

¿Por qué la PDO está correlacionada con la precipitación nival en los Andes Áridos?

Arnobio German Poblete¹, Alejandra Valeria Albarracín¹

¹Universidad Nacional de San Juan.

Autor para correspondencia: Arnobio German Poblete, agpoblete@gmail.com

(Recibido: 18-11-2022. Publicado: 30-12-2022.)

Resumen

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) se define como el primer componente principal de la EOF (Función Empírica Ortogonal) de las SST (Temperatura Superficial del Mar -Surface Sea Level Temperature-) en el Pacífico Norte. Diversos estudios muestran que la misma está significativamente asociada a las nevadas en los Andes Áridos. El presente trabajo propone describir el proceso que conlleva a dicha teleconexión, es decir, la asociación espacio-temporal de la PDO con los factores que inciden en las precipitaciones en los mismos. Se concluyó que la PDO: Incrementa las SST en el área ENSO, tiene una relación inversa con MLSP y los westerlies, debilitando el ASPSO y al geopotencial de los 500mb. Tiene una relación directa con la humedad específica en un área ubicada próxima a las costas de Perú; que posibilita la existencia de los ríos atmosféricos que transportan agua precipitable hacia los Andes Áridos. Con Omega muestra una correlación inversa en un área que se encuentra al noreste del área en estudio, por lo que la convección estaría confinada en el océano circundante a Chile central. Lo descrito sobre la influencia de la PDO en los principales factores que inciden en la precipitación nival, explica que la asociación directa entre una PDO positiva es favorable para que ocurran precipitaciones nivales significativas y viceversa.

Palabras clave: PDO, Nevadas, Andes Áridos.

Abstract

The Pacific Decadal Oscillation (PDO) is defined as the first principal component of the EOF (Empirical Orthogonal Function) of the SST (Surface Sea Level Temperature-) in the North Pacific. Several studies show that it is significantly associated with snowfall in the Arid Andes. The present work proposes to describe the process that leads to said teleconnection, that is, the spatio-temporal association of the PDO with the factors that affect rainfall in them. It was concluded that the PDO: Increases SST in the ENSO area, has an inverse relationship with MLSP and westerlies, weakening ASPSO and 500mb geopotential. It has a direct relationship with the specific humidity in an area located near the coast of Peru; that makes possible the existence of atmospheric rivers that transport precipitable water to the Arid Andes. With Omega it shows an inverse correlation in an area located to the northeast of the study area, so the convection would be confined to the ocean surrounding central Chile. What has been described about the influence of the PDO on the main factors that affect snowfall, explains that the direct association between

a positive PDO is favorable for significant snowfall to occur and vice versa.

Keywords: *PDO, Snowfall, Arid Andes.*

1. Introducción

Diversos estudios realizados por varios autores (Poblete, Aguiar. 2015, Vuille, & Ammann,1997; Masiokas et. al., 2006) muestran que uno de los factores que está significativamente asociado a las nevadas en los Andes Áridos (Fig.1) es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO: Pacific Decadal Oscillation) Norte, constituyendo una verdadera teleconexión, sin embargo no se ha explicado la concatenación dinámica que la produce. El presente trabajo se propone describir el proceso que conlleva a dicha teleconexión, es decir, la asociación espacio-temporal de factores ubicados en el Pacífico Norte con los del Pacífico Sur y, por ende, los Andes Áridos.



Figura 1: Ubicación del área de estudio. Mapa base: Bing Arial. Fuente: elaboración propia.

Para entender en profundidad la naturaleza de la PDO, se realiza una somera descripción de la misma: La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) se define como el primer componente principal de la Función Empírica Ortogonal (EOF) de las anomalías de temperatura de la superficie del mar (SST) en la cuenca del Pacífico Norte (desde los 20°N hasta el polo Norte). Las anomalías de SST se obtienen eliminando tanto el ciclo anual climatológico como la anomalía media global de los datos en cada punto de la cuadrícula.

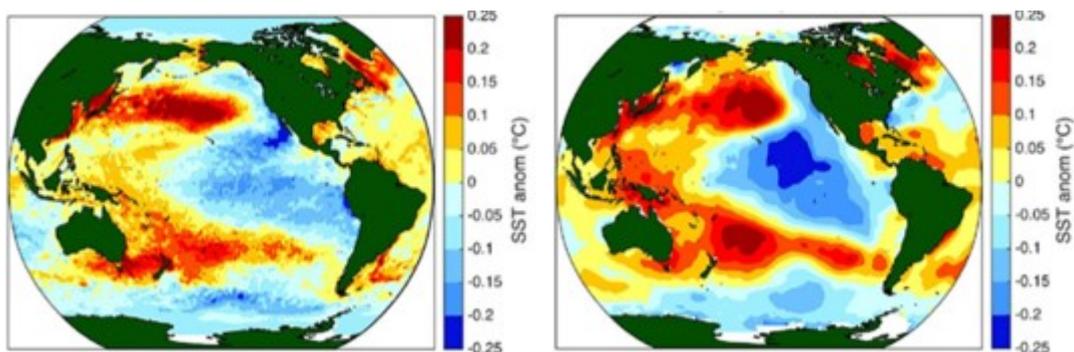


Figura 2: Composición de anomalías de SST durante la fase negativa de la PDO para los modelos HadISST2.1 (izquierda) en los años 1870-2007 y ERSSTv3b (derecha) para 1870-2013. Fuente: NCAR-EEUU.

Los valores negativos del índice de la PDO corresponden a las anomalías de las SST positivas en el centro del Pacífico norte occidental y débiles anomalías negativas a lo largo de la costa oeste de América del Norte (Fig. 2).

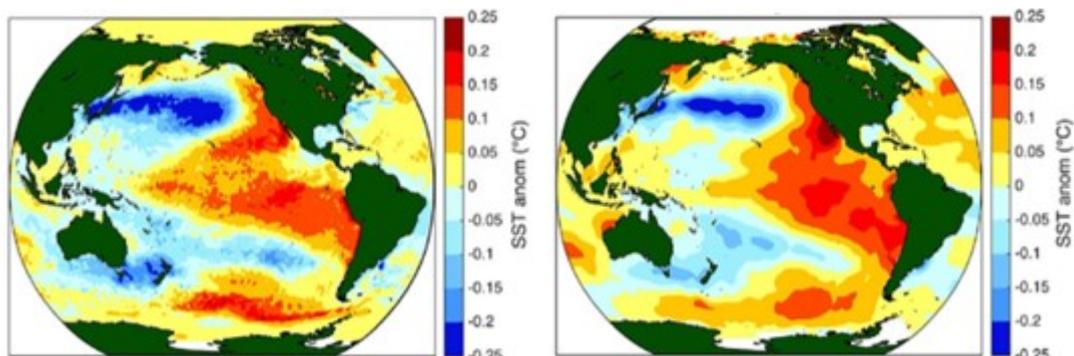


Figura 3: Composición de anomalías de SST durante la fase positiva de PDO de acuerdo a los modelos HadISST2.1 (izquierda) en los años 1870-2007 y ERSSTv3b (derecha) para 1870-2013. Fuente: NCAR-EEUU.

La fase positiva de la PDO está asociada con anomalías negativas de las SST en el Pacífico tropical central y oriental, y positivas en dicha costa. En general, el patrón espacial de la PDO se asemeja al del ENSO (El Niño Southern Oscillation) (Mantua, N.J. 1999) (Fig. 3). La mayor distinción entre el ENSO y la PDO son sus escalas de tiempo: el primero tiene una variabilidad principalmente interanual, mientras que la segunda es decenal.

- Omega:** En climatología se llama Omega al término empleado para describir los movimientos verticales en la atmósfera. La ecuación omega, empleada en los modelos meteorológicos numéricos comprende dos términos, el de "advección diferencial de vorticidad" y el de "advección de grosor". En términos más sencillos, omega viene determinado por la cantidad de giro (o rotación a gran escala) y por la advección cálida (o fría) presentes en la atmósfera. En un mapa meteorológico, los valores altos de omega (un fuerte campo de omega) se relacionan con movimientos verticales ascendentes en la atmósfera (convección). Si son lo suficientemente intensos y se generan en una masa de aire húmeda, se produce precipitación (Bacon, D.P et. al., 2000).

- **Río Atmosférico:** El agua precipitable que se encuentra acumulada en la periferia de la ITCZ (Zona De Convergencia Intertropical), es producto de la convección de humedad tropical, la más importante fuente de vapor de Sudamérica, siguiéndole los océanos Atlántico y Pacífico, que dependen de sus respectivos estados térmicos.

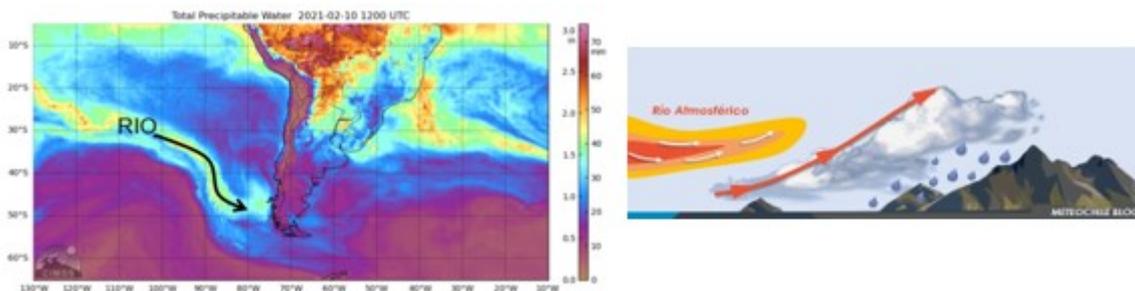


Figura 4: Imagen satelital de un Río Atmosférico (izq.) y esquema de uno que impacta en los Andes áridos transportando humedad desde la zona ecuatorial. Fuente: Viale, 2017; Ralph, F. M et al, 2017.

Su transporte hacia latitudes medias y altas, es realizado por la Jet Stream y/o la delantera de un frente, formando un “Río atmosférico” (fig. 4 izq.), que es una estrecha banda de humedad concentrada en la atmósfera, haciendo fluir vapor de agua generalmente a lo largo de los límites entre grandes áreas de flujo divergente del aire en superficie, que incluye las zonas frontales asociadas a los ciclones extra tropicales que se forman sobre los océanos. Este constituye una importante fuente de agua precipitable para las regiones ubicadas en latitudes medias, particularmente, ayudado por la cordillera, en los Andes Áridos (fig. 4 der.) (Viale, 2017; Ralph, F. M et al, 2017). Los autores calcularon las correlaciones entre los principales factores que inciden en las nevadas estimadas por el Derrame Anual del Río San Juan (DJUA) (Poblete, A. G., Albeiro, M. A. 2021; Poblete, A. G., Albeiro, M. A. 2021; Poblete, A. G ; Monroy, P.B. 2018).

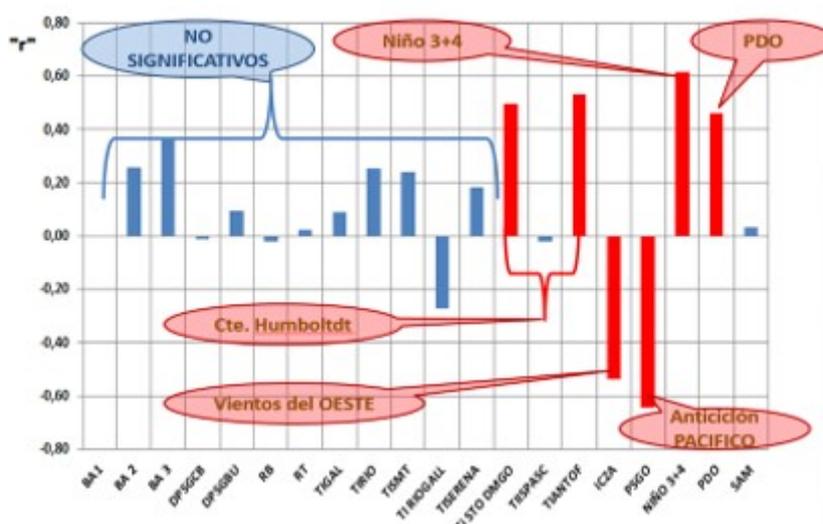


Figura 5: Correlación de Pearson entre los índices atmosféricos, oceánicos y cupla océano-atmósfera con las precipitaciones en los Andes Áridos. Significativas al 5% en rojo. Fuente: Elaboración propia.

En las mismas, se identificaron los factores favorables, que por orden de importancia son: Niño

3+4, PDO y la corriente de Humboldt más cálida de lo normal. Mientras que los que inciden negativamente son: el Anticiclón del Pacífico Sur y los Westerlies. Obsérvese la correlación positiva y significativa de la PDO con el DJUA que representa a las mismas. (Fig.5) (Poblete A. G.; Albeiro, M.A.; 2021). Estos resultados fundamentan profundizar porqué la PDO incide de esa manera en las nevadas de los Andes Áridos, evaluando su impacto en cada uno de los principales factores identificados por los autores como favorables y/o desfavorables. (Poblete, A. G., Albeiro, M. A. 2021). Es decir que, en el caso de abundancia de nevadas, llamativamente la PDO debido a su lejanía y por lo tanto a una ausencia de influencia espacial directa, potenciaría a los factores y agentes favorables de la precipitación nival cuando es positiva y debilitaría a los desfavorables cuando está en fase negativa. (Ver Fig. 5).

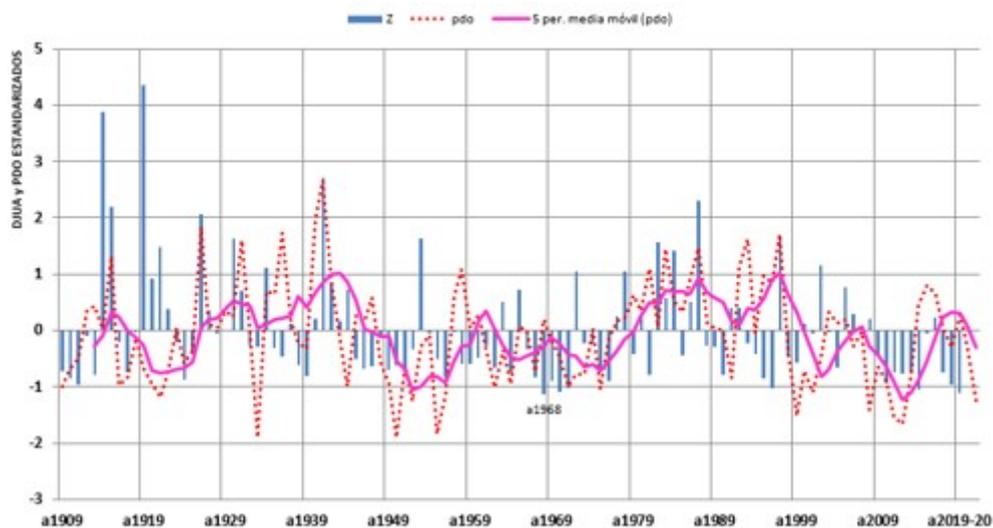


Figura 6: Variabilidad interanual del Derrame anual del Río San Juan (DJUA) y la PDO (línea punteada), ambas estandarizadas, y medias móviles de desplazamiento 5 (línea magenta) con los superávits y los déficits. Fuente: Elaboración propia.

Para corroborar temporalmente dicha incidencia se realiza la fig. 6, en donde se observa una asociación entre los superávits de nevadas y la PDO positiva, mientras que el déficit se relaciona con la negativa. Los periodos más relevantes fueron los de 1944-1977 con una PDO negativa asociada a déficit que incluyen la megasequía de los “años 60”, el periodo subhúmedo 1978-2009 que incluye a los más altos derrames de los últimos años como el de 1987 (4664 Hm³) y 1997 (3935 Hm³) ambos asociados a “NIÑOS” muy intensos, mientras que desde el año 2010 en su fase negativa potencia el inicio de la actual megasequía (Fig. 6).

2. Metodología

Las principales técnicas utilizadas fueron:

2.1 Variable Estandarizada

Mide la desviación de cada dato respecto de la media en unidades de desviación típica.

La nueva variable:

$$z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (1)$$

Con z_i la variable estandarizada obtenida de los N valores de x cuya media \bar{X} y desviación típica (S), tienen una vez estandarizadas, una media = 0 ($\bar{Z} = 0$) y desviación típica = 1 ($S_z = 1$). (Otnes, R. K., 1972).

2.2 Coeficiente de correlación de Pearson

$$r = \frac{1}{n} \frac{\sum (x - \bar{X})(y - \bar{Y})}{S_x S_y} \quad (2)$$

Donde:

- n es el número de datos.
- \bar{X} es la media muestral de la variable x , \bar{Y} es la media muestral de la variable y .
- S_x es la desviación estándar de la variable x .
- S_y es la desviación estándar de la variable y .

Si el r de Pearson no es extremo (-1; 1 o 0) se pueden usar las siguientes dójimas de hipótesis:

2.2.1 Estadístico “t”

$$t = r \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

Con una distribución t con $n-2$ grados de libertad.

Donde:

- t es el estadístico t de Student.
- r es el coeficiente de correlación.

Contraste de hipótesis e intervalo de confianza para un único coeficiente de correlación.

Para $H_0 : \rho_{XY} = 0$

Hipotesis estadísticas:

Para $H_0 : \rho_{XY} = 0$ Para $H_1 : \rho_{XY} \neq 0$

2.2.2 Estadístico de contraste:

Siendo:

- ρ el coeficiente de correlacion poblacional.
- r el coeficiente de correlacion muestral.

$$t = \frac{r_{xy}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \quad (4)$$

t sigue una distribución t de Student con $n - 2$ g.l.

$t > t_{(\alpha, N-2)} \Rightarrow$ Se rechaza la Hipótesis nula (H_0). La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor $\rho_{XY} = 0$. Por tanto las variables están relacionadas.

$t \leq t_{(\alpha, N-2)} \Rightarrow$ Se rechaza la Hipótesis nula. La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor $\rho_{XY} = 0$. Por tanto ambas variables no están relacionadas.

α Es el nivel de significación.

2.2.3 Reanalysis

Los datos de isocorrelaciones espaciales son obtenidos a partir del software Reanalysis del NCEP/NCAR (NOAA), en el período 1948 – 2015/2021, para el lapso mayo – agosto entre los datos localizados en los vértices de una cuadrícula de 4° de latitud y 4° de longitud en la superficie terrestre con los de cada factor analizado. (Reanalysis, 2022). Los datos de Reanalysis NCEP / NCAR constituyen un conjunto de datos en cuadrícula global continuamente actualizado que representan el estado de la atmósfera de la Tierra, incorporando observaciones y resultados del modelo de predicción numérica del tiempo (NWP) desde 1948 hasta el presente.

3. Resultados

Una vez demostrada la incidencia de la PDO en los DJUA, y por ende en las nevadas, se investiga la posible asociación con cada uno de los principales factores dinámicos que influyen en las mismas:

3.1 Influencia de la PDO en las SST

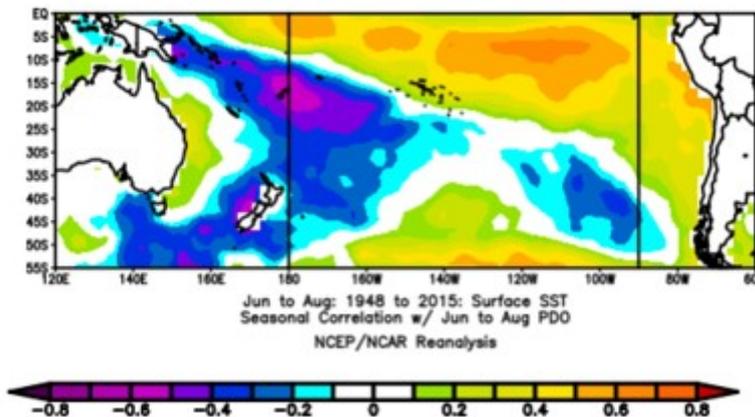


Figura 7: Isocorrelación espacial de Pearson entre la PDO y las SST en periodo de junio-agosto.

La figura 7 muestra la isocorrelación espacial entre la PDO y las SST, verificándose una alta correlación ($r = 0,6yr = 0,8$ significativas al 1%) en el entorno del área Niño 3 + 4 que además confirma la relación física que hay entre la PDO y el ENSO (ver Fig. 2 y 3) de esta manera se explicaría por qué su fase positiva favorece la ocurrencia de nevadas y la negativa a la sequía. Además se detecta una correlación inversa en el área donde se produce la Hot Blob (Shi, Chen, Ding & Lu, 2020) que como se sabe, cuándo está caliente promueve la sequía, en este caso la PDO positiva la enfría y por lo tanto inhibe esa incidencia.

3.2 Influencia de la PDO en el Anticiclón subtropical del Pacífico Sur Oriental (AS-PSO)

Varios autores han demostrado que el ASPSO tiene una fuerte incidencia negativa en las nevadas (Quintana y Aceituno, 2012). A continuación, mediante el Reanalysis se analiza la incidencia de la PDO sobre el mismo.

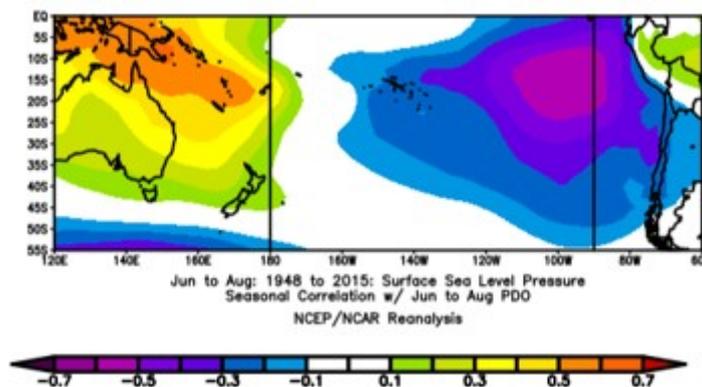


Figura 8: Isocorrelaciones entre la PDO y la Presión atmosférica a nivel del mar. En periodo de junio-agosto.

En la figura 8 se observa una marcada isocorrelación negativa ($r=-0,7$ y $r=-0,5$) entre la PDO y la MLSP (Presión Atmosférica al Nivel del Mar –Mean Sea Level Pressure-) en el área donde

se ubica el Anticiclón Del Pacifico Sur, implicando que a una PDO positiva le corresponde un debilitamiento del ASPSO y viceversa, es decir que cuando es negativa se potencia el anticiclón y con ello promueve la sequía nival y viceversa. Sin embargo, en el norte de Australia, en la zona de Nueva Guinea y Papua, se verifica una correlación positiva, es decir, que para una PDO alta le corresponde una presión también alta en dicha región.

3.3 Influencia de la PDO en el Geopotencial de los 500 mb

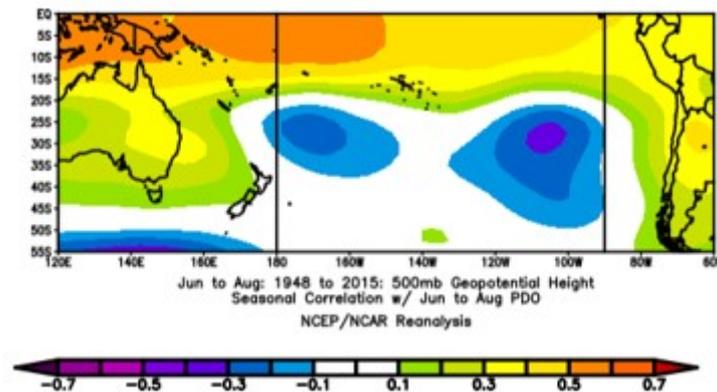


Figura 9: Isocorrelación de Pearson entre la PDO y el Geopotencial de los 500 mb. En periodo de junio - agosto.

Al igual que con el ASPSO, la PDO tiene una correlación negativa en las regiones donde se ubica frecuentemente el geopotencial de los 500mb, por lo tanto, produce el mismo efecto, es decir, lo intensifica/debilita cuando es negativa/positiva con la consecuencia de producir escasez/superávit de nevadas.

3.4 Influencia de la PDO en los vientos constantes del oeste (westerlies)

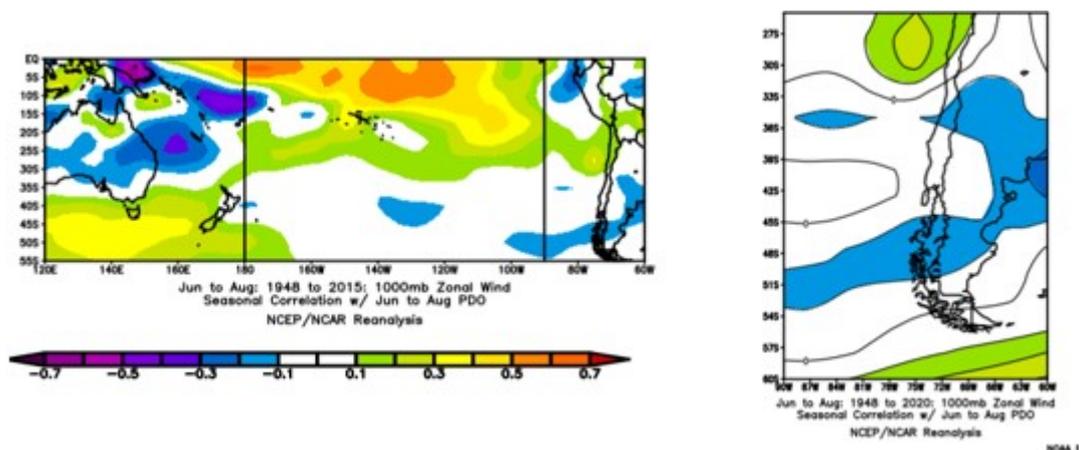


Figura 10: Isocorrelación entre la PDO y el viento zonal de los 1000 mb (westerlies). En periodo de junio- agosto.

Se verifica una asociación inversa entre la PDO y los vientos constantes del oeste; por lo que ante una PDO positiva los mismos se debilitan, y viceversa, siendo coherente con lo mostrado en la fig.5. Es decir, que cuando los westerlies no son intensos favorecen la precipitación nival que se asocia a una PDO positiva.

3.5 Influencia de la PDO en la Humedad específica

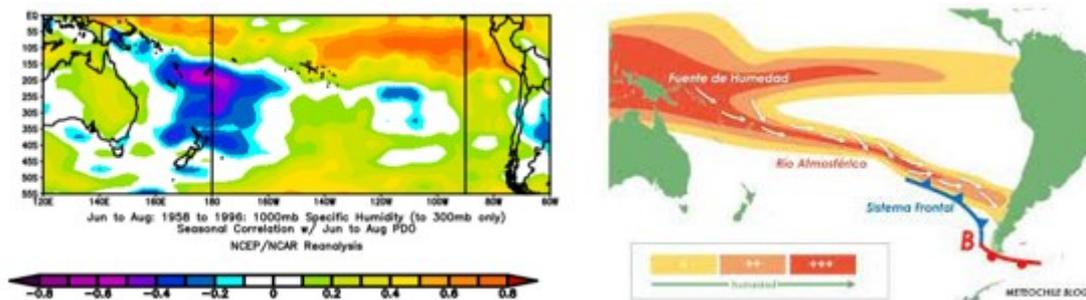


Figura 11: Correlación de Pearson entre la PDO y la Humedad específica. En periodo de junio- agosto (izq.) y esquema de un río atmosférico (derecha).

Como la condición necesaria para que haya precipitación es la existencia de humedad, se analiza el impacto de la PDO en la humedad específica. Si se presenta un factor dinámico que la eleve y condense (condición suficiente), forma nubosidad y eventualmente precipitación. Se observa una leve correlación inversa en una región restringida al sur de los Andes Áridos que, sin embargo, no anula el efecto favorable de la PDO positiva, puesto que existe una correlación directa entre la PDO y la Humedad específica en un área subecuatorial oriental próxima a las costas de Perú (fig. 11 izq.); posibilitando la existencia de los ríos atmosféricos (Fig.11 der.) que se alimentarían en la misma, confirmando dicho efecto favorable. También se observa una asociación inversa en una extensa área al norte de Nueva Zelanda, que se debería al enfriamiento de las aguas superficiales en la zona como se mostró en la Fig. 7.

3.6 Influencia de la PDO sobre Omega

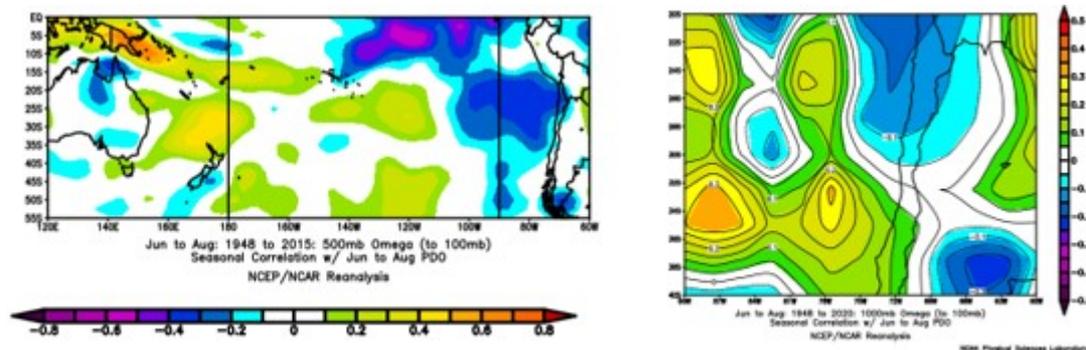


Figura 12: Isocorrelaciones entre la PDO y Omega en los 500mb. En el periodo de junio-agosto.

En la escala hemisférica (Fig 12. Izq) se verifica en el área que se encuentra al noreste de los Andes Áridos una correlación inversa, es decir, que a una PDO positiva le correspondería una omega negativa, y consecuentemente ausencia de movimientos ascendentes. Sin embargo en la mesoescala (Fig 12. Der) se observan áreas que producen ascensos alternados con descensos, separados por un área neutra. Por lo que la convección estaría confinada en el océano circundante a Chile central, con la consecuente posibilidad de formación de nubes y eventualmente precipitaciones, mientras que la subsidencia con su secamiento asociado, en las latitudes donde se encuentra el desierto de Atacama.

4. Conclusiones

De acuerdo a lo investigado, se concluye que la PDO cuando es positiva: Incrementa las SST en el entorno del Pacífico Ecuatorial ($r=0,42$), de esta manera refuerza a un “Niño” y debilita a una “Niña”, es decir que favorecería la precipitación nival. Como tiene una relación inversa con la presión atmosférica a nivel del mar ($r=-0,36$), debilita al ASPSO que es uno de los factores adversos para la caída de nieve. Es decir, que una PDO positiva contribuye favorablemente para que se produzca dicha precipitación. También debilita al geopotencial de los 500mb, y de esa manera se puede comparar con su influencia en el ASPSO. Tiene una asociación inversa con los vientos constantes del oeste; es decir que cuando es positiva éstos se debilitan, de esta manera su baja intensidad resulta favorable a la precipitación nival, y viceversa. Con la humedad específica muestra una leve correlación inversa en un área restringida al sur de los Andes Áridos que, sin embargo, no anula su efecto favorable, puesto que la asociación directa entre ambas, en un área considerable ubicada en el Pacífico subecuatorial oriental próxima a las costas de Perú; posibilita la existencia de los ríos atmosféricos que se alimentarían en la misma y transportarían agua precipitable hacia los Andes Áridos. Muestra una correlación inversa con el parámetro Omega en la escala hemisférica, en un área que se encuentra al noreste de los Andes Áridos, es decir, que a una PDO positiva le correspondería una Omega negativa, y consecuentemente ausencia de movimientos ascendentes. Sin embargo en la mesoescala se observan áreas que producen ascensos alternados con descensos, separados por un área neutra. Por lo que la convección estaría confinada en el océano circundante a Chile central, y la subsidencia en las latitudes donde se encuentra el desierto de Atacama. Lo descrito sobre la influencia de la PDO en los principales factores que inciden en la precipitación nival, explica que la asociación directa entre una PDO positiva/negativa es favorable/desfavorable para que ocurran precipitaciones nivales.

5. Reconocimientos

Se agradece al Proyecto: Análisis del Posible Impacto del Cambio Climático Global en los Recursos Hídricos, Ambiente y Confort Humano en las Regiones de Cuyo y Chile Central.RES, 591/20-CS-UNSJ.Por su respaldo económico.

Referencias bibliográficas

Bacon DP, Ahmad NA, Boybeyi Z, Dunn TJ, Hall MS, Lee PC, Zack JW (2000): A dynamically adapting weather and dispersion model: the operational multiscale environment model with grid adaptivity (OMEGA). *Monthly Weather Review*, 128(7):2044-2076. change, 36(3):413-423.

Mantua NJ, Hare SR (2002): The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1):35-44.

Masiokas MH, Villalba R, Luckman BH, Le Quesne C, Aravena JC (2006): Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of climate*, 19(24):6334-6352.

Méndez González J, Ramírez Leyva A, Cornejo Oviedo E, Zárate Lupercio A, Cavazos Pérez T (2010): Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*,

57-70.

Otnes RK (1972): Digital time series analysis. John Wiley & Sons, ISBN: 0-471-65719-0.

Pino-Vargas E, Chavarri-Velarde E (2022): Evidencias del cambio climático en la región hiperárida de la costa sur del Perú, cabecera del Desierto de Atacama. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(1):333-375.

Poblete AG, Monrroy PB (2018): Agentes Climaticos De Los Que Depende El Recurso Hidrico De Los Oasis De Regadio De La Provincia De San Juan. Actas Jornadas De Ordenamiento Territorial, *San Juan: UNSJ-Ffha*, 1(1):3-17.

Poblete AG, Albeiro MA (2021): Influencia del ENSO en los factores y agentes climáticos que inciden en las precipitaciones níveas de los Andes Áridos. Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía. Centro de Investigaciones Geográficas. CIG/IGEHCS FCH UNCPBA/CONICET. Tandil. Argentina.

Poblete AG, Aguiar LA (2015): Relación entre los factores de circulación atmosférica regional y de la cupla océano-atmósfera con los derrames extremos de los ríos San Juan y Mendoza. Revista de Geografía UNC. Boletín de Estudios Geográficos Instituto de Geografía Facultad de Filosofía y Letras Universidad Nacional de Cuyo. ISSN, 0374-6186.

Poblete AG, Albeiro MA (2021) Caracterización estadística y dinámica de la precipitación nival registrada en la temporada 2020 en Los Andes Áridos y su entorno. *Revista de Geografía*, 23(XXIII):1514-1942.

Quintana JM, Aceituno P (2012): Cambios en el régimen de lluvias a lo largo de la costa oeste extratropical de América del Sur (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 25(1):1-22.

Ralph FM, Dettinger M, Lavers D, Gorodetskaya IV, Martin A, Viale M, Cordeira J (2017): Atmospheric rivers emerge as a global science and applications focus. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(9):1969-1973.

Reanalysis. Utilizado desde: <https://reanalyses.org/>

Shi J, Chen Z, Ding S, Lu Y (2020): A Hot Blob Eastward of New Zealand in December 2019. *Atmosphere*, 11(12):1267.

Viale M (2017): Ríos Atmosféricos Emerger como un enfoque global de ciencia y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Meteorológica Estadounidense*, 98:1969-1973. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0262.1>

Vuille M, Ammann C (1997): Regional snowfall patterns in the high, arid Andes. Climatic