RUIDO SÍSMICO - CORRELACIÓN CRUZADA - STACK - SIMILITUD - ESTRUCTURA SÍSMICA

ABSTRACT

The extraction of the Green's function from the cross-correlation of seismic noise data between pairs of stations is achieved because seismic noise is recorded at both stations, without the need for an earthquake to occur. The stacking of cross-correlations over a long period of time improves the waveforms and contributes to reduce the difficulties generated by the irregular distribution of noise sources. In this study we compare two methodologies for the cross-correlation determination, the Geometrically Normalized Cross-Correlation and the Phase Cross-Correlation, and two different procedures of stacking, the Linear Stack and the Phase-Weighted

Stack, applied to seismic noise data recorded in the region of the Paraná, Chaco-Paraná and Pantanal basins, in South America. The analysis of similarity based on the amount of days considered in the stack, allows us to define certain parameters of the preprocessing, such as the cut-off frequencies of the bandpass filter and the length of the records. Based on this analysis, we have concluded that the Phase Cross-Correlation methodology is the best option for these data, being one year of data enough to obtain the adequate stability in the results. Both procedures of stacking have produced similar results for these data.

Key words: SEISMIC NOISE - CROSS-CORRELATION - STACK - SIMILARITY - SEISMIC STRUCTURE

INTRODUCCIÓN

El análisis de las ondas sísmicas permite estudiar la distribución de los parámetros elásticos del medio por el que viajan. Es por esto que la sismología aporta información con la mayor resolución del interior terrestre (Christensen & Mooney, 1995). En los últimos años ha habido un gran avance en las técnicas aplicadas para resolver y mapear detalles finos de la estructura sísmica de la Tierra. Hasta el año 2000 las fuentes utilizadas para determinar esa estructura eran terremotos o fuentes artificiales. Luego se introdujo el concepto de interferometría sísmica mediante el cual es posible estimar la estructura interna a través de un campo de ondas generado por ruido sísmico o por las fuentes utilizadas hasta el momento. Una de las formas de aplicar esta técnica consiste en calcular la correlación cruzada del ruido sísmico registrado entre pares de estaciones, determinando las propiedades del subsuelo, sin necesidad de la ocurrencia de un terremoto (Wapenaar, 2004).

El ruido sísmico es una fuente natural, continua, detectable en cualquier lugar de la Tierra y con un contenido de frecuencias amplio que va desde 10^{-3} Hz hasta 10^1 Hz (Bonneyoy-Claudet et al., 2006). A partir del análisis del ruido se puede monitorear una región ininterrumpidamente, detectar las fuentes principales de ruido o realizar estudios de la estructura sísmica a diferentes escalas, con la resolución necesaria para determinar, por ejemplo, la estructura cortical superficial (Campillo & Paul, 2003; Shapiro & Campillo, 2004; Shapiro et al., 2005; Sabra et al., 2005, Rosa et al., 2016; Li et al., 2018; Schimmel et al., 2018; Lunansky, 2019; Nuñez et al., 2020; da Silva et al., 2021). En años recientes las técnicas de análisis de ruido sísmico fueron implementadas con éxito en el estudio de la corteza de otros cuerpos del Sistema Solar, como muestra el trabajo realizado con datos de Marte por Schimmel et al., (2021).

La función de Green se define como la respuesta del medio a una fuerza impulsiva y su estimación permite predecir el comportamiento del suelo frente a ciertas perturbaciones. Se ha demostrado teóricamente que si se considera una distribución espacial aleatoria de fuentes de ruido, la correlación cruzada de la señal registrada en dos estaciones converge a la función de Green del medio que existe entre ellas (Weaver, 2005; Gouédard et al., 2008). Sin embargo, esto en la práctica no sucede, ya que las fuentes de ruido presentan mayor preponderancia para algunos acimuts. Con el fin de superar estas dificultades se suman las correlaciones cruzadas sobre largos lapsos de tiempo, teniendo en cuenta la cantidad de datos disponibles. Para este trabajo se utilizó un año de datos.

Para propósitos de monitoreo o en casos en los que no se cuente con suficiente tiempo de datos se dificulta la correcta extracción de la señal, por lo que las metodologías implementadas cobran importancia. En este trabajo comparamos dos metodologías de cálculo de correlación cruzada, la Correlación Cruzada Geométricamente Normalizada (Geometrically Normalized Cross-Correlation, CCGN) y la Correlación Cruzada de Fase (Phase Cross-Correlation, PCC) (Schimmel, 1999), y dos metodologías de cálculo de stack, el Stack Lineal (Linear Stack, LS) y el Stack Pesado por la Fase (Phase-Weighted Stack, PWS) (Schimmel & Paulsen, 1997), con el objetivo de definir cuáles resultan más convenientes de implementar en el análisis de datos de ruido sísmico para la obtención de espesores corticales en la región de las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal.

METODOLOGÍA

Para analizar el ruido sísmico se aplica un preprocesamiento a las señales y luego se calcula la correlación cruzada y el stack. El preprocesamiento consiste en quitar la respuesta de instrumento para eliminar el efecto del sensor en cada registro. Luego se remueve la media y la tendencia, eliminando cualquier sesgo y se aplica un filtro pasabanda, centrado en la banda de frecuencias de interés. Finalmente se cortan las trazas, a fin de aumentar la cantidad de datos útiles (continuos). Por ende, es importante definir algunos parámetros, como la banda de frecuencias sobre la que se desea trabajar, las frecuencias de corte del filtro y la longitud de los registros.

La correlación cruzada es una operación que mide la semejanza entre dos series temporales identificando el tiempo de retraso, que se define como el tiempo que una de las señales está desfasada respecto a la otra. La correlación cruzada de dos señales temporales (u_i) está definida por la ecuación (1):

$$C(\tau) = u_1(t) * u_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(t) u_2(t+\tau) dt \quad (1)$$

donde $*$ es el operador de correlación cruzada, t el tiempo y τ el tiempo de retraso entre ambas señales.

La CCGN reduce la sensibilidad energética y hace que la correlación sea invariante a los cambios de amplitud entre los dos conjuntos de datos. Para ello se necesita realizar previamente una normalización temporal y espectral de las señales, siguiendo la metodología descrita por Bensen et al., (2007). La CCGN se define mediante la expresión (2):

$$C_{ccgn}(t) = \frac{\sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_0+T} u_1(t+\tau) u_2(\tau)}{\sqrt{\sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_0+T} u_1(t+\tau)^2 \sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_0+T} u_2(\tau)^2}} \quad (2)$$

donde T es la longitud de la ventana de correlación.

La técnica conocida como PCC se basa en la coherencia de fase de señales analíticas. La señal analítica $s(t)$ de una serie temporal $u(t)$ se define según (3):

$$s(t) = u(t) + iH[u(t)] \quad (3)$$

siendo $H[u(t)]$ la transformada de Hilbert de la serie temporal $u(t)$. La forma exponencial de la señal analítica $s(t)$ se puede escribir como (4):

$$s(t) = a(t) e^{i\phi(t)}, \quad (4)$$

siendo $a(t)$ la envolvente y $\phi(t)$ la fase instantánea. De esta manera la PCC queda definida de la forma (5):

$$C_{pcc}(t) = \frac{1}{2T} \sum_{\tau=\tau_0}^{\tau_0+T} \{ |e^{i\phi(t+\tau)} + e^{i\psi(\tau)}|^{\nu} - |e^{i\phi(t+\tau)} - e^{i\psi(\tau)}|^{\nu} \} \quad (5)$$

las fases instantáneas de u_1 y u_2 son $\phi(\tau)$ y $\psi(\tau)$ respectivamente. La sensibilidad de $C_{pcc}(t)$ se puede aumentar utilizando la potencia $\nu > 1$. Esta técnica permite evitar la normalización temporal y espectral, influyendo lo mínimo posible en la forma de onda, además de eliminar un paso del procesamiento de la señal. Esto se debe a que la PCC utiliza la coherencia de fase sin considerar la amplitud de la señal (Schimmel et al., 2011).

El stack consiste en sumar las correlaciones cruzadas calculadas con trazas registradas en diferentes rangos de tiempo para el mismo par de estaciones. Este procedimiento se lleva a cabo con el fin de aumentar la proporción de señal coherente frente a la señal incoherente de la correlación, y aproximar a la condición teórica de una distribución isotropa de fuentes de ruido sísmico. Generalmente cuanto mayor sea el número de correlaciones sumadas, mejor se verá la señal coherente (Bensen et al., 2007).

El LS es la suma lineal de las correlaciones cruzadas en el dominio del tiempo y se calcula según la ecuación (6):

$$C_l(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i(t), \quad (6)$$

donde N representa el número total de correlaciones sumadas y $C_i(t)$ es la i -ésima correlación.

Para determinar el PWS, cada muestra del LS es ponderada por la coherencia de sus fases instantáneas. Se aplica la técnica propuesta por Schimmel et al., (2011), que se basa en descomponer la señal en el dominio tiempo-frecuencia mediante la representación analítica de la transformada S (Stockwell et al., 1996). De esta manera, el peso se puede calcular mediante la ecuación (7):

$$C_{ps}(\tau, f) = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{S_j(\tau, f) e^{j2\pi f \tau}}{|S_j(\tau, f)|} \right|^{\nu} \quad (7)$$

siendo $S_j(\tau, f)$ la transformada S de la i -ésima serie temporal. Entonces, el stack se calcula a partir de la ecuación (8):

$$S_{pws}(\tau, f) = C_{ps}(\tau, f) S_s(\tau, f), \quad (8)$$

donde $S_s(\tau, f)$ es la transformada S del stack lineal. Luego se aplica la transformada S inversa con el fin de obtener el stack en el dominio del tiempo (Schimmel & Gallart, 2005).

A partir de la metodología detallada, realizamos el preprocesamiento para un grupo de datos de ruido sísmico y calculamos ambos tipos de correlación cruzada y ambas formas de stack, con el fin de comparar los resultados que nos permitan definir las técnicas a emplear en la obtención de mapas tomográficos de la zona de estudio mediante curvas de dispersión de la correlación cruzada de ruido sísmico.

REGIÓN DE ESTUDIO

La zona presenta una historia geológica compleja, especialmente en el basamento de las cuencas Pantanal y Paraná, donde confluyen terrenos de edad Precámbrica que evidencian procesos acrecionales, de amalgamamiento y de ciclos de deformación, producidos durante el Precámbrico y Paleozoico temprano (Dalla Salda et al., 1988; Rapela et al., 2007; Kroonenberg y Roever, 2009; Cordani et al., 2010; Heilbron et al., 2017). En dicho contexto, las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal, comprenden extensos y profundos depocentros sedimentarios que fueron conformándose durante el Fanerozoico. Estos depocentros se asientan parcialmente sobre los márgenes de dos grandes núcleos cratónicos: el cratón Amazoniano, al norte del área de estudio, y el cratón San Francisco, al noreste. Sin embargo, la mayor parte del basamento en el área de estudio está constituido por fragmentos cratónicos menores: a) cratones Río de la Plata y Pampia, en el ámbito de la cuenca Chaco-Paraná, b) cratones Paranapanema, Luis Alvez, Río de la Plata y Pampia, en el ámbito de la cuenca Paraná, y c) cratón Río Apa, en el ámbito de la cuenca Pantanal (Figura 1). La región se encuentra afectada por el lineamiento Transbrasiliano: la faja de deformación de mayor desarrollo del continente Sudamericano, que marca un significativo contraste evolutivo de las cortezas continentales determinadas a uno y otro lado de la sutura (Rapela et al., 2007; Cordani et al., 2010).

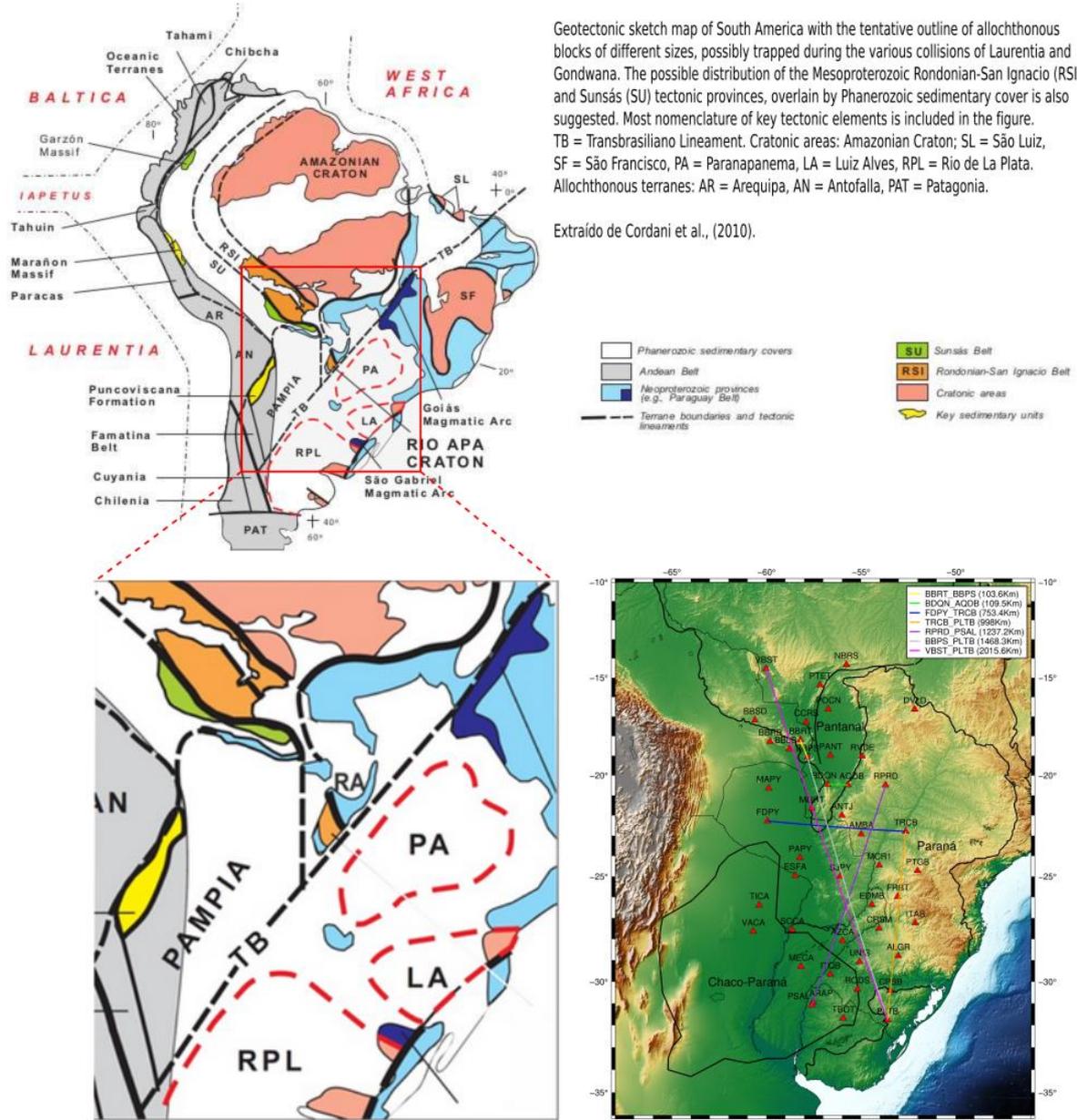


Figura 1. Arriba: mapa geotectónico de Sudamérica (extraído de Cordani et al., 2010).
 Abajo-izquierda: ampliación del mapa geotectónico para la zona de las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal. Abajo-derecha: mapa de las estaciones sísmológicas localizadas en la zona de las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal. En línea continua se indican las trayectorias analizadas.

DATOS Y PROCESAMIENTO

Contamos con ruido sísmico registrado en 45 estaciones sísmológicas BB con un muestreo de 100 Hz; 38 pertenecientes a la red XC (estaciones temporales que forman parte del proyecto “3-Basins”) y 7 a la red BL (estaciones permanentes de la “Rede Sismográfica Brasileira RSBR”), ubicadas en la región de las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal (Figura 1).

Seleccionamos para 10 estaciones un año de datos de la componente vertical, de 24 horas de longitud, correspondientes a 7 trayectorias, entre las que se encuentran la

trayectoria más larga, la más corta, una en dirección este-oeste y las restantes en distintos acimuts, de manera de analizar datos de ruido de las 3 cuencas (Figura 1).

Decimamos los datos a 10 Hz, a fin de observar claramente las ondas superficiales y redefinimos las longitudes de los registros, trabajando con trazas de 2, 4, 8 y 24 horas. Teniendo en cuenta las distancias más cortas y más largas entre estaciones, aplicamos filtros pasabanda con distintas frecuencias de corte de manera de establecer las frecuencias mínima y máxima, que nos permitan distinguir las ondas superficiales en la forma de onda. Para los datos analizados, la banda de frecuencias entre 0,02 Hz y 0,5 Hz resultó la más adecuada.

Empleando el código *Corr_stack_v04* (Schimmel, 2020) calculamos, para cada trayectoria, las correlaciones cruzadas mediante CCGN, realizando previamente normalización temporal y espectral, y mediante PCC. Luego, obtuvimos los stacks con LS y PWS considerando ambos tipos de correlación cruzada. En todos los casos se utilizó un potencia $=2$ tanto en el cálculo de la PCC como del PWS.

Dado que la calidad de los stacks depende de la cantidad de datos con la que se cuenta para cada estación, se calculó la similitud entre las correlaciones cruzadas cada 5 días de stack tomados aleatoriamente, y el stack total, usando un código en Python. La similitud nos permite medir la convergencia de la forma de onda de la función de Green y se representa en función de la cantidad de días considerados en el stack. Esta forma de representación también nos ayuda a definir apropiadamente la longitud de los registros.

RESULTADOS

Los resultados del análisis de la similitud para cada trayectoria considerando distintas longitudes de registro y combinación de metodologías de correlación cruzada y stack se presentan para distancias crecientes entre estaciones.

Para las trayectorias definidas por las estaciones BBRT y BBPS (distancia = 103.6 km) (Figuras 1 y 2) y por las estaciones BDQN y AQDB (distancia = 109.5 km) (Figuras 1 y 3), la convergencia es rápida tanto para las distintas correlaciones como para los dos tipos de stack, esto se debe a que la distancia entre estaciones es relativamente pequeña y en consecuencia las señales detectadas en ambas estaciones son parecidas. Sin embargo, si se utilizan registros diarios de ruido, es conveniente realizar stacks de más de 80 días para alcanzar una similitud superior a 0.95 si se aplica la PCC.

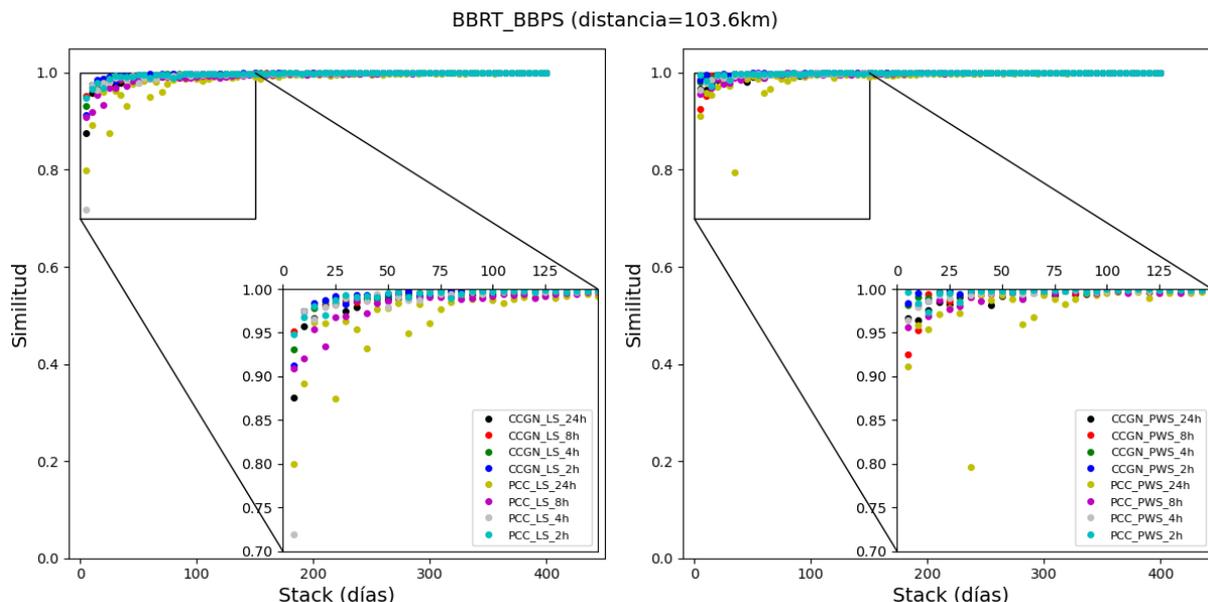


Figura 2. Gráficos de similitud correspondientes a la trayectoria entre las estaciones BBRT y BBPS, determinados considerando LS (izquierda) y PWS (derecha). En ambos gráficos se muestra la convergencia habiendo utilizado CCGN y PCC, para registros de 2, 4, 8 y 24 horas de longitud.

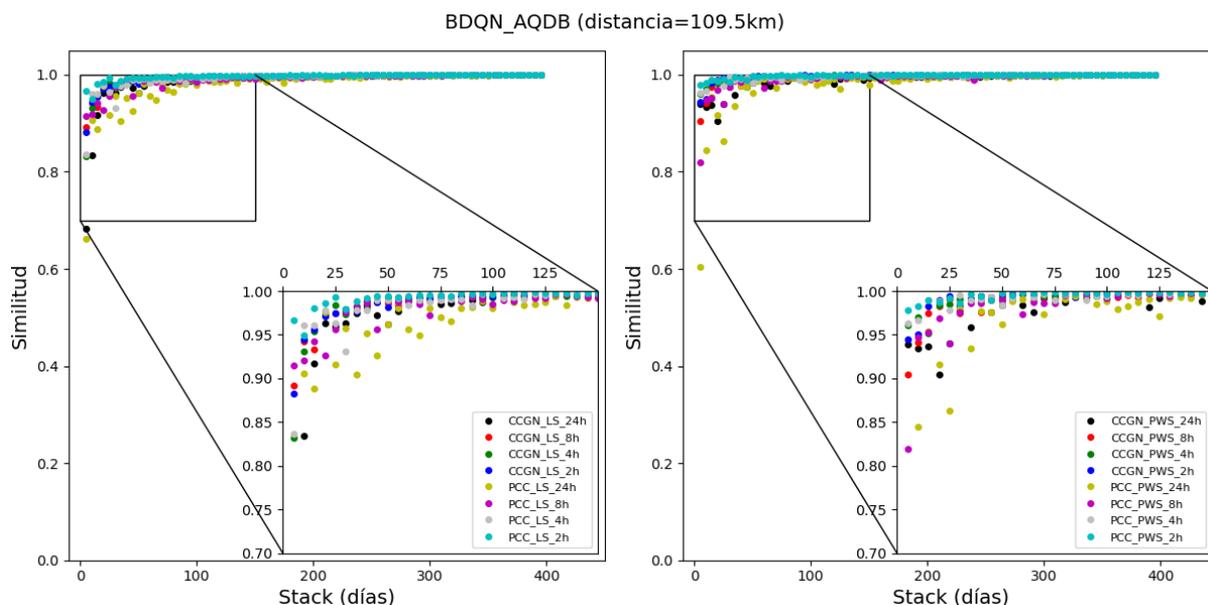


Figura 3. Gráficos de similitud correspondientes a la trayectoria entre las estaciones BDQN y AQDB, determinados considerando LS (izquierda) y PWS (derecha). En ambos gráficos se muestra la convergencia habiendo utilizado CCGN y PCC, para registros de 2, 4, 8 y 24 horas de longitud.

En la trayectoria definida por las estaciones FDPY y TRCB (distancia = 753.4 km) (Figuras 1 y 4), con una longitud considerablemente mayor que los casos anteriores, se observa que la convergencia varía notoriamente para los distintos métodos implementados, siendo más rápida cuando se utiliza PCC, tanto para el LS como para el PWS. Además, se puede observar en el gráfico de la izquierda correspondiente al LS, que el grado de similitud se mantiene para ambas correlaciones considerando distintas longitudes de registro. En cambio, para el caso del PWS (Figura 4 derecha) la curva de similitud para ambas correlaciones es más dispersa.

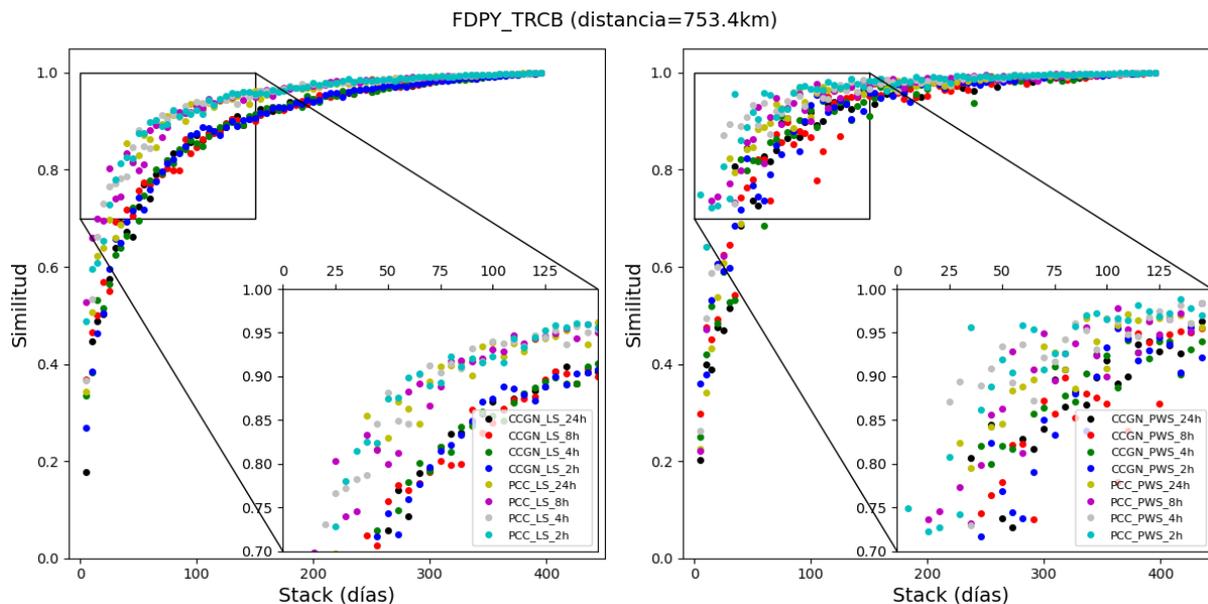


Figura 4. Gráficos de similitud correspondientes a la trayectoria entre las estaciones FDPY y TRCB, determinados considerando LS (izquierda) y PWS (derecha). En ambos gráficos se muestra la convergencia habiendo utilizado CCGN y PCC, para registros de 2, 4, 8 y 24 horas de longitud.

Analizando la trayectoria definida por las estaciones TRCB y PLTB (distancia = 998 km) (Figuras 1 y 5) se llega a resultados similares a los del caso anterior, siendo la convergencia más rápida cuando se utiliza PCC, sobre todo al compararla con CCGN habiendo aplicado el LS.

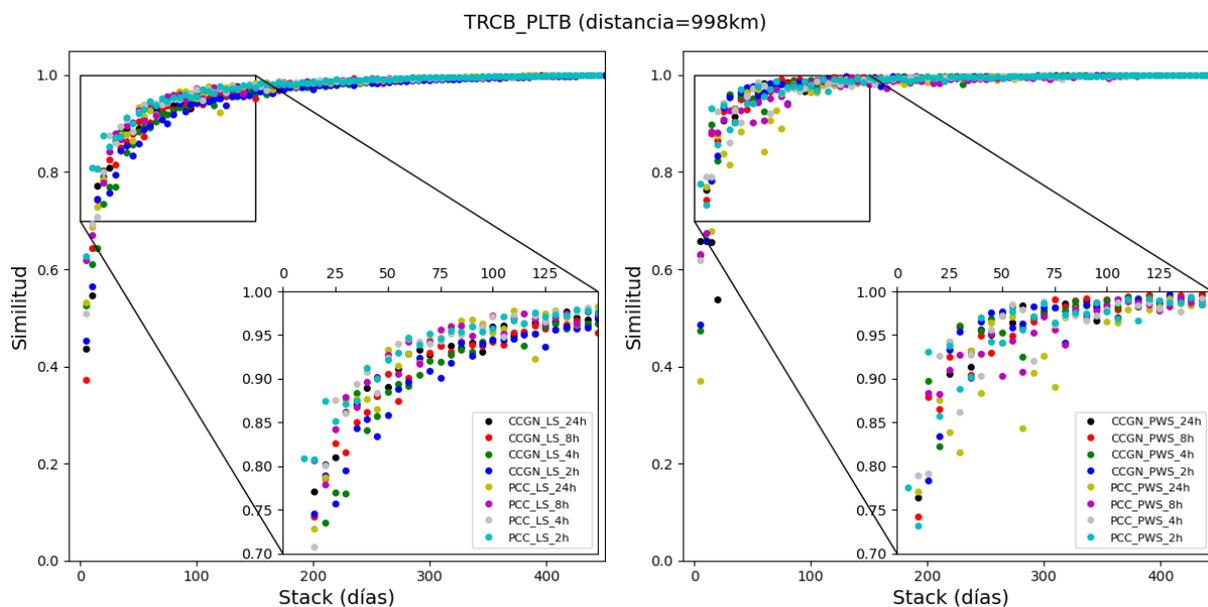


Figura 5. Gráficos de similitud correspondientes a la trayectoria entre las estaciones TRCB y PLTB, determinados considerando LS (izquierda) y PWS (derecha). En ambos gráficos se muestra la convergencia habiendo utilizado CCGN y PCC, para registros de 2, 4, 8 y 24 horas de longitud.

En el caso de la trayectoria definida por las estaciones RPRD y PSAL (distancia = 1237.2 km) (Figuras 1 y 6) la convergencia resulta más rápida cuando se utiliza el PWS, tanto en la determinación de las correlaciones cruzadas mediante CCGN como PCC.

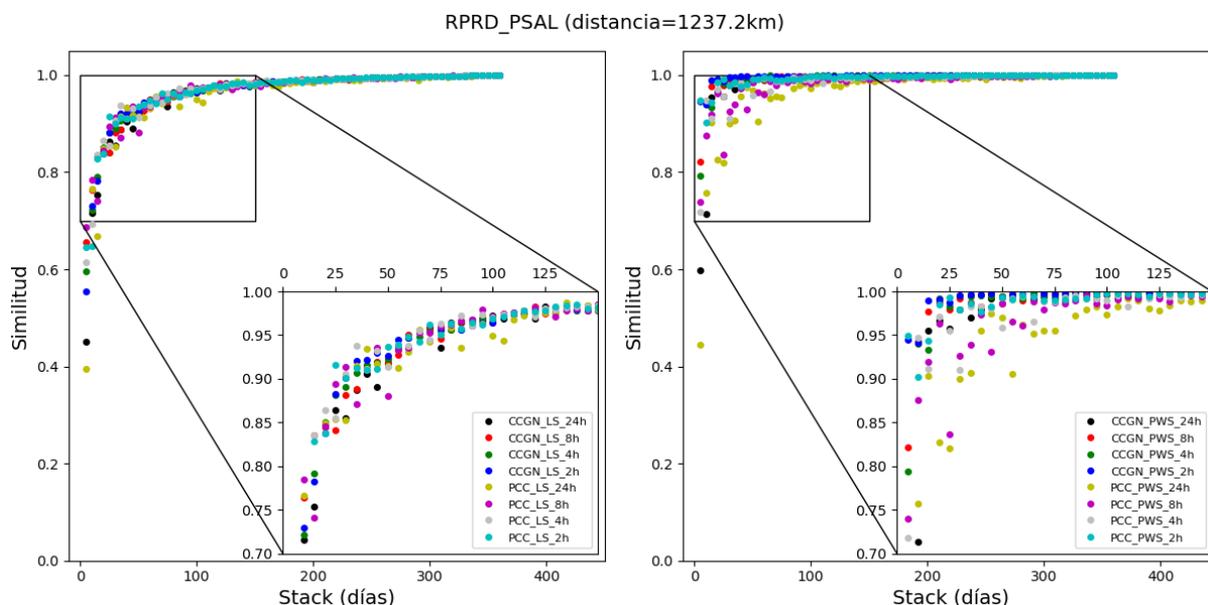


Figura 6. Gráficos de similitud correspondientes a la trayectoria entre las estaciones RPRD y PSAL, determinados considerando LS (izquierda) y PWS (derecha). En ambos gráficos se muestra la convergencia habiendo utilizado CCGN y PCC, para registros de 2, 4, 8 y 24 horas de longitud.

Considerando las trayectorias más largas, definidas por las estaciones BBPS y PLTB (distancia = 1468.3 km) (Figuras 1 y 7) y por las estaciones VBST y PLTB (distancia = 2015.6 km) (Figuras 1 y 8), se observa una mayor dispersión de la similitud en las determinaciones con PWS cuando se analizan stacks de menos de 200 días.

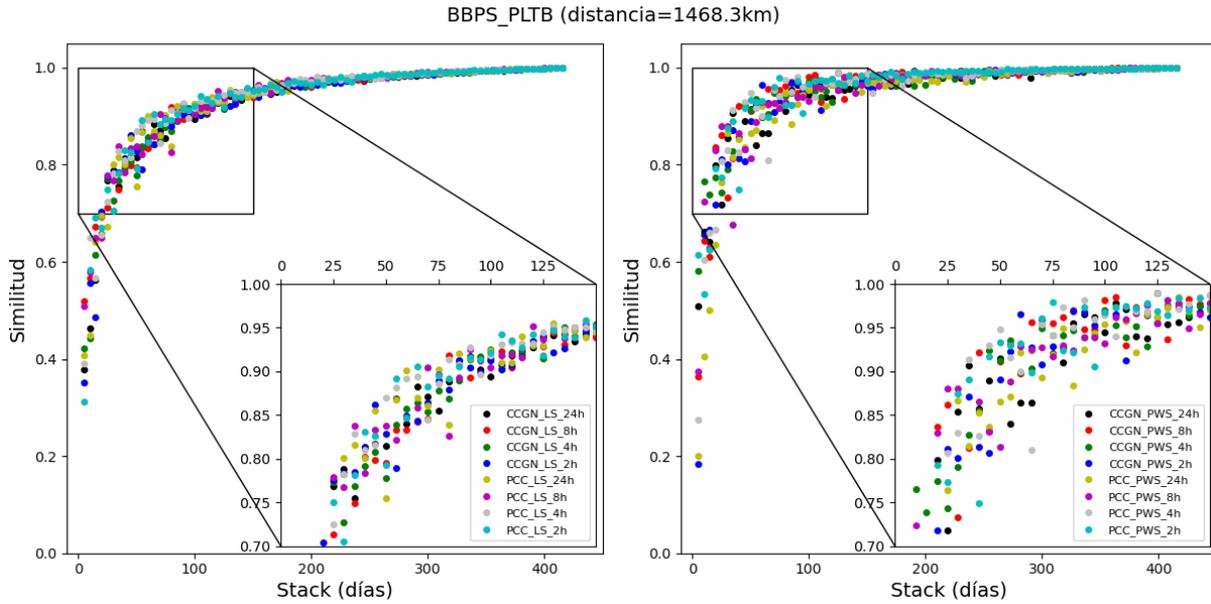


Figura 7. Gráficos de similitud correspondientes a la trayectoria entre las estaciones BBPS y PLTB, determinados considerando LS (izquierda) y PWS (derecha). En ambos gráficos se muestra la convergencia habiendo utilizado CCGN y PCC, para registros de 2, 4, 8 y 24 horas de longitud.

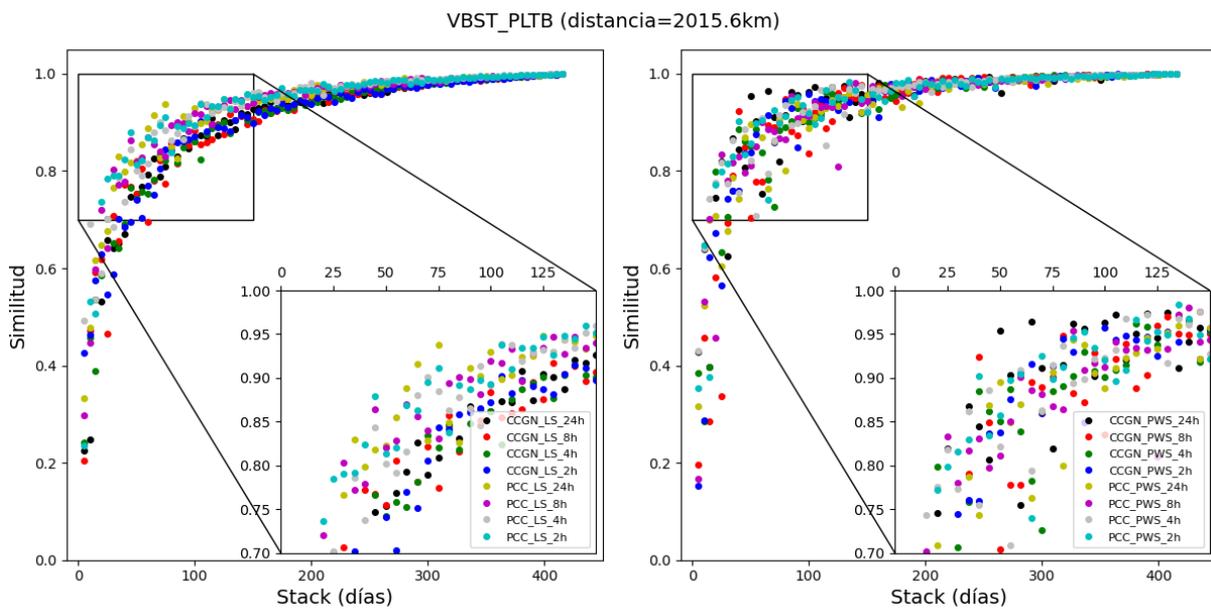


Figura 8. Gráficos de similitud correspondientes a la trayectoria entre las estaciones VBST y PLTB, determinados considerando LS (izquierda) y PWS (derecha). En ambos gráficos se muestra la convergencia habiendo utilizado CCGN y PCC, para registros de 2, 4, 8 y 24 horas de longitud.

En los gráficos de las correlaciones cruzadas en función de la distancia entre estaciones (Figura 9) se observan los arribos de las ondas Rayleigh como una señal alineada que presenta mayor contenido de frecuencias cuando se usa PCC. Los gráficos del PWS se ven más nítidos que los del LS.

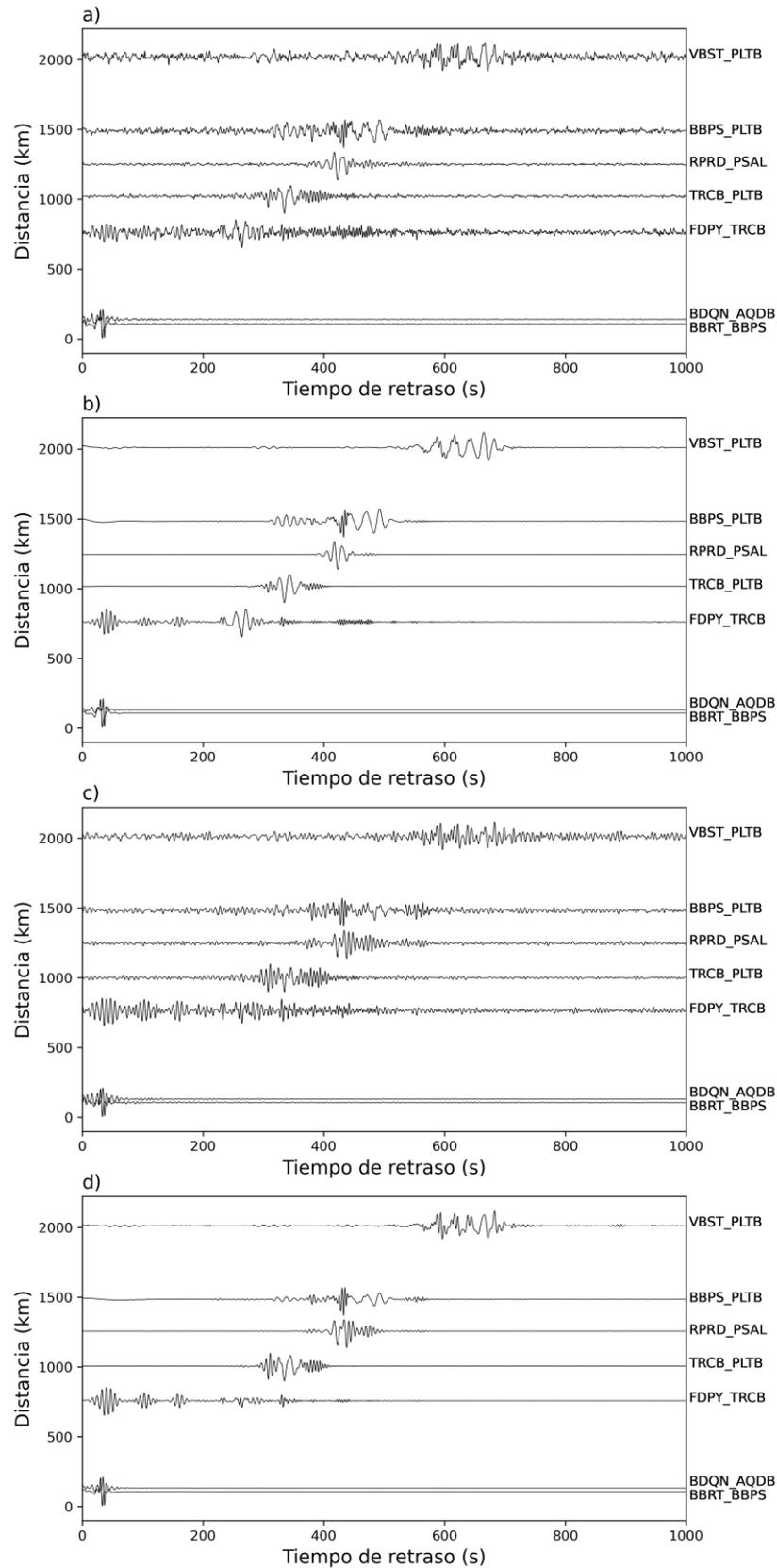


Figura 9. Stacks de las correlaciones cruzadas de las trayectorias que se muestran en la Figura 1 en función de la distancia entre estaciones para: a) CCGN y LS. b) CCGN y PWS. c) PCC y LS. d) PCC y PWS.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo comparamos los resultados obtenidos aplicando distintas metodologías de cálculo de correlación cruzada y stack para 7 trayectorias, utilizando registros de ruido sísmico de 10 estaciones sismológicas con el objetivo de definir la técnica más adecuada a aplicar en los datos de ruido sísmico de una región que abarca gran parte de las cuencas Paraná, Chaco-Paraná y Pantanal, en Sudamérica.

En primer lugar, se definieron los parámetros del preprocesamiento, como las frecuencias de corte del filtro pasabanda y la longitud de los registros. Considerando la variación de longitud de trayectorias entre estaciones, la mejor opción para distinguir las ondas superficiales, es filtrar en el rango de frecuencias entre 0.02 y 0.5 Hz. Dado que redefinir la longitud de los registros es un paso que se realiza con el fin de aumentar la cantidad de datos en caso que resulte necesario, que el tiempo de procesamiento y la capacidad computacional aumentan con la disminución de la longitud del registro y que en los gráficos de similitud no se distinguen grandes diferencias al cortarlos, decidimos trabajar con trazas de 24 horas de longitud, ya que contamos con más de un año de datos para las trayectorias definidas entre las 45 estaciones disponibles (Figura 1), teniendo que en cuenta que, en general, la convergencia se alcanzó con 300 días de datos para obtener la estabilidad adecuada en los resultados.

Comparando todos los gráficos de similitud observamos que la convergencia suele ser más rápida con PCC que con CCGN. En particular para las trayectorias determinadas por TRCB y PLTB (Figura 5), BBPS y PLTB (Figura 7), y VBST y PLTB (Figura 8), se observa una convergencia más rápida con PCC, sobre todo al comparla con CCGN habiendo aplicado el LS.

En cuanto a las dos técnicas de stack, se obtuvo en todos los casos una convergencia más rápida para el PWS, lo que se observa especialmente para la trayectoria determinada por RPRD y PSAL (Figura 6).

Para el caso de las trayectorias más cortas, BBRT_BBPS (Figura 2) y BDQN_AQDB (Figura 3), se confirma que los gráficos de similitud presentan las mismas características y no se ven afectados por la disposición de las estaciones respecto a la ubicación de las fuentes de ruido, como es de esperarse, ya que a esas distancias las señales detectadas son parecidas.

En el análisis de la forma de onda (Figura 9), la onda Rayleigh presenta un mayor contenido de frecuencias cuando se utiliza PCC. Asimismo, se advierten señales más complejas en las trayectorias FDPY_TRCB, BBPS_PLTB y VBST_PLTB (Figura 9 b y d) que atraviesan el lineamiento Transbrasiliano. Sin embargo, la cantidad de trayectorias analizadas no es suficiente para asegurar que dicha estructura sea fuente de estas señales.

A partir de este análisis podemos concluir que la aplicación de la Correlación Cruzada de Fase (PCC) da mejores resultados para los datos analizados. Como se menciona en las diversas referencias citadas, en particular en Schimmel (2015), la elección de la metodología depende de los datos. Al utilizar PCC se altera lo menos posible la forma de onda, además de omitir un paso en el preprocesamiento.

Si bien algunos resultados pueden estar relacionados con la variación acimutal de las fuentes de ruido sísmico, el grupo de trayectorias seleccionado para este análisis no permite discernir esa relación, atribuyendo las diferencias encontradas fundamentalmente a la variación de longitud de las trayectorias.

En lo referente al cálculo del stack, se puede concluir que con un año de datos es suficiente para obtener la estabilidad adecuada. Si bien existen pequeñas diferencias en la convergencia de los datos en función de los días sumados, siendo favorable el PWS, estas diferencias no son concluyentes para definir la metodología a aplicar por lo que se decide continuar trabajando con ambas (LS y PWS), analizando posteriormente posibles diferencias que pudieran surgir en los mapas tomográficos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los valiosos comentarios y sugerencias realizados por los evaluadores. También agradecen al Centro de Sismología de la Universidade de São Paulo por la provisión de los datos de las estaciones sismológicas. Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de La Plata y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Bensen, G., Ritzwoller, M., Barmin, M., Levshin, A., Lin, F., Moschetti, M., Shapiro, N., & Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3):1239–1260
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth Science Reviews*, 79:205–227
- Campillo, M. & Paul, A. (2003). Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 299, 547–549, doi:10.1126/science.1078551
- Christensen, N. & Mooney, W. (1995). Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100:9761–9788
- Cordani, U. G., Teixeira, W., Tassinari, C. C., Coutinho, J. M., & Ruiz, A. S. (2010). The Rio Apa Craton in Mato Grosso do Sul (Brazil) and northern Paraguay: geochronological evolution, correlations and tectonic implications for Rodinia and Gondwana. *American Journal of Science*, 310(9), 981-1023
- Dalla Salda, L., Bossi, J., & Cingolani, C. (1988). The Rio de la Plata cratonic region of southwestern Gondwanaland. *Episodes Journal of International Geoscience*, 11(4), 263-269
- da Silva, C. C., Poveda, E., da Silva Dantas, R. R., & Julià, J. (2021). Ambient Noise Tomography with Short-Period Stations: Case Study in the Borborema Province. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 1709-1730

Gouédard, P., Stehly, L., Brenguier, F., Campillo, M., Colin de Verdière, Y., Larose, E., Margerin, L., Roux, P., Sánchez-Sesma, F., Shapiro, N., & Weaver, R. (2008). Cross-correlation of random fields: mathematical approach and applications. *Geophysical Prospecting*, 56(3):375–393

Heilbron, M., Cordani, U. G., & Alkmim, F. F. (2016). Sao Francisco Craton, eastern Brazil: Tectonic genealogy of a miniature continent. *Springer*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-01715-0>

Kroonenberg, S. B., & de Roeber, E. W. (2009). Geological evolution of the Amazonian Craton. *Amazonia: Landscape and Species Evolution: A look into the past*, 7-28. doi:[10.1002/9781444306408.ch2](https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch2)

Li, G., Niu, F., Yang, Y., & Xie, J. (2018). An investigation of time–frequency domain phase-weighted stacking and its application to phase-velocity extraction from ambient noise's empirical Green's functions. *Geophysical Journal International*, 212(2), 1143-1156.

Lunansky, M. (2019). Análisis del ruido sísmico mediante interferometría para el modelado cortical en la cuenca Chaco-Paraná. *Tesis de Grado en Geofísica. Universidad Nacional de La Plata*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/143801>

Núñez, E., Schimmel, M., Stich, D., & Iglesias, A. (2020). Crustal Velocity Anomalies in Costa Rica from Ambient Noise Tomography. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 941-960. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02315-z>

Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., Fanning, C. M., Baldo, E. G., González-Casado, J. M., Galindo, C. & Dahlquist, J. (2007). The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth-Science Reviews*, 83(1-2), 49-82

Rosa, M. L., Collaço, B., Assumpção, M., Sabbione, N., & Sánchez, G. (2016). Thin crust beneath the Chaco-Paraná Basin by surface-wave tomography. *Journal of South American Earth Sciences*, 66, 1-14

Sabra, K.G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W.A. & Fehler, M. (2005). Surface wave tomography from microseisms in Southern California. *Geophysical Research Letters*, 32, L14311, [doi:10.1029/2005GL023155](https://doi.org/10.1029/2005GL023155)

Schimmel, M. (1999). Phase Cross-Correlations: Design, Comparisons, and Applications. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89:1366–1378

Schimmel, M. (2015). El “Phase Weighted Stack” y el “Phase Cross-Correlation” para la extracción de señal en ruido sísmico. *IRIS webinar*. <https://youtu.be/qr5EFhQzPwg>

Schimmel, M. (2020). Corr_stack_v04: A software to cross-correlate and stack seismic ambient noise and event data: the phase coherence approach. DIGITAL.CSIC, <http://dx.doi.org/10.20350/digitalCSIC/13836>

Schimmel, M., & Gallart, J. (2005). The inverse S Transform in filters with time-frequency localization. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53 (11), 4417 - 4422, [doi:10.1109/TSP.2005.857065](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.857065)

Schimmel, M., & Paulssen, H. (1997). Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase weighted stacks. *Geophysical Journal International*, 130, 497-505, [doi:10.1111/j.1365-246X.1997.tb05664.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05664.x)

Schimmel, M., Stutzmann, E., & Gallart, J. (2011). Using instantaneous phase coherence for signal extraction from ambient noise data at a local to a global scale. *Geophysical Journal International*, 184:494-506, [doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04861.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04861.x)

Schimmel, M., Stutzmann, E., & Ventosa, S. (2018). Low- frequency ambient noise autocorrelations: Waveforms and normal modes. *Seismological Research Letters*, 89(4), 1488-1496, [doi: 10.1785/0220180027](https://doi.org/10.1785/0220180027)

Schimmel, M., Stutzmann, E., Lognonné, P., Compaire, N., Davis, P., Drilleau, M., & Banerdt, B. (2021). Seismic noise autocorrelations on Mars. *Earth and Space Science*, 8(6), e2021EA001755, [doi: 10.1029/2021EA001755](https://doi.org/10.1029/2021EA001755)

Shapiro, N. M. & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient noise. *Geophysical Research Letters*, 31, L07614, [doi:10.1029/2004GL019491](https://doi.org/10.1029/2004GL019491)

Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L. & Ritzwoller, M. H. (2005). High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307, 1615–1618.

Stockwell, R. G., Mansinha, L., & Lowe, R. P. (1996). Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, no. 4, pp. 998-1001, [doi: 10.1109/78.492555](https://doi.org/10.1109/78.492555)

Wapenaar, K. (2004). Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross-correlation. *Physical Review Letters*, 93

Weaver, R. (2005). Information from seismic noise. *Science*, 307:1568–156