

# Estudio teórico sobre la relación entre El Niño y la Oscilación Madden-Julian



**Sulian Thual, Ph. D**

PROFESOR DE CIENCIAS ATMOSFÉRICAS EN  
LA UNIVERSIDAD FUDAN EN SHANGHAI

*Es profesor de Ciencias Atmosféricas en la Universidad Fudan en Shanghai, China. Obtuvo su doctorado en Francia y trabajó en varias instituciones, incluida la Universidad de Nueva York y el IGP. Sus temas de interés son la investigación de la atmósfera contemporánea y las ciencias oceánicas, así como las matemáticas aplicadas y, principalmente, la mecánica de fluidos y la geofísica. Busca comprender los sistemas climáticos complejos a través de modelos cualitativos que conectan la intuición física, la teoría matemática rigurosa y en conformidad con las observaciones. Su trabajo se centra especialmente en los trópicos con importantes fenómenos climáticos a gran escala, como la Oscilación Madden-Julian (MJO) y El Niño - Oscilación Sur (ENOS), que en la actualidad son temas de investigación de la comunidad científica climatológica.*



**Dr. Kobi Mosquera**  
INVESTIGADOR CIENTÍFICO  
DEL INSTITUTO GEOFÍSICO  
DEL PERÚ

## RESUMEN

Este año se publicó un artículo de Thual et al. (2018), quienes proponen para el Pacífico Tropical un modelo teórico del océano y atmósfera que capture, cualitativamente, los procesos intraestacionales e interanuales importantes, tales como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés). La MJO es una oscilación atmosférica de 30 y 60 días que se desarrolla en la franja ecuatorial y se propaga hacia el este con una velocidad de  $5 \text{ ms}^{-1}$ , a través del océano Índico y la región occidental del océano Pacífico. La MJO incrementa los procesos convectivos así como los vientos intensos de corto tiempo, los que pueden iniciar o intensificar los eventos El Niño por medio de su interacción con el océano, aunque esta relación es a menudo pobremente representada en los modelos operacionales. El modelo teórico que se explica

en este documento asume una descomposición en escalas de tiempo del flujo atmosférico para una mejor comprensión de la interacción entre El Niño y la MJO, con un potencial para mejorar las predicciones de estas. A continuación se explicará brevemente las características del modelo y se discutirá sobre las principales relaciones entre El Niño y la MJO.

## RELACIÓN ENTRE EL NIÑO Y LA MJO

Se sabe que el fenómeno El Niño modifica los patrones atmosféricos y oceánicos alrededor del mundo, lo cual incluye el incremento de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en la costa peruana con potenciales lluvias intensas en la costa norte del Perú, en donde sus impactos son tan intensos que afectan a la economía y sociedad. Pronosticar con precisión la intensidad e impacto de El Niño es aún un tema relevante para los investigadores.

Un importante factor que limita la predictibilidad de El Niño es la variabilidad atmosférica cercana a la franja ecuatorial en el océano Índico y del Pacífico occidental. Tal variabilidad es, en gran parte, intermitente y desorganizada, la cual consiste en una gran variedad de procesos (eventos convectivos, “cloud clusters”, ondas ecuatoriales entre otros) con escalas de tiempo que van de algunas horas a semanas. La componente dominante de esta variabilidad es la Oscilación Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés) denominada así por sus descubridores (Madden and Julian, 1971). La MJO es una oscilación con periodos entre 30 y 60 días y que muestra mayor actividad durante el invierno boreal. Cada evento MJO típicamente se inicia como una onda estacionaria en el océano Índico y se propaga hacia el este, a lo largo de la franja ecuatorial, con una velocidad aproximada de  $5 \text{ ms}^{-1}$ , en su camino puede incrementar la convección así como la convergencia de los vientos.

La MJO es muy activa sobre la región occidental del Pacífico, así como en el océano Índico, debido a que las aguas cálidas (por encima de  $28^\circ\text{C}$ ) en dichas regiones favorecen la convección, mientras que en el Pacífico Oriental y cerca de Perú es menos activa. Sin embargo, la MJO puede afectar significativamente los patrones atmosféricos sobre Perú así como al fenómeno El Niño debido a su interacción con el océano (por ejemplo ver Figura 1). Durante el año 2015, varios eventos MJO ocurrieron en forma sucesiva (alrededor de marzo, abril y junio) como se puede apreciar en la variable OLR (*Outgoing Longwave Radiation*), que es una forma de medir la convección. Estos eventos MJO generaron vientos intensos y de corto tiempo llamados “wind burts” (WBs, Harrison and Vecchi, 1997), los que modificaron las condiciones oceánicas por medio de la fricción en la superficie. En la Figura 1, cada evento MJO y su asociado WBs incrementaron el contenido de calor en el Pacífico Occidental, el cual se extendió hasta el Pacífico Oriental. El calentamiento producido

por varios eventos MJO en el Pacífico Oriental, como se muestra en la TSM, fueron los que llevaron al desarrollo del mayor evento El Niño del siglo XXI, el cual tuvo su máximo valor de anomalía de la TSM en el mes de diciembre de 2015.

## FORMULACIÓN DE UN MODELO TEÓRICO

A pesar de su importancia, en la actualidad, la MJO junto con El Niño son fenómenos difíciles de simular en los modelos operacionales (Lin et al., 2006; Gushchina y Dewitte, 2011). Una razón para esto es que la MJO implica una circulación planetaria de vientos y temperatura junto con un conjunto de procesos convectivos y húmedos que son altamente aleatorios y un tamaño que está por debajo de la resolución espacial de los modelos de pronóstico. Adicionalmente, la relación entre la MJO y El Niño es compleja porque esto involucra diferentes escalas de tiempo: mientras la MJO ocurre cada 30 o 60 días (lo que corresponde a una escala de tiempo intraestacional), El Niño- Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), el cual oscila entre sus fases El Niño y La Niña, típicamente se desarrolla entre 2 a 7 años (correspondiente a escalas interanuales).

A continuación se resumen una aproximación teórica (Thual et al., 2018) que permitirá una mejor comprensión y modelado de la interacción entre MJO (variación intraestacional) y El Niño (variación interanual). Primero se considera un flujo atmosférico, el cual podría ser la anomalía de viento zonal  $u(x, y, \tau, t)$  en la superficie y para la que se asume que existen dos tipos de fluctuaciones: 1) con escalas de tiempo intraestacional  $t$  (asociado, por ejemplo, a la MJO) y 2) con escala de tiempo interanual  $\tau \gg t$  (asociado, por ejemplo, a El Niño). Entonces es posible descomponer el flujo atmosférico como:

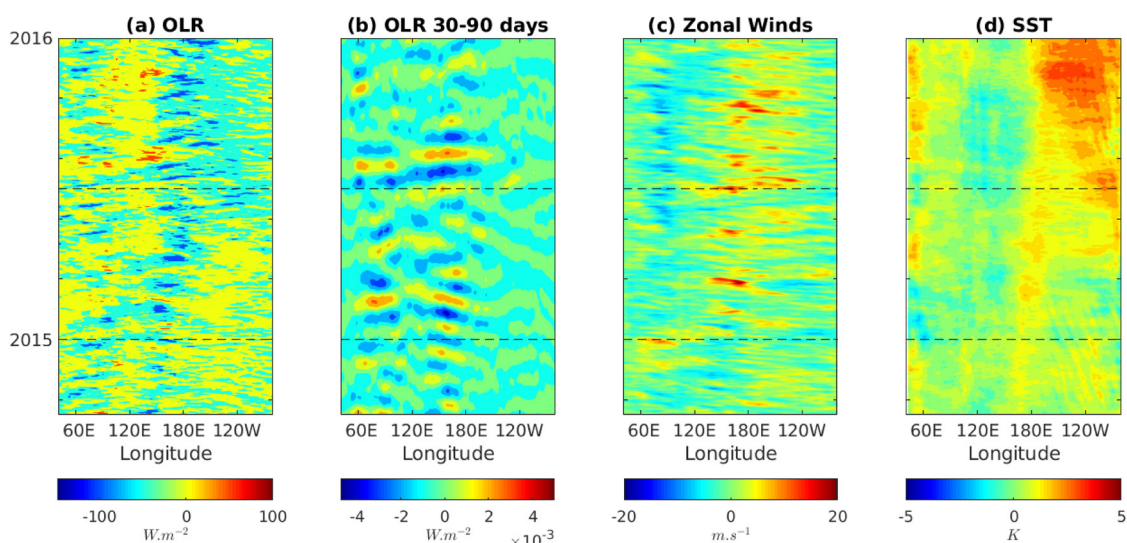


Figura 1. Diagramas Hovmöller (longitud vs tiempo) durante el año 2015 de (a) OLR ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), (b) OLR filtrado en la banda intraseasonal 30 hasta 90 días, (c) vientos zonales ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y (d) Temperatura Superficial del Mar (K).

$$u(x, y, \tau, t) = \bar{u}(x, y, \tau) + u'(x, y, \tau, t) \quad (1)$$

Donde  $\bar{u}$  es la componente interanual (que solo depende de  $\tau$ ) y  $u'$  que es la componente intraestacional y que tiene promedio temporal igual a cero ( $\bar{u}' = 0$ ). Tal descomposición es común, por ejemplo, en la teoría de turbulencia, la cual también presenta interacciones entre varias escalas. Un ejemplo se puede ver en la Figura 2 para el evento El Niño 1997/98, donde se ha obtenido  $\bar{u}$  de un promedio móvil de 90 días quedando  $u'$  como el residuo. Aquí claramente  $\bar{u}$  consiste en un incremento gradual en los vientos zonales en respuesta a la TSM propias de El Niño, mientras que  $u'$  consiste de un desorganizado WBs que es originado, en parte, de la variabilidad de las MJO. La descomposición, por lo tanto, es adecuada para describir las interacciones entre El Niño y la MJO.

Existen varios métodos para modelar este tipo de flujo atmosférico indicado en la ecuación 1. Primero, los modelos operacionales, que se describen arriba, resuelven directamente las anomalías totales de los vientos zonales ( $u$ ), los cuales tienen la ventaja de ser exactos pero con el inconveniente de que las interacciones entre El Niño y la MJO (es decir,  $\bar{u}$  y  $u'$ ) son implícitas (y a menudo inexactas). Un método mucho más simple, comúnmente usado, es el de resolver solamente la dinámica de El Niño ( $\bar{u}$ ) mientras que la dinámica de MJO y WBs ( $u'$ ) son tratados como eventos aleatorios y generados por procesos estocásticos (e.g. Moore and Kleeman, 1999; Thual et al., 2016). Aquí se tiene que asumir un compromiso, tanto para  $\bar{u}$  y  $u'$ , que permita derivar una dinámica simplificada, éste se obtiene expandiendo el flujo en series de potencias de un pequeño parámetro  $\varepsilon \ll 1$  correspondiente a  $\tau = \varepsilon t$  y eliminando términos pequeños en las ecuaciones asociadas (ver e.g. Majda and Klein, 2003 o Thual et al., 2018). La importante ventaja de este método es que tiene una formulación explícita para  $\bar{u}$  y  $u'$ , así como para la interacción entre ellos.

En la siguiente sección se usará la aproximación señalada arriba en un modelo teórico para la zona tropical, como es detallado en Thual et al. (2018), con el objetivo de representar las mayores características de la relación entre El Niño y la MJO. El modelo teórico describe un flujo ecuatorial (el cual depende solo de la longitud y tiempo) solamente con procesos esenciales que lo hace fácil de comprender y ejecutar en una simple computadora personal. Esto consiste en un "esqueleto" atmosférico que describe la evolución de los vientos, temperatura, humedad y convección estocástica en la tropósfera (Majda and Stechmann, 2009; Thual et al., 2014), el cual está acoplado a un modelo simplificado de la dinámica del océano (*shallow water model*) así como a un modelo de balance de TSM (Thual et al., 2016). Hay que señalar que la descomposición de la ecuación 1 solo se aplica a la atmósfera porque la dinámica oceánica es considerada principalmente interanual.

## MODELANDO LA RELACIÓN ENTRE EL NIÑO Y LA MJO

La Figura 3 muestra los detalles de un evento El Niño fuerte simulado con el modelo. Los resultados son representativos de las condiciones que se dieron durante El Niño 1997/1998 o 2015/2016. El evento se inicia con el incremento de la TSM y de la profundidad de la termoclina en el Pacífico Occidental que eventualmente se propaga y tiene un pico en el Pacífico Oriental. En la atmósfera hay una razonable concordancia entre los vientos simulados y los observados (ver Figura 2):  $\bar{u}$  gradualmente se incrementa durante el evento mientras que consiste de WBs desordenados y, finalmente, la suma ( $u = u' + \bar{u}$ ) es también consistente con el panel de la izquierda de la Figura 2. En consecuencia, ambos tipos de dinámicas son razonablemente capturadas por el modelo teórico. Asimismo, en la Figura 3 se muestra la convección estocástica así como un índice que mide

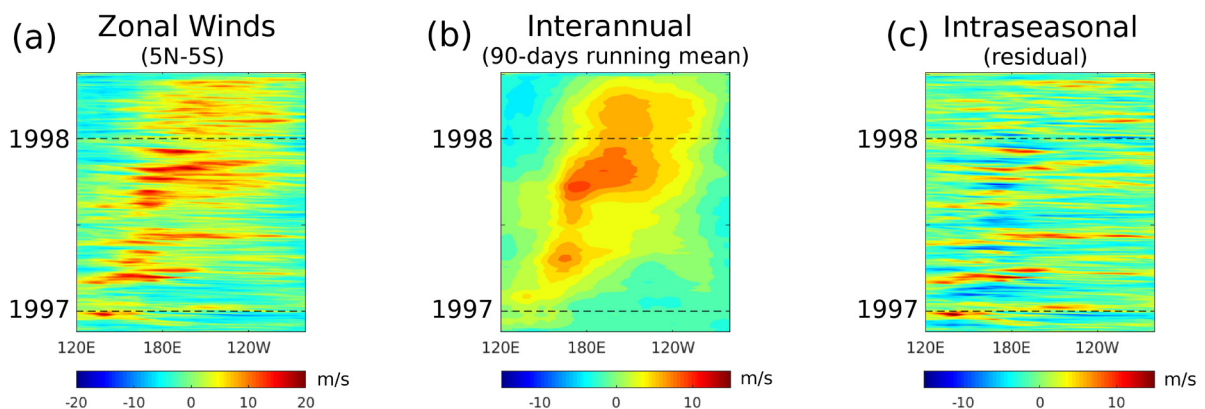
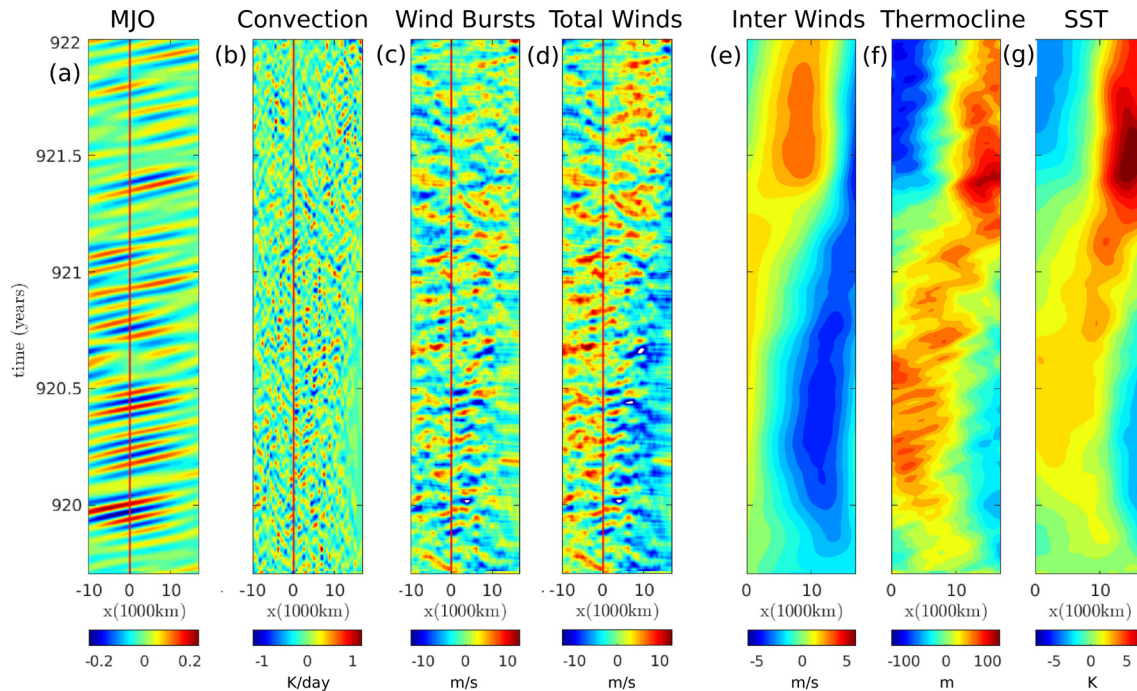


Figura 2. Viento zonal ( $\text{ms}^{-1}$ ) durante el evento El Niño 1997/1998 en la región ecuatorial promediado entre  $5^{\circ}\text{S}$  y  $5^{\circ}\text{N}$ . El panel de la izquierda indica las anomalías totales ( $u$ ), el del centro el viento interanual ( $\bar{u}$ ) obtenido luego de aplicar una media corrida de 90 días a  $u$  y el de la derecha el viento intraestacional ( $u'$ ) calculado de la diferencia entre  $u$  y  $\bar{u}$  (ver ecuación 1).



**Figura 3.** Soluciones numéricas del modelo teórico océano-atmósfera. Diagramas longitud-tiempo a lo largo de la franja ecuatorial de (a) la amplitud de la MJO, (b) la convección ( $K \text{ día}^{-1}$ ), (c) viento zonal intraestacional  $u'$ , (d) anomalías de viento zonal total  $u = u' + \bar{u}$ , (e) viento interanual  $\bar{u}$ , (f) anomalía de la profundidad de la termoclina y (g) anomalía de la TSM. Los diagramas del (a) al (d) se extienden de -10000 a 18000 km, lo cual "incluye" los océanos Índico y Pacífico, mientras que los paneles del (f) al (h) abarcan solamente el océano Pacífico (0 – 18000 km.)

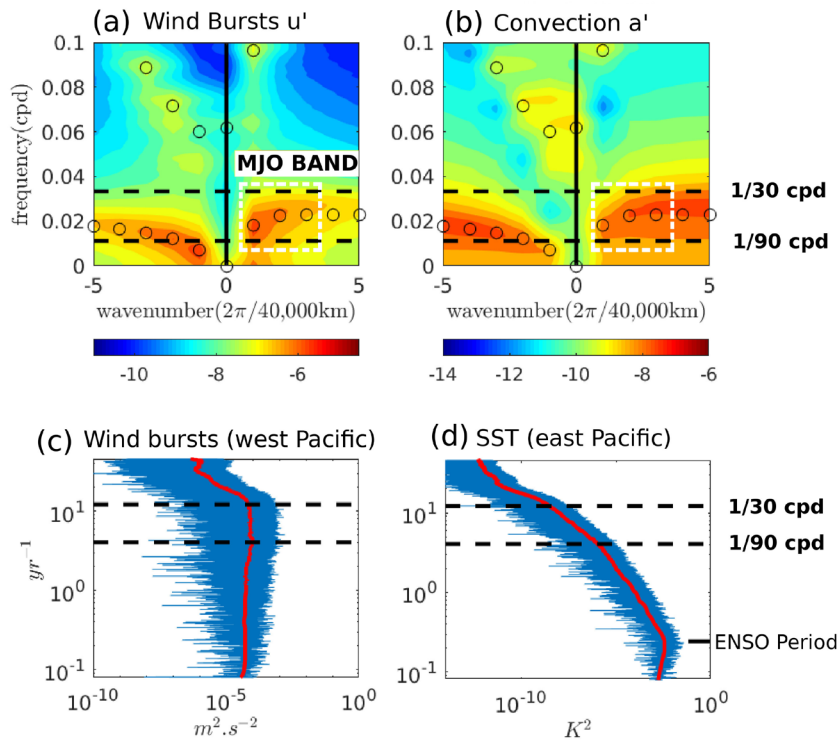
la amplitud de la MJO (see Thual et al., 2018 para detalles). La MJO se genera de manera intermitente con un periodo de 40 días y se propaga hacia el este con una velocidad promedio de  $5 \text{ ms}^{-1}$ . Estas, en general, son más frecuentes en el Pacífico occidental durante el inicio del evento El Niño. Si bien las MJOs pueden contribuir al calentamiento gradual del océano, lo cual es consistente en la Figura 1, ellas también se ven favorecidas por el incremento de la TSM en el modelo.

La Figura 4 documenta el espectro de potencia del modelo teórico, el cual sugiere una relación natural entre la MJO y El Niño. Primero, la Figura 4a y 4b muestra el espectro de potencia de los vientos zonales intraestacionales ( $u'$ ) y la convección como una función del número de onda  $\kappa$  y la frecuencia  $\omega$ . Aquí el número de onda  $\kappa = 1$  corresponde a una escala zonal de 40 000 km, es decir del tamaño de la circunferencia del ecuador, mientras que  $\kappa = 2$  corresponde a la mitad de la escala y así sucesivamente. Estos resultados indican que hay una señal dominante de la MJO en la atmósfera, la cual es consistente con las observaciones (Wheeler y Kiladis, 1999), porque la potencia es máxima en la banda asociada a la MJO, es decir de  $\kappa = 1$  a  $\kappa = 3$  y de  $\omega = \left(\frac{1}{30 \text{ días}}\right)$  a  $\omega = \left(\frac{1}{90 \text{ días}}\right)$ . Las Figuras 4c y 4d muestran el espectro de potencia de los vientos zonales intraestacionales  $u'$  promediados en la región occidental del Pacífico y la TSM promediada en la región oriental del Pacífico, como una función de la frecuencia. Aquí  $u'$  es un buen indicador de los WBs y la variabilidad de la MJO (banda de 30 a 90 días) en el Pacífico Occidental, mientras que la TSM en el Pacífico Oriental es un buen indicador de la variabilidad

de El Niño con un pico alrededor de 4.5 años, lo cual corresponde, dentro del modelo, a la duración promedio del ciclo del ENSO. Sin embargo, es importante notar que todas las frecuencias son generadas tanto en el océano como en la atmósfera en la Figura 4 c y d: en este aspecto los modelos dinámicos son diferentes, en la práctica, de la formulación de la ecuación 1 y Figura 2, los cuales separan arbitrariamente las escalas de tiempo. Por ejemplo, sucesivas MJOs en la atmósfera intraestacional pueden resultar en una componente de baja frecuencia, mientras existen también fluctuaciones rápidas, aunque débiles, en  $\bar{u}$  y TSM. Curiosamente, las inclinaciones en la Figura 4c y d (aproximadamente constante para  $u'$  e incrementándose linealmente con la frecuencia para TSM) sugiere una simple interacción de variabilidad intraestacional por el océano, lo cual también sugiere un rol central de la componente de baja frecuencia de variabilidad intraestacional para activar el ENSO.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra una estrategia para construir un modelo simplificado de la dinámica océano-atmósfera que describa la relación entre el fenómeno El Niño y la MJO en los trópicos. Se sabe que el fenómeno El Niño, a pesar de sus ya conocidos impactos, es difícil de pronosticar y posiblemente se debería a un gran desorganización extendida de la variabilidad atmosférica en el Pacífico Occidental que interactúa con el océano. Herramientas teóricas como las que se propone aquí permiten mejorar la



**Figura 4.** Soluciones del modelo teórico del océano-atmósfera. Espectro de potencia del número de onda zonal ( $2\pi/40000\text{km}$ ) y frecuencia (ciclos por día en escala logarítmica) de la variabilidad intraestacional de: (a) el viento  $u'$  y (b) la convección. Los círculos abiertos de color negro indican las soluciones lineales de la atmósfera intraestacional. En los paneles inferiores se describen los espectros de potencia (ambos ejes en escala logarítmica): (c) del promedio de  $u'$  en la mitad occidental del Pacífico ecuatorial ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) y (d) de la TSM promediada en el mitad del Pacífico Oriental ( $\text{K}^2$ ). La línea roja en estas últimas figuras representa una versión "suavizada". Las líneas cortadas de color negro indican el rango intraestacional (de 30 a 90 días) en todos los paneles, mientras que el período ENSO es aproximadamente 4.5 años, tal como se indica en el panel inferior derecho.

comprensión de dicha variabilidad. Por ejemplo, el modelo teórico ha logrado representar algunas de las principales características observadas. Los resultados muestran que los eventos MJO en el Pacífico Occidental pueden iniciar y amplificar eventos El Niño y, a la vez, favorecerse por el incremento de la TSM producido por este último (ver Figura 1 y 3). También se muestra que la parte atmosférica del modelo puede generar tanto oscilaciones de 30 y 90 días (MJO) como de 2 a 7 años (ENSO) (ver Figura 4). Estos hallazgos teóricos pueden ser útiles para diagnosticar, analizar y ayudar a eliminar fuertes tendencias que tienen los actuales modelos operacionales en la región tropical y, de esta manera, mejorar a largo plazo la predicción de las MJO y el fenómeno El Niño que son muy necesarios para la comunidad.

## REFERENCIAS

Gushchina, D. and Dewitte, B. (2011). The relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO and its modulation at seasonal to decadal timescales. *Cent.Eur.J.Geosci.*, 1:175-196.

Harrison, D. and Vecchi, G. (1997). Westerly wind events in the tropical Pacific. *J. Climate*, 10:3131-3156.

Lin, J.-L., and coauthors (2006). Tropical Intraseasonal Variability in 14 IPCC AR4 Climate Models. Part I: Convective Signals. *J. Climate*, 19:2665-2690.

Madden, R. E. and Julian, P. R. (1971). Detection of a

40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28:702-708.

Majda, A. and Klein, R. (2003). Systematic Multiscale Models for the Tropics. *J.Atm.Sci.*, 60:393-408.

Majda, A. J. and Stechmann, S. N. (2009). The skeleton of tropical intraseasonal oscillations. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 106:8417-8422.

Moore, A. M. and Kleeman, R. (1999). Stochastic Forcing of ENSO by the Intraseasonal Oscillation. *J. Climate*, 12:1199-1220.

Thual, S., Majda, A., and Chen, N. (2018). A Tropical Stochastic Skeleton Model for the MJO, El Niño, and Dynamic Walker Circulation: A Simplified GCM. *J. Climate*, 31:9261-9282.

Thual, S., Majda, A., Chen, N., and Stechmann, S. (2016). Simple Stochastic Model for El Niño with Westerly Wind Bursts. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113(37):10245-10250.

Thual, S., Majda, A. J., and Stechmann, S. N. (2014). A stochastic skeleton model for the MJO. *J. Atmos. Sci.*, 71:697-715.

Wheeler, M. and Kiladis, G. N. (1999). Convectively Coupled Equatorial Waves: Analysis of Clouds and Temperature in the Wavenumber-Frequency Domain. *J. Atmos. Sci.*, 56:374-399.