

Artículo en edición

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe029>

1
2 **LA CIRCULACIÓN DE HADLEY AL SUDOESTE DE AMÉRICA DEL SUR:**
3 **MÉTRICAS PARA SU CARACTERIZACIÓN**

4
5 **Elizabeth Beatriz Naranjo Tamayo¹, Juan Antonio Rivera¹, Maximiliano Viale¹,**
6 **Ricardo Villalba¹**

7
8 **¹Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA,**
9 **CONICET-Mendoza)**

10
11 **Autor correspondiente: Elizabeth Beatriz Naranjo Tamayo,**

12 **enaranjotamayo@mendoza-conicet.gob.ar**

13 Manuscrito recibido el 8 de junio de 2023, en su versión final el 26 de diciembre de 2023

14
15 **RESUMEN**

16
17 Este trabajo proporciona una evaluación de las métricas más utilizadas para caracterizar la
18 rama de descenso de la Celda de Hadley y sus tendencias en los últimos 40 años sobre la
19 región del sudoeste de América del Sur, a través del análisis de siete métricas hemisféricas y
20 tres regionales obtenidas a partir de variables meteorológicas pertenecientes al reanálisis
21 ERA5 para el período 1979-2021. Las relaciones entre las métricas fueron determinadas a
22 partir del coeficiente de correlación de Pearson y las tendencias decadales a partir del test de
23 Mann-Kendall. Los resultados encontrados sugieren relaciones estadísticamente
24 significativas entre la métrica hemisférica de referencia *función corriente del flujo de masa*
25 *en 500 hPa*, la métrica regional vinculada a la *posición latitudinal del Anticiclón del Pacífico*
26 *Sur* y las *métricas de la troposfera baja* relacionadas con el *máximo de la presión a nivel del*
27 *mar y la latitud donde cambia de signo el viento en superficie* tanto en la escala anual como



Artículo en edición

28 estacional. Las métricas vinculadas al *jet polar impulsado por las perturbaciones* y a la
29 *precipitación menos la evaporación regional* capturan la variabilidad de la *posición*
30 *latitudinal del Anticiclón del Pacífico Sur*, mientras que la métrica hemisférica de la
31 *troposfera baja precipitación menos evaporación* captura la variabilidad de la métrica de
32 referencia. En cuanto a las tendencias por década de los promedios anuales de la rama de
33 descenso de la Celda de Hadley durante los últimos 40 años se encontraron tendencias
34 negativas estadísticamente significativas, lo cual indica una expansión de la Celda de Hadley
35 durante las últimas cuatro décadas. Esto podría explicar en cierta medida las tendencias
36 decrecientes de la precipitación en la región del sudoeste de América del Sur.

37

38 **Palabras clave: Métricas, Tendencias, ERA5, Circulación de Hadley, Sudoeste de**
39 **Sudamérica.**

40

41 **THE HADLEY CIRCULATION IN SOUTHWESTERN SOUTH**
42 **AMERICA: METRICS FOR ITS CHARACTERIZATION**

43

44 **ABSTRACT**

45

46 This paper provides an evaluation of the most commonly used metrics to characterize the
47 downward branch of the Hadley cell and its trends over the last 40 years over the
48 southwestern region of South America, through the analysis of seven hemispheric and three
49 regional metrics obtained from meteorological variables associated to the ERA5 reanalysis
50 for the period 1979-2021. Relationships between metrics were determined from Pearson's
51 correlation coefficient and decadal trends from the Mann-Kendall test. The results found
52 suggest statistically significant relationships between the hemispheric metric of reference
53 mass flux current function at 500 hPa, the regional metric linked to the latitudinal position of
54 the South Pacific Anticyclone, and the lower tropospheric metrics related to the maximum
55 of sea level pressure and the latitude where the surface wind changes sign on both annual and

Artículo en edición

56 seasonal scales. The metrics linked to eddy driven jet and regional precipitation minus
57 evaporation capture the variability of the latitudinal position of the South Pacific
58 Anticyclone, while the hemispheric lower troposphere metric precipitation minus
59 evaporation captures the variability of the reference metric. Regarding the trends by decade
60 of the annual averages of downward branch of the Hadley Cell over the last 40 years,
61 statistically significant negative trends were found, indicating an expansion of the Hadley
62 Cell over the last four decades. This could explain to some extent the decreasing precipitation
63 trends in the southwestern region of South America.

64

65 **Key Words: Metrics, Trends, ERA5, Hadley Circulations, Southwestern South**
66 **America.**

67

68 1)INTRODUCCIÓN

69 La rama de descenso de la circulación de Hadley ejerce una notable influencia sobre el clima
70 de latitudes subtropicales y medias. La subsidencia generada en la rama descendente seca la
71 atmósfera e inhibe la formación de nubes y precipitación, lo cual propicia que
72 aproximadamente en los 30 ° N y 30 ° S se encuentren los mayores desiertos del mundo. Por
73 lo tanto, cualquier cambio en la posición latitudinal de la rama de descenso de la circulación
74 de Hadley puede producir una serie de impactos en el clima de las regiones subtropicales del
75 planeta (Birner et al., 2014; Xian et al., 2021).

76 Ante el aumento de los gases de efecto invernadero y la disminución del ozono estratosférico
77 se han observado cambios en la posición latitudinal de la rama de descenso de la circulación
78 de Hadley (Staten et al., 2020). Dicha circulación presenta una tendencia de expansión hacia
79 los polos desde aproximadamente la década de 1980 (IPCC, 2021). De acuerdo a un estudio
80 reciente, las tasas de expansión oscilan entre 0.25° y 0.5° de latitud por década dependiendo
81 de las bases de datos observacionales, los modelos climáticos y las métricas usadas (Staten

Artículo en edición

82 et al., 2020). Estas variaciones son una evidencia de las incertidumbres asociadas a su
83 cuantificación (Birner, 2010); Davis y Rosenlof, 2012, Waugh et al., 2018; Xian et al., 2021).

84 En este contexto, diversas métricas a escala hemisférica y regional fueron generadas para
85 determinar la posición latitudinal de la rama de descenso de dicha circulación. A escala
86 hemisférica, existen distintas clasificaciones. Por ejemplo, Lucas et al., (2014) clasifican las
87 métricas a partir de métodos basados en la tropopausa, la función corriente de flujo de masa,
88 el jet subtropical y empleando bases de datos satelitales y de superficie. Por su lado, Staten
89 et al., (2018) las clasifican como métricas de la troposfera alta, media y baja. Por último,
90 Xian et al., (2021) clasifican las métricas en dinámicas, hidrológicas, térmicas y químicas.

91 Existen dos métricas en particular que son utilizadas con frecuencia para identificar la Celda
92 de Hadley a escala hemisférica: la función corriente del flujo de masa (ψ) y la función
93 corriente de flujo de masa en 500 hpa (ψ_{500hPa}). La métrica ψ representa al comportamiento
94 dinámico de la circulación de Hadley, mientras que la métrica de la troposfera media ψ_{500hPa}
95 representa la posición latitudinal de la rama de descenso de la circulación de Hadley. Esta
96 última métrica es considerada de referencia en los estudios vinculados a la expansión de la
97 Celda de Hadley (Solomon et al., 2016; Staten et al., 2018).

98 Según la clasificación de Staten et al. (2018), dentro de las métricas de la troposfera alta se
99 encuentran las basadas en el comportamiento de la tropopausa (TPB), en la corriente en
100 chorro subtropical (STJ) y en la radiación de onda larga saliente (OLR). Por su parte, dentro
101 de las métricas de la troposfera baja se encuentran el viento zonal en superficie (UAS), el
102 máximo de presión a nivel del mar (SLP), y las métricas vinculadas al ciclo hidrológico (la
103 diferencia entre la precipitación y la evaporación, P-E) y al jet impulsado por las
104 perturbaciones (EDJ). Un ejemplo de la identificación de la rama de descenso de la
105 circulación de Hadley a partir de estas métricas se muestra en la Figura 1.

106 En los estudios vinculados a examinar la covariabilidad entre las diferentes métricas de
107 expansión de la circulación de Hadley a partir de modelos climáticos y reanálisis
108 meteorológicos se observa que las métricas de la troposfera baja SLP, UAS y P-E se
109 corresponden con la variabilidad de la métrica de la troposfera media ψ_{500hPa} (Solomon et

Artículo en edición

110 al., 2016; Davis y Birner, 2017; Waugh et al., 2018; Staten et al., 2018). Asimismo, la métrica
 111 EDJ se encuentra estrechamente relacionada en la escala interanual y estacional con la
 112 métrica ψ_{500hPa} (Waugh et al., 2018). Por el contrario, las métricas de la troposfera alta OLR,
 113 TPB y STJ generalmente no presentan correlación con la métrica ψ_{500hPa} (Waugh et al., 2018;
 114 Staten et al., 2020); pero sí presentan correlación moderada entre ellas.

115 En la escala regional, la expansión de la Celda de Hadley ha sido explorada por una cantidad
 116 limitada de estudios. El cómputo de índices regionales vinculados a la rama descendente de
 117 la Celda de Hadley supone un desafío (Staten et al., 2020). La circulación de Hadley
 118 históricamente se ha calculado desde una perspectiva hemisférica para conservar el flujo de
 119 masa en la dirección zonal (Nguyen et al., 2017). Esto hace que no se tenga en cuenta los
 120 cambios en la circulación de Hadley asociados a la irregular distribución de mares y
 121 continentes. Las regiones con mayor cantidad de estudios vinculados a la Celda de Hadley
 122 son las regiones de África (Manney y Hegglin, 2018), este de Asia, Australia y el oeste del
 123 Océano Pacífico (Choi et al., 2014; Lucas y Nguyen, 2015), y la región de América del Sur.
 124 Entre ellos se destacan los estudios de Souza y Ambrizzi, (2002), Chen et al., (2014), Freitas
 125 y Ambrizzi, (2015), Saurral et al. (2017), Díaz y Vera, (2018), Vera et al., (2019), y
 126 Villamayor et al., (2021).

127 Estudios a escala regional usan las métricas hemisféricas adaptadas para la región de interés,
 128 tales como ψ_{500hPa} (Staten et al., 2019; Villamayor et al., 2021), SLP (Staten et al., 2019) y
 129 OLR (Chen et al., 2014). El uso regional de las métricas regionales antes mencionadas no
 130 implica expansión de la Celda de Hadley en todas las longitudes (Staten et al., 2020). Algunos
 131 autores han regionalizado las métricas hemisféricas antes mencionadas a partir de un
 132 promedio zonal sobre regiones específicas. Por ejemplo, la métrica ψ (70° W-50° W (Saurral
 133 et al., 2017); y 110° W-50° W (Vera et al., 2019)); y la métrica OLR sobre América del Sur
 134 (80° W - 35° W; Freitas y Ambrizzi, 2015). Por otro lado, Nguyen et al., (2017) a partir de
 135 una adaptación de la aproximación realizada por Schwendike et al., (2014) utilizaron a la
 136 variable viento divergente para calcular a la Celda de Hadley regional, mientras que Barrett
 137 y Hameed, (2016), Flores-Aqueveque et al., (2020) y Reboita et al., (2019) utilizaron los
 138 índices intensidad y posición del anticiclón subtropical. Además, Flores-Aqueveque et al.,

Artículo en edición

139 (2020) empleó la métrica vinculada a la posición del jet subtropical para calcular las
140 variaciones regionales en la Celda de Hadley.

141 Como se puede observar, existen variedades de métricas a escala hemisférica y regional para
142 determinar la posición de la rama de descenso de la Celda de Hadley. No obstante, ¿cuáles
143 son las métricas más consistentes para la región del sudoeste de América del Sur (SWSA),
144 ubicada entre los 25 ° - 47 ° S y 65 ° - 75 ° W, y cómo ha sido el comportamiento de la Celda
145 de Hadley en los últimos 40 años? Este es un punto de mayor interés. La región SWSA ha
146 presentado una tendencia decreciente de gran magnitud en la precipitación regional desde la
147 década de 1980, parcialmente atribuida al cambio climático antropogénico (Vera y Díaz,
148 2015; Boisier et al, 2016; 2018; Garreaud et al., 2020). El mecanismo físico detrás de estas
149 tendencias pudiera estar asociado a cambios en la circulación de Hadley (Lucas et al., 2014;
150 Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2020; Morales et al., 2020).

151 Atendiendo a lo antes mencionado, en este trabajo se evalúan métricas vinculadas a la rama
152 de descenso de la Celda de Hadley para determinar cuáles son las más consistentes sobre la
153 región del SWSA y sus tendencias en los últimos 40 años. Este trabajo está organizado de la
154 siguiente forma: en la Sección 2 se detallan los datos, metodologías y período analizado. En
155 la Sección 3 se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis y comparación de las
156 métricas. En la Sección 4 se realiza la discusión de los principales resultados de este trabajo.
157 Finalmente, en la Sección 5 se plantean las conclusiones del trabajo.

158

159 **2) METODOLOGÍA Y DATOS**

160 Para la evaluación se consideraron siete métricas hemisféricas y tres regionales. Cada una de
161 ellas contempla diferentes aspectos de la circulación de Hadley (ver Tabla I).

162 Dentro de las métricas hemisféricas observadas en la Tabla I, se encuentran: a) ψ_{500hPa} , es
163 la latitud donde la función corriente de flujo de masa en 500 hpa es igual a cero. Esta métrica
164 representa la posición latitudinal del borde de la Celda de Hadley hacia el polo sur; b) la
165 latitud del máximo de SLP; c) la latitud subtropical donde el viento zonal medio en superficie
166 cambia de signo (vientos tropicales del este a vientos de latitud media del oeste, UAS); d) la
167 latitud donde P-E es igual a cero; e) la latitud del máximo del viento zonal medio en 850 hPa

Artículo en edición

168 (EDJ); f) la latitud del máximo promedio vertical del viento zonal entre los niveles de 100 y
 169 400 hPa en la banda de latitud 15–70° (STJ); y g) la latitud en la que la OLR media zonal es
 170 igual a 250Wm⁻². Dentro de las métricas regionales se encuentran la posición latitudinal del
 171 máximo de presión a nivel del mar del Anticiclón del Pacífico Sur (STRP) calculada en la
 172 banda latitudinal 10° S - 46° S y longitudinal 180° W - 70° W; la latitud en que la función
 173 corriente del flujo de masa en 500 hPa se hace cero (PSI_R) y la latitud donde P-E es igual a
 174 cero (PER) se calcularon en la banda latitudinal 10° S - 60° S y longitudinal 110° W - 50° W.
 175 Las bandas latitudinales y longitudinales utilizadas para el cálculo de las métricas regionales
 176 se muestran en la Figura A2. La métrica ψ_{500hPa} se considera como referencia para analizar
 177 la relación con las métricas hemisféricas y regionales.

178 Las métricas hemisféricas fueron calculadas a partir de un promedio zonal en todas las
 179 longitudes y del paquete Tropical Width Diagnostics (PyTropD), desarrollado en Python
 180 (Adam et al., 2018) para el período 1979-2021. Las variables atmosféricas utilizadas en este
 181 trabajo se obtuvieron del reanálisis ERA5 del European Centre for Medium-Range Weather
 182 Forecast (ECMWF) (Hersbach et al., 2020), con una resolución espacial de 0.25° x 0.25°
 183 (Tabla I). Este reanálisis captura la variabilidad de baja frecuencia del sistema climático
 184 mucho mejor que reanálisis previos como el ERA-Interim (Zaplotnik et al., 2022) y reduce
 185 el sesgo de la divergencia del viento zonal y meridional sobre los océanos (Rivas y Stoffelen,
 186 2019). Esta última ventaja es de gran importancia para la identificación de la circulación de
 187 Hadley.

188 Por otro lado, las series de la posición latitudinal media anual de la circulación de Hadley
 189 obtenidas fueron desestacionalizadas previo al cálculo de las correlaciones como en Davis y
 190 Birnes, (2016). La desestacionalización se realizó a partir de remover la media estacional
 191 climatológica (1979-2021) de cada uno de los valores medios estacionales de cada año. Los
 192 valores de las correlaciones de Pearson anuales y estacionales (verano, DEF; otoño, MAM;
 193 invierno, JJA y primavera, SON) significativas estadísticamente se obtuvieron a partir del
 194 test Normal.

195 Además, se realizó una caracterización del ciclo anual de cada una de las series obtenidas y
 196 se calcularon las tendencias a partir de las anomalías estandarizadas de dichas series como

Artículo en edición

197 en Nguyen et al., (2015) y del test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) con un
198 nivel de significancia del 95% .

199

200 3) RESULTADOS

201 3.1 Caracterización de la posición latitudinal media anual y estacional de la extensión 202 de la Celda de Hadley según métricas hemisféricas y regionales

203

204 La posición latitudinal media anual y estacional de la rama de descenso de la Celda de Hadley
205 de las siete métricas hemisféricas y tres regionales calculadas a partir de los datos del
206 reanálisis ERA5 durante el período de 1979-2021 se muestra en la Figura 2 (a y b). En cuanto
207 a las métricas hemisféricas, la posición latitudinal media anual de las métricas de la troposfera
208 alta (OLR y STJ) presenta valores entre los 30 ° y 35° S; mientras que las métricas de la
209 troposfera baja (SLP, UAS, P-E y EDJ) presentan valores en el rango entre los 31 ° y 51 ° S.
210 Las métricas P-E y EDJ presentan los valores latitudinales más altos, dichos valores oscilan
211 entre los 41° y 51° S, respectivamente. En cuanto a las métricas regionales STRP, PSI_R y
212 PER, presentan valores latitudinales medios de 31 °, 27 ° y 43 ° S, respectivamente. El valor
213 latitudinal medio anual de la métrica STRP es similar a los valores obtenidos de las métricas
214 SLP, UAS y ψ_{500hPa} . La métrica PSI_R presenta el valor latitudinal medio anual ubicado
215 más hacia latitudes bajas (27 ° S); mientras que la métrica PER junto a P-E y EDJ presentan
216 un valor latitudinal ubicado más hacia latitudes altas (42 ° S).

217 En relación a la estacionalidad (Figura 2b), se observa en casi todas las métricas el
218 desplazamiento hacia el polo en verano y hacia el ecuador en invierno a excepción de EDJ,
219 cuyo desplazamiento hacia el polo es máximo en primavera. En cuanto a la diferencia
220 latitudinal entre las estaciones invierno- verano (Figura 2c), se observan diferencias
221 latitudinales que superan los 3 ° de latitud en casi todas las métricas. Las métricas
222 hemisféricas STJ, OLR y la métrica regional PSI_R presentan los mayores valores de
223 diferencias latitudinales, estos valores oscilan entre los 7 ° y 10 °. En cuanto a las diferencias
224 latitudinales entre las estaciones otoño - primavera, los valores oscilan entre 0.4 ° y 3 °
225 aproximadamente.

Artículo en edición

226

227 **3.2 Correlación anual y estacional entre ψ_{500hPa} , las métricas hemisféricas y regionales**

228

229 Los valores de correlación anual y estacional entre la métrica ψ_{500hPa} , las métricas
 230 hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA5 para el período 1979-2021
 231 se muestran en la Figura 3. Los valores del coeficiente de correlación entre ψ_{500hPa} y las
 232 métricas hemisféricas de la troposfera alta STJ y OLR sólo son significativas
 233 estadísticamente en la escala anual y en la estación de verano con la métrica OLR y en la
 234 estación de invierno con la métrica STJ. Los valores del coeficiente de correlación tanto en
 235 la escala anual como estacional oscilan entre $r = -0.21$ y $r = 0.49$.

236 En relación a los valores del coeficiente de correlación anual y estacional entre ψ_{500hPa} y las
 237 métricas de la troposfera baja (SLP, UAS, P-E, EDJ), se observa significancia estadística, a
 238 escala anual y estacional, entre ψ_{500hPa} y SLP, UAS y P-E. En el caso de la métrica EDJ,
 239 solo se observa significancia estadística para las estaciones verano y otoño. Los valores del
 240 coeficiente de correlación en la escala anual y estacional oscilan entre $r = 0.06$ y $r = 0.74$.

241 En cuanto a los coeficientes de correlación anual y estacional entre ψ_{500hPa} y las métricas
 242 regionales (STRP, PSI_R, PER), se encontró que la métrica STRP presenta valores del
 243 coeficiente de correlación significativos estadísticamente en la escala anual y en todas las
 244 estaciones, excepto en el invierno, mientras que la métrica PER sólo presenta correlación
 245 significativa en el verano. Los valores del coeficiente de correlación en la escala anual y
 246 estacional oscilan entre $r = -0.23$ y $r = 0.57$.

247

248 **3.3 Correlación anual y estacional entre pares de métricas hemisféricas y regionales**

249

250 La correlación anual entre pares de métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del
 251 reanálisis ERA5 para el período 1979-2021 se muestra en la Figura 4. En cuanto a las
 252 métricas hemisféricas de la troposfera alta STJ y OLR; se observa que STJ sólo presenta
 253 correlación significativa con la métrica OLR, mientras que la métrica OLR presenta además
 254 correlación significativa con la métrica ψ_{500hPa} . La relación entre el STJ y OLR puede estar

Artículo en edición

255 dada a partir de que los meandros del jet definen la formación de sistemas de altas y bajas
256 presiones y estos se relacionan con la formación de nubosidad. El valor del coeficiente de
257 correlación entre STJ y OLR es $r = 0.42$; mientras que el valor de correlación entre las
258 métricas OLR y ψ_{500hPa} es $r = 0.4$.

259 En relación a las métricas hemisféricas de la troposfera baja SLP y UAS, éstas presentan un
260 valor de correlación significativo de $r = 0.97$. Además, ambas métricas presentan valores del
261 coeficiente de correlación significativos con las métricas de la troposfera baja P-E, EDJ y la
262 métrica regional STRP. La métrica P-E presenta valores de correlación significativos con las
263 métricas de la troposfera baja SLP y UAS; y con la métrica regional STRP. En el caso de la
264 métrica EDJ, presenta correlación significativa con las métricas de la troposfera baja SLP y
265 UAS; además de las métricas regionales STRP y PER. En cuanto a las métricas regionales,
266 la métrica STRP presenta valores de correlación significativos estadísticamente con las
267 métricas SLP, UAS, P-E, EDJ y PER. La métrica PER sólo presenta correlación significativa
268 con la métrica regional STRP y la métrica de la troposfera baja EDJ.

269 Los valores de correlación estacional entre pares de métricas hemisféricas y regionales
270 obtenidas a partir del reanálisis ERA5 para el período 1979-2021 se muestran en la Figura
271 A1. La métrica STJ solo presenta valores de correlación significativa con la métrica de la
272 troposfera alta OLR (en verano y otoño); y la métrica regional PSI_R en el verano. En
273 relación a la métrica OLR, presenta además valores de correlación significativos con las
274 métrica regional PSI_R en el verano y otoño.

275 En cuanto a las métricas de la troposfera baja, SLP presenta valores de correlación
276 significativos estadísticamente con las métricas UAS, P-E, EDJ, STRP y PER en las
277 estaciones verano y otoño; con las métricas UAS, P-E, EDJ y STRP en el invierno y
278 primavera. La métrica UAS presenta valores de correlación significativos con las métricas
279 de la troposfera baja SLP, P-E, EDJ y con las métricas regionales STRP y PER en el verano.
280 En otoño, presenta valores de correlación significativa con las métricas antes mencionadas a
281 excepción de la métrica regional PER. En invierno, presenta valores de correlación
282 significativas con SLP, P-E y la métrica regional STRP. La relación entre la métrica SLP y
283 UAS es notable en todas las estaciones, presenta altos valores de correlación significativa,

Artículo en edición

284 los valores oscilan entre $r = 0.91$ (invierno) y $r = 0.98$ (otoño).
285 En cuanto a la métrica P-E, presenta correlaciones significativas con las métricas SLP y UAS
286 en todas las estaciones. En la estación de verano presenta valores significativos con la métrica
287 de la troposfera baja EDJ y las métricas regionales STRP y PER, en tanto que en invierno la
288 relación es significativa con la métrica STJ. La métrica EDJ presenta valores de correlación
289 significativos con la métrica de la troposfera baja SLP y las métricas regionales STRP y PER
290 en todas las estaciones. Además presenta valores de correlación significativos con la métrica
291 de la troposfera baja UAS para las estaciones de verano, otoño y primavera y con la métrica
292 de la troposfera baja P-E, en la estación del verano.
293 En relación a las métricas regionales, STRP, PSI_R y PER presentan valores de correlación
294 significativos con algunas métricas hemisféricas y entre ellas mismas. La correlación
295 estacional de las métricas hemisféricas y regionales con STRP obtenidas del reanálisis ERA5
296 para el período de 1979-2021 se muestra en la Figura 5. La métrica regional STRP presenta
297 valores de correlación significativos estadísticamente con las métricas de la troposfera baja
298 SLP, UAS y EDJ; y con la métrica regional PER en todas las estaciones. En el caso de los
299 coeficientes de correlación asociados a la métrica de la troposfera baja P-E presentan valores
300 de correlación positivos con significancia estadística para las estaciones del verano y otoño
301 austral. La métrica PER presenta valores de correlación significativos estadísticamente en
302 todas las estaciones del año con las métricas EDJ y STRP. En la estación de verano, PER
303 presenta además, correlaciones significativas estadísticamente con las métricas de la
304 troposfera baja SLP, UAS, P-E y las métricas regionales STRP y PSI_R.. En cuanto a la
305 métrica PSI_R presenta valores de correlación significativos estadísticamente con las
306 métricas de la troposfera alta STJ y OLR y las métricas regionales STRP y PER en la estación
307 de verano, mientras que en el invierno austral solo con la métrica regional PER.

308

309 **3.4 Variabilidad interanual, tendencias anuales y estacionales de las métricas** 310 **hemisféricas y regionales**

311

312 La variabilidad interanual de las anomalías estandarizadas de cada uno de los índices

Artículo en edición

313 calculados para representar a la Celda de Hadley con sus respectivas tendencias se muestran
314 en la Figura 6. De forma general, se observa que las métricas de la troposfera baja SLP y
315 UAS presentan un patrón similar para el período de estudio, al igual que la métrica de la
316 troposfera baja P-E con la métrica de referencia PSI. Además, se observan valores negativos
317 de las anomalías estandarizadas en las métricas PSI, SLP, UAS, P-E y la métrica regional
318 STRP a partir del año 2007, lo cual indica una expansión hacia el polo de la Celda de Hadley.
319 La métrica regional PSI_R presenta valores positivos de las anomalías estandarizadas a partir
320 del año 2007, lo cual indica contracción de la Celda de Hadley.

321 En relación a las tendencias anuales obtenidas de las anomalías estandarizadas se observa
322 que las métricas de la troposfera baja SLP, UAS y P-E junto a la métrica de referencia PSI y
323 la métrica regional STRP muestran tendencias negativas significativas estadísticamente
324 Figura 6. Las tendencias negativas sugieren expansión de la Celda de Hadley hacia el polo.
325 Este comportamiento también se observa en las diferencias obtenidas del promedio anual de
326 la presión a nivel del mar y viento zonal en superficie para el período 2000-2021 menos 1979-
327 1999, Figura A3. Las tendencias observadas en las variables presión a nivel del mar y el
328 viento zonal en superficie Figura A3 c) y f), muestran un patrón de incremento de la presión
329 a nivel del mar (+1.2 hPa) hacia el oeste del Océano Pacífico Sur, la expansión del ASPS
330 hacia el polo y el fortalecimiento de los vientos del oeste. Por otro lado, las métricas STJ y
331 PSI_R son las únicas métricas que presentan tendencias positivas sin significancia
332 estadística, lo cual indica contracción de la Celda de Hadley.

333 Las tendencias de promedios anuales por década de las métricas hemisféricas y regionales
334 obtenidas a partir del reanálisis ERA5 durante el período de 1979-2021 se muestran en la
335 Figura 7. La métrica ψ_{500hPa} , las métricas de la troposfera baja SLP, UAS, P-E y la métrica
336 regional STRP muestran valores de tendencias negativas significativas, sugiriendo una
337 expansión de la Celda de Hadley hacia el polo. Los valores de la tendencia por década oscilan
338 entre -0.10° y -0.24° . La métrica regional PSI_R presenta tendencia positiva sin significancia
339 estadística (0.2°), que debería interpretarse como una contracción de la Celda de Hadley
340 regional hacia el ecuador.

341 Las tendencias de promedios estacionales por década de las métricas hemisféricas y

Artículo en edición

342 regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA5 durante el período de 1979-2021 se
343 muestran en la Figura 8. La métrica ψ_{500hPa} presenta tendencias negativas significativas
344 estadísticamente para las estaciones de verano, otoño e invierno. La métrica hemisférica de
345 la troposfera alta OLR presenta tendencia positiva significativa estadísticamente en el otoño,
346 sugiriendo una contracción de la Celda de Hadley hacia el ecuador. En relación a las métricas
347 de la troposfera baja, la métrica SLP presenta tendencias negativas significativas
348 estadísticamente para las estaciones verano e invierno (-0.16° y -0.2° por década,
349 respectivamente). La métrica UAS presenta tendencias negativas con valores que oscilan
350 entre -0.10° y -0.27° por década, con significancia estadística en el invierno y primavera ($-$
351 0.27° y -0.22° por década, respectivamente). Por otro lado, P-E presenta tendencias negativas
352 estadísticamente significativas con valores que oscilan entre -0.17° y -0.32° por década para
353 las estaciones verano, otoño e invierno (-0.17° , -0.30° y -0.32° por década,
354 respectivamente). En cuanto a las métricas regionales, STRP y PER presentan tendencias
355 significativas estadísticamente en la estación de verano (-0.21° y -0.22° por década,
356 respectivamente).

357

358 4) DISCUSIÓN

359 Este trabajo proporciona una evaluación de las métricas más utilizadas para caracterizar la
360 rama de descenso de la Celda de Hadley y sus tendencias en los últimos 40 años sobre la
361 región del SWSA, a través del análisis de siete métricas hemisféricas y tres regionales
362 obtenidas a partir de variables meteorológicas pertenecientes al reanálisis ERA5.

363 Los resultados encontrados muestran que existen diferencias latitudinales entre las métricas.
364 La mayoría de las métricas presentan valores de posición latitudinal media anual en el rango
365 entre los 30° S y 34° S, a excepción de las métricas PSI_R (27° S), EDJ, P-E y PER (entre
366 40° S y 51° S). Parte de estos resultados son consistentes con los encontrados por Davis y
367 Rosenlof (2012), Solomon et al. (2016), Waugh et al. (2018). Las diferencias latitudinales
368 están asociadas a los distintos componentes de la circulación de Hadley que son considerados
369 para derivar las diferentes métricas.

370 En relación al desplazamiento latitudinal hacia el polo de la rama descendente de la Celda de

Artículo en edición

371 Hadley sugerido por las métricas EDJ y P-E, es importante notar que la métrica EDJ, asociada
372 a los flujos de perturbaciones en las Ondas de Rossby (Davis y Birner, 2017), afectarían a la
373 Celda de Hadley a través de la redistribución del calor y cantidad de movimiento en la
374 atmósfera, induciendo la formación de la Celda de Ferrel y los flujos perturbados de latitudes
375 medias (Staten et al., 2018). Por ello, la posición latitudinal de la métrica EDJ se ubica hacia
376 el polo del borde de la Celda de Hadley en la región de latitudes medias (Figura 1). La métrica
377 P-E representa la transición entre los subtropicales áridos y las zonas de abundante
378 precipitación en latitudes medias a altas y generalmente se localiza en el área de subsidencia
379 que divide a la Celda de Hadley de la Celda de Ferrel (Davis y Birner, 2017). En cuanto a la
380 posición más hacia el polo de la métrica regional PER con respecto a la métrica hemisférica
381 P-E, podría estar dado por la diferencia de escala. Si bien ambas métricas se calculan a partir
382 de un promedio zonal, P-E se calcula para todo el hemisferio sur; mientras que PER sobre
383 una región específica (110 ° W - 50 ° W).

384 En relación a las posiciones latitudinales medias estacionales de cada una de las métricas
385 (Fig. 2b), éstas presentan un comportamiento de migración hacia el polo en verano y hacia
386 el ecuador en invierno a excepción de la métrica EDJ, cuya migración hacia el polo es
387 máxima en primavera. Estos resultados son congruentes con estudios previos (Solomon et
388 al., 2016; Grise y Polvani, 2016; Waugh et al., 2018) a excepción de la estación donde ocurre
389 el máximo de la métrica EDJ. Este resultado puede estar asociado a la diferencia entre las
390 bases de datos utilizadas (ERA5 en este estudio y los reanálisis centenarios, modernos y
391 modelos climáticos en los estudios de Grise et al., 2018; Staten et al., 2018). Además, este
392 comportamiento puede estar asociado a los cambios estratosféricos y al impacto de estos
393 cambios sobre la troposfera. En estudios recientes (Byrne y Shepherd, 2018; Byrne et al.,
394 2019) se ha encontrado que el fortalecimiento del Vórtice Polar Estratosférico (SPV, por sus
395 siglas en inglés) durante el período previo a su ruptura influye sobre la latitud del EDJ en la
396 troposfera. Byrne et al. (2019) estudiaron la variabilidad acoplada entre el SPV y el EDJ,
397 encontrando que durante los años en los que ocurre un retraso en primavera del ciclo
398 estacional estratosférico suele producirse un retraso en el momento de la ruptura del SPV a
399 principios de verano, lo cual pudiera estar asociado con un desplazamiento hacia el polo del

Artículo en edición

400 EDJ en primavera y un retraso del desplazamiento del EDJ hacia el ecuador a principios de
401 verano.

402 En cuanto a las relaciones entre la métrica de referencia ψ_{500hPa} , las métricas de la troposfera
403 baja (SLP, UAS, P-E y EDJ) y la métrica de la troposfera alta STJ se observan diferencias en
404 este trabajo que son consistentes con estudios previos (Solomon et al., 2016, Waugh et al.,
405 2018, Staten et al., 2018). Las métricas de la troposfera baja (SLP, UAS y P-E) están más
406 fuertemente relacionadas con ψ_{500hPa} , capturan en alguna medida la variabilidad en la latitud
407 del cruce de ψ_{500hPa} por cero (Waugh et al., 2018); y EDJ se relaciona significativamente
408 con ψ_{500hPa} en las estaciones de verano y otoño. Por el contrario, STJ sólo presenta relación
409 significativa en el límite de la significancia estadística con la métrica ψ_{500hPa} en la estación
410 del invierno austral. Las diferencias encontradas en las relaciones con ψ_{500hPa} se deben a
411 que STJ está relacionada con la circulación de Hadley a través del gradiente de temperatura
412 meridional, mientras que con las métricas de la troposfera baja la relación se da con el
413 transporte de momento en la atmósfera (Davis y Birner, 2017; Grise et al., 2019). La relación
414 entre ψ_{500hPa} y SLP está dada a partir de la subsidencia de la rama descendente de la Celda
415 de Hadley la cual determina la presencia del cinturón de altas presiones alrededor de los 30 °
416 S y N. Así, como la relación significativa entre P-E y SLP, se debe a que la rama de descenso
417 de la Celda de Hadley determina la posición de los sistemas de altas presiones
418 semipermanentes subtropicales y las regiones donde se encuentran las zonas subtropicales
419 secas que separan los trópicos de los extratropicos (Cai et al., 2012).

420 Las relaciones entre ψ_{500hPa} y OLR encontrados en este trabajo tanto en la escala anual como
421 estacional son contrarios a los obtenidos por Solomon et al. (2016) y Waugh et al. (2018),
422 aunque la correlación entre ambas métricas es baja y se encuentra en el límite de la
423 significancia estadística. Sin embargo, se obtuvieron correlaciones significativas en escala
424 anual y en las estaciones de verano y primavera austral. Estas diferencias pueden deberse a
425 diferencias en las bases de datos, metodologías y períodos de tiempos utilizados en el cálculo
426 de las relaciones. Por ejemplo, Solomon et al., (2016) utilizan el ensamble de un solo modelo
427 climático y los reanálisis del NCEP, ERA Interim y JRA-25 para dos períodos temporales
428 (período histórico 1979 - 2005) y (proyecciones futuras del escenario RCP8.5 2006 - 2080).

Artículo en edición

429 Waugh et al., (2018), utilizan las simulaciones de Control Preindustrial y las simulaciones
430 con una cuadruplicación abrupta de CO₂ de 23 modelos climáticos pertenecientes al CMIP5
431 y en este trabajo se utiliza el reanálisis ERA5 para el período 1979 - 2021. En cuanto a las
432 metodologías empleadas para determinar las correlaciones, Solomon et al., (2016) utilizan la
433 correlación cruzada para cada una de las métricas separadas por mes, Waugh et al., utilizan
434 el Coeficiente de Correlación de Pearson para la escala estacional y media anual. En este
435 trabajo se calcula el Coeficiente de Correlación de Pearson a partir de la desestacionalización
436 de las series temporales obtenidas.

437 En relación a las correlaciones entre ψ_{500hPa} y las métricas regionales, se encontraron
438 resultados significativos estadísticamente con la métrica STRP. Las métricas ψ_{500hPa} y
439 STRP presentan relaciones significativas en la escala anual y las estaciones verano, otoño y
440 primavera austral. Estos resultados muestran la estrecha relación que existe entre la rama de
441 descenso de la Celda de Hadley y la posición latitudinal del máximo de presión del Anticiclón
442 Subtropical del Pacífico Sur (ASPS). Esto se debe a que la subsidencia que se genera en la
443 rama descendente de la Celda de Hadley es uno de los mecanismos que incide sobre la
444 presencia de los anticiclones subtropicales (Reboita et al., 2019).

445 Asimismo, las correlaciones significativas entre SLP y UAS encontradas en este trabajo en
446 la escala anual y estacional son consistentes con las obtenidas por Adam et al. (2018), Choi
447 et al. (2014), Waugh et al. (2018). Esta relación puede estar dada porque el viento zonal
448 geostróficamente equilibrado cambia de signo donde el gradiente de presión meridional
449 cambia de signo (Adam et al., 2018). Esto hace que exista proximidad entre la latitud del
450 máximo de presión a nivel del mar y la latitud donde el viento zonal medio en la superficie
451 cambia de signo. En cuanto a la relación entre STRP y SLP, ambas representan la latitud del
452 máximo de presión a nivel del mar. Las diferencias entre ellas radica en la escala espacial y
453 en el cómputo de las mismas. STRP se calcula atendiendo a las variaciones longitudinales a
454 escala regional sobre el este del Pacífico Sur, mientras que SLP a partir de un promedio zonal
455 para todo el Hemisferio Sur.

456 Además, en este trabajo se encontraron relaciones significativas entre las métricas EDJ, PER
457 y STRP. Las métricas EDJ y PER capturan la variabilidad de la posición latitudinal del STRP

Artículo en edición

458 tanto en la escala anual como estacional. Las métricas EDJ y PER podrían estar representando
459 a las perturbaciones baroclínicas embebidas en el flujo de los oestes sobre latitudes medias,
460 aproximadamente en el borde sur del ASPS en los 50 ° S (Varma et al., 2012; Flores-
461 Aqueveque et al., 2020), y a la precipitación regional por el movimiento de estas
462 perturbaciones en la banda latitudinal de la trayectoria de las tormentas.

463 Por otro lado, la relación significativa obtenida entre PSI_R y PER en verano e invierno
464 puede representar a la dinámica regional entre la Celda de Hadley y la precipitación, aunque
465 sobre la región de estudio existen otros factores que inciden sobre la precipitación como las
466 complejas interacciones entre los patrones de circulación atmosféricos, la orografía y las
467 diferencias latitudinales de la radiación (Flores-Aqueveque et al., 2020).

468 En relación a la variabilidad interanual de cada uno de los índices calculados para representar
469 a la Celda de Hadley con sus respectivas tendencias, los resultados vinculados a la
470 variabilidad de la métrica regional PSI_R son consistentes con los encontrados por Saurral
471 et al. (2017) y Vera y Díaz (2019). La evolución de la Celda de Hadley regional exhibe gran
472 variabilidad interanual. En relación a los valores de tendencias anuales se observaron
473 diferencias en las tendencias de las métricas PSI, SLP, UAS, P-E y PSI_R antes y después
474 del año 2007. Estas diferencias en las tendencias anuales también se observan para la presión
475 a nivel del mar y el viento zonal en superficie en la Figura A3. Esto da cuenta de la influencia
476 de los valores iniciales y finales sobre el valor de la tendencia.

477 En cuanto a las tendencias en los últimos 40 años, se encontró que la mayoría de las métricas
478 utilizadas presentan tendencias negativas, lo cual sugiere expansión de la Celda de Hadley
479 hacia el polo. Los resultados de las tendencias encontradas podrían explicar las tendencias
480 decrecientes de la precipitación encontradas sobre la región del SWSA desde la década de
481 1980 (Garreaud et al., 2013, 2017, 2020; Boisier et al., 2016, 2018; Villamayor et al., 2021).

482 Las métricas ψ_{500hPa} , SLP, UAS, P-E y STRP presentan tendencias negativas significativas
483 estadísticamente en la escala anual, mientras en la escala estacional ψ_{500hPa} , SLP y P-E
484 presenta tendencias negativas significativas en más de una estación, STRP y PER en la
485 estación de verano austral. Los resultados de tendencia encontrados en las métricas ψ_{500hPa}
486 y UAS son consistentes con los obtenidos por Grise y Davis, (2020) para el reanálisis ERA5.

Artículo en edición

487 No obstante, se observan diferencias en cuanto a la magnitud de los cambios. Estas
488 diferencias pueden deberse a los diferentes períodos base utilizados para el cálculo de las
489 tendencias. La tendencia negativa significativa de STRP en la estación de verano austral es
490 consistente con el resultado encontrado por Flores-Aqueveque et al., (2020).

491 En relación a las tasas de expansión obtenidas en este trabajo en los últimos 40 años tanto en
492 la escala anual como estacional presentan valores menores a 0.5° de latitud por década. Estos
493 valores son congruentes con las tasas de expansión documentadas previamente para el
494 Hemisferio Sur mediante el uso de reanálisis modernos. Dichas tasas oscilan entre los 0.2°
495 y los 0.5° de latitud por década (Adam et al., 2014; Studholme y Gulev, 2018; Staten et al.,
496 2020; Xian et al., 2021).

497 En cuanto a las tendencias positivas de las métricas PSI_R y OLR que sugieren eventual
498 contracción de la Celda de Hadley para distintos períodos de tiempo y que son contrarias a
499 las tendencias encontradas en el resto de las métricas pueden estar explicadas a partir de
500 diferentes factores. Xian et al., (2021) señalan que el período de tiempo, las bases de datos
501 utilizadas, los diferentes niveles de la atmósfera implicados en el cálculo de las métricas, las
502 inhomogeneidades en los datos de entrada, las variaciones estacionales, las diversas
503 metodologías empleadas para calcular la expansión de la Celda de Hadley, así como las
504 diferencias en la asimilación de observaciones por los diferentes tipos de reanálisis pueden
505 explicar las discrepancias en las métricas y las tendencias temporales.

506 La métrica PSI_R fue construida con el objetivo de identificar la influencia del factor
507 antropogénico y la variabilidad natural sobre los cambios observados en la precipitación
508 sobre la región del Altiplano de América del Sur, entre los 15° S y 25° S (Vera y Díaz, 2019)
509 en la estación del verano austral. El resultado de expansión en la estación del verano austral
510 de PSI_R es consistente en parte con lo documentado por Vera y Díaz, (2019), aunque existen
511 discrepancias entre el período de tiempo y las bases de datos consideradas entre ambos
512 estudios, lo cual no permite realizar una comparación adecuada entre los resultados
513 encontrados.

514 En cuanto a las diferencias de las tendencias obtenidas entre la métrica PSI_R y el resto de
515 las métricas en la escala anual y estacional puede estar dada por las diferencias de escalas

Artículo en edición

516 espaciales. La métrica de referencia PSI y la regional PSI_R se calculan de la misma forma,
517 sólo varía la escala espacial. PSI se calcula a través de un promedio zonal para todo el
518 hemisferio sur, mientras que PSI_R se calcula a partir de un promedio zonal en la banda
519 latitudinal 110 ° W y 50° W. Otro de los factores, puede ser los diferentes niveles de la
520 atmósfera implicados en el cálculo de las métricas. OLR es una métrica de la troposfera alta
521 y PSI_R es una métrica de la troposfera media. En cuanto a las diferencias en las tendencias
522 entre PSI_R con las métrica regional STRP, la métrica regional STRP tiene en cuenta las
523 variaciones longitudinales del máximo de presión a nivel del mar, mientras que PSI_R es un
524 promedio zonal sobre una región en específico. Ambas métricas presentan tendencias
525 contrarias en la escala anual y en las estaciones a excepción del verano austral.
526 En el caso de la tendencia positiva de OLR en el otoño austral, lo cual sugiere contracción,
527 es consistente con los resultados encontrados por Solomon et al., (2016). Aunque la base de
528 datos utilizada, el período de tiempo y el cálculo de las tendencias son diferentes al utilizado
529 en este estudio, lo cual no permite realizar una comparación adecuada entre los resultados
530 encontrados.

531

532 5) CONCLUSIONES

533

534 Siete métricas hemisféricas y tres métricas regionales derivadas del reanálisis ERA5 a lo
535 largo del período 1979-2021 fueron examinadas para determinar las variaciones en la
536 posición latitudinal de la rama de descenso de la Celda de Hadley y sus tendencias en los
537 últimos 40 años para la región del SWSA.

538 De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, la métrica hemisférica de referencia
539 ψ_{500hPa} y la regional STRP presentaron relaciones estadísticamente significativas con el
540 resto de las métricas tanto en la escala anual como estacional. Ambas métricas presentan una
541 estrecha relación con las métricas de la troposfera baja SLP y UAS en ambas escalas
542 temporales. Sin embargo, STRP está estadísticamente relacionada con las métricas EDJ y
543 PER en todas las estaciones, mientras que ψ_{500hPa} solo está significativamente
544 correlacionado con P-E. Los resultados vinculados con la métrica STRP muestran la relación

Artículo en edición

545 existente entre la posición latitudinal del ASPS con la rama de descenso de la Celda de
546 Hadley, el flujo de los oestes, la trayectoria de las tormentas y la precipitación regional
547 (Varma et al., 2012; Flores-Aqueveque et al., 2020). Esto se debe a que el ASPS forma parte
548 de la circulación atmosférica de gran escala, conecta a la circulación de los vientos del oeste
549 en latitudes medias con los vientos del este tropicales, incide sobre el tiempo y el clima de
550 latitudes medias subtropicales sobre la región de estudio e influye sobre la precipitación
551 regional (Fahad et al., 2020; Barrett y Hameed, 2016).

552 En cuanto a las tendencias en los últimos 40 años, se encontró que la mayoría de las métricas
553 utilizadas presentan tendencias negativas (ψ_{500hPa} , SLP, UAS, P-E y la regional STRP), lo
554 cual sugiere expansión de la Celda de Hadley hacia el polo. Los resultados de las tendencias
555 encontradas podrían explicar las tendencias decrecientes de la precipitación encontradas
556 sobre la región del SWSA desde la década de 1980 (Garreaud et al., 2013, 2017, 2020; Boisier
557 et al., 2016, 2018; Villamayor et al., 2021). En relación a las tasas de expansión, se obtuvieron
558 tasas menores a 0.5 ° de latitud por década en los últimos 40 años. Estas tasas de expansión
559 se encuentran dentro del rango de expansión documentado previamente para el Hemisferio
560 Sur, entre 0.2 ° y 0.5 ° de latitud por década.

561 Si bien, la mayoría de las métricas presentan tendencias negativas y las tasas de expansión
562 se encuentran dentro del rango de expansión documentado previamente para el Hemisferio
563 Sur se observan diferencias en las tendencias y su magnitud entre ellas y con estudios previos.
564 Estas diferencias pueden estar dadas por el período de tiempo, las bases de datos utilizadas,
565 los diferentes niveles de la atmósfera implicadas en el cálculo de las métricas, las
566 inhomogeneidades en los datos de entrada, las variaciones estacionales, las diversas
567 metodologías empleadas para calcular la expansión de la Celda de Hadley, así como las
568 diferencias en la asimilación de observaciones por los diferentes tipos de reanálisis (Xian et
569 al., 2021).

570

571 Agradecimientos

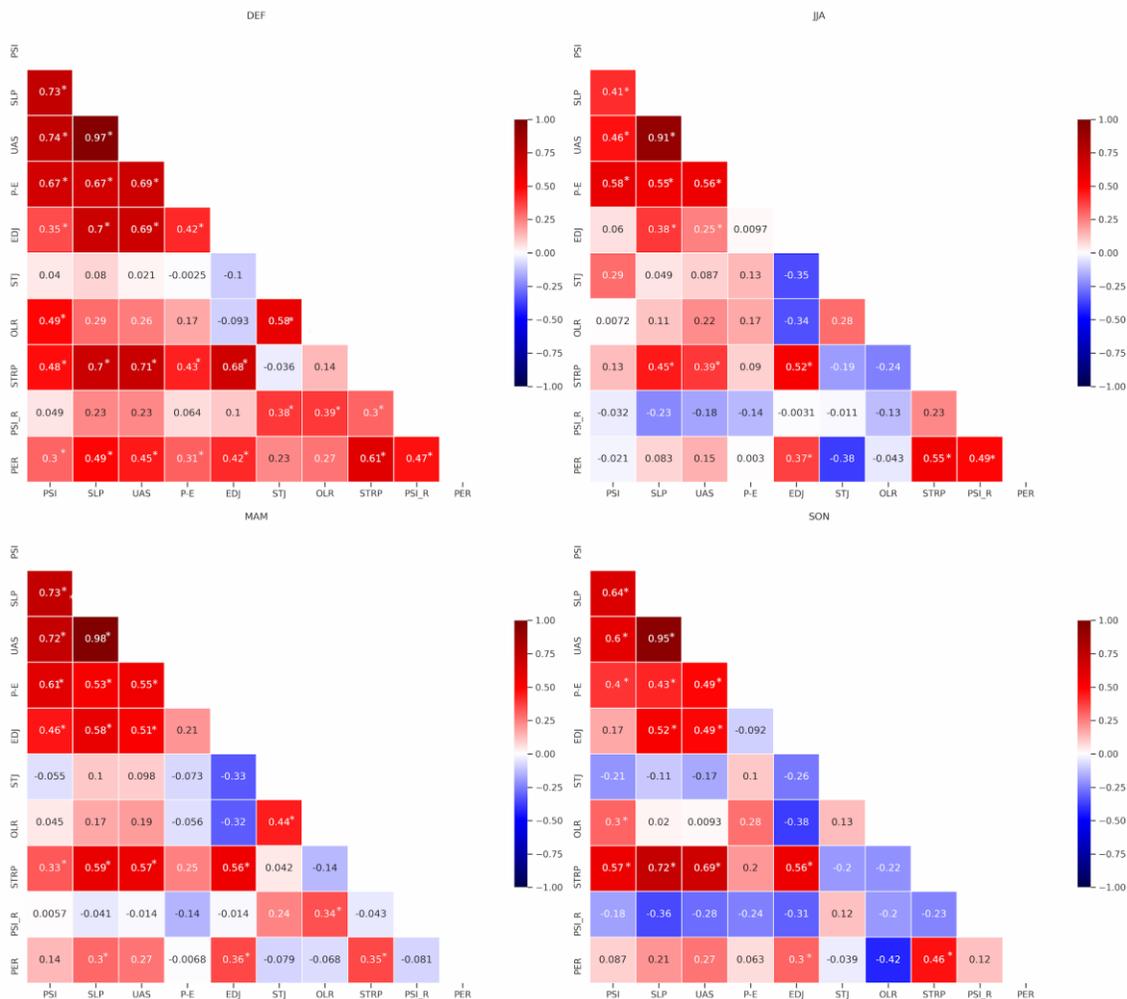
572

573 "Los autores desean agradecer el apoyo obtenido por el proyecto THEMES (THE Mystery

Artículo en edición

574 of the Expanding tropics: from past to future), financiado por BNP Paribas Foundation, al
 575 proyecto Red Bosque-Clima (Mincyt, Argentina), contribución N° 2 y a los desarrolladores
 576 del paquete en python Tropical Width Diagnostics (PyTropD), (Adam et al., 2018)".

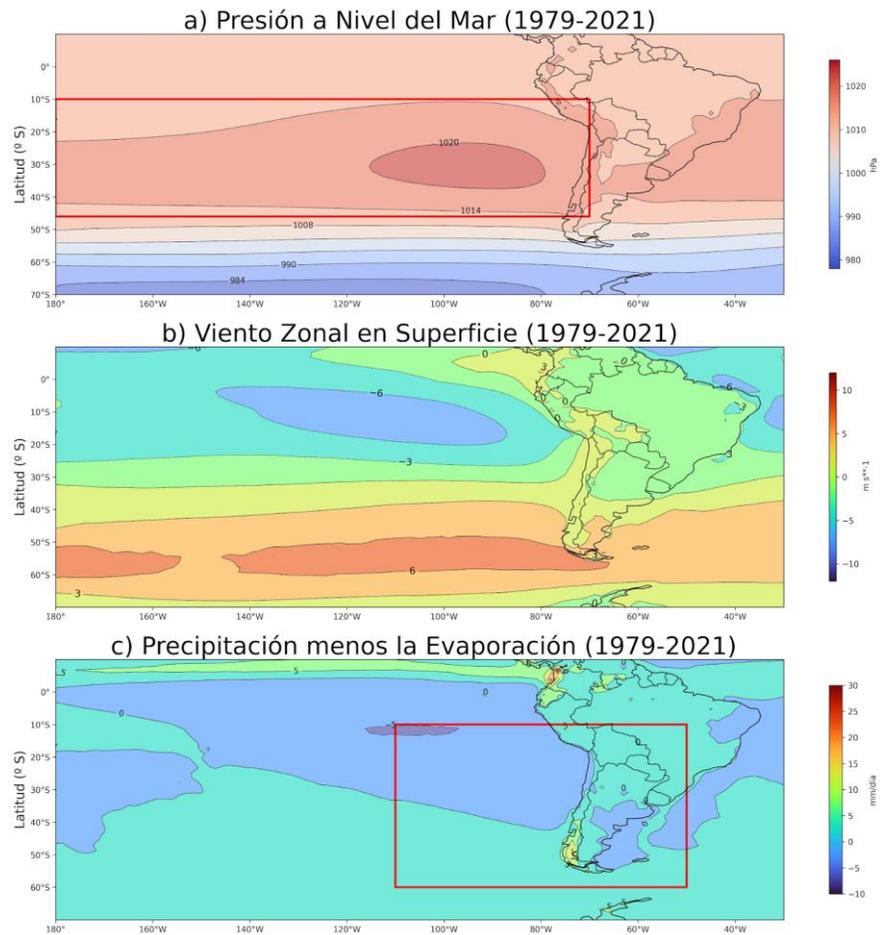
577 ANEXOS



578
 579 *Figura A1. Correlación estacional entre pares de métricas del reanálisis ERA 5 para el*
 580 *período 1979-2021. El asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente*
 581 *significativa a un 95% de confianza.*

582

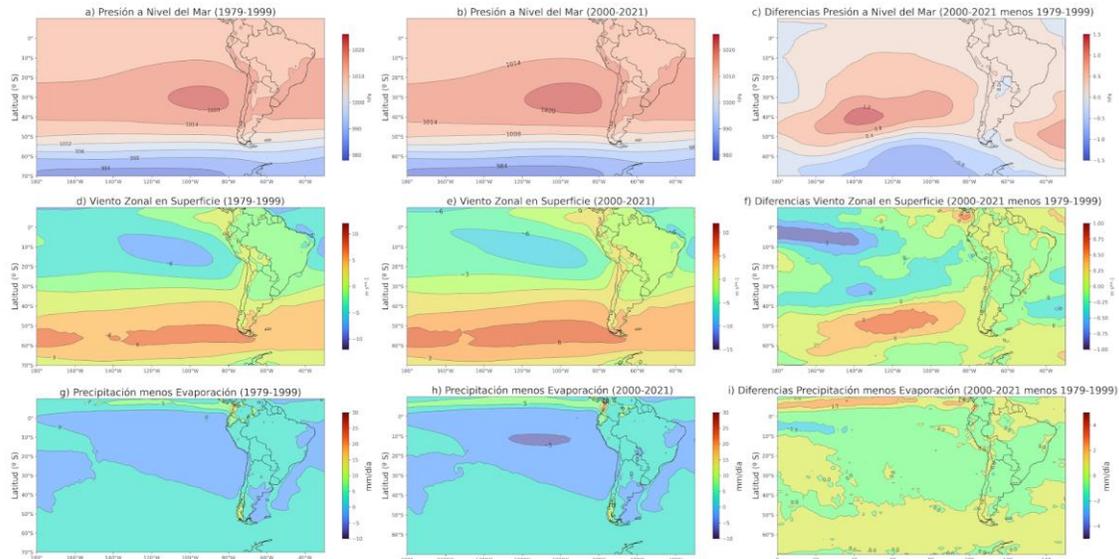
583



584

585 *Figura A2. Promedio anual de: a) presión a nivel del mar (hPa), b) viento zonal en superficie*
 586 *(ms⁻¹) y la c) precipitación menos la evaporación (mm/día) para el período 1979 -2021.*
 587 *Las líneas rojas representan las bandas latitudinales y longitudinales utilizadas para el*
 588 *cálculo de las métricas regionales STRP, PSIR y PER.*

Artículo en edición



589 *Figura A3. Media anual a) presión a nivel del mar 1979 - 1999 (hPa), b) presión a nivel del*
 590 *mar 2000 - 2021 (hPa), c) Diferencia presión a nivel del mar 2000 -2021 menos 1979 -*
 591 *1999(hPa), d) viento zonal en superficie 1979 - 1999 (m**s-1), e) viento zonal en superficie*
 592 *2000 - 2021 (m**s-1), f) Diferencia viento zonal en superficie 2000 -2021 menos 1979 -*
 593 *1999(hPa), g) precipitación menos evaporación 1979 - 1999 (mm/día), h) precipitación*
 594 *menos evaporación 2000 - 2021(mm/día), i)Diferencia precipitación menos evaporación*
 595 *2000 -2021 menos 1979 - 1999 (mm/día).*
 596

597

598

599

600

601

602

603

604

605

606

607

608

609

610

611 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artículo en edición

- 612 **Adam y colaboradores, (2014)**. Role of Changes in Mean Temperatures versus Temperature
 613 Gradients in the Recent Widening of the Hadley Circulation. *Journal of Climate*, VOLUME
 614 27, DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00140.1
- 615 **Adam, O., y colaboradores (2018)**. The TropD software package (v1): Standardized
 616 methods for calculating tropical-width diagnostics. *Geoscientific Model Development*,
 617 11(10), 4339–4357. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4339-2018>
- 618 **Barrett, B. S. y Hameed, S. (2017)**. Seasonal Variability in Precipitation in Central and
 619 Southern Chile: Modulation by the South Pacific High, *J. Climate*, 30, 55–69.
- 620 **Bengtsson, L.; Hagemann, S.; Hodges, K.I., (2004)**. Can climate trends be calculated from
 621 reanalysis data? *J. Geophys. Res. Atmos.* 109, D11111
- 622 **Birner, T., (2010)**. Recent widening of the tropical belt from global tropopause statis-
 623 tics: Sensitivities. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D23109
- 624 **Birner, T., Davis, S. M., y Seidel, D. J, (2014)**. The changing width of Earth's tropical belt,
 625 *Phys. Today*, 67, 38–44, <https://doi.org/10.1063/PT.3.2620>.
- 626 **Boisier, JP, et al. (2018)**. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-
 627 term observations and climate model simulations. *Elem Sci Anth*, 6: 74. DOI:
 628 <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- 629 **Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud, and F. Muñoz (2016)**. Anthropogenic and
 630 natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought
 631 in central Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2015GL067265.
- 632 **Byrne, N. J., y colaboradores ,(2019)**. Subseasonal-to-seasonal predictability of the
 633 Southern Hemisphere Eddy-driven jet during austral spring and early summer. *Journal*
 634 *of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 6841–6855.
 635 <https://doi.org/10.1029/2018JD030173>
- 636 **Byrne, N. J., y Shepherd, T. G. (2018)**. Seasonal persistence of circulation anomalies in the
 637 Southern Hemisphere stratosphere and its implications for the troposphere. *Journal of*
 638 *Climate*, 31(9), 3467–3483.
- 639 **Caballero, R., (2007)**. Role of eddies in the interannual variability of Hadley cell strength.
 640 *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22705, doi:10.1029/2007GL030971.

Artículo en edición

- 641 **Cai, W., y colaboradores, (2012)**, Rainfall reductions over Southern Hemisphere semiarid
 642 regions: the role of subtropical dry zone expansion, *Sci. Rep.*, 2, article number 702,
 643 doi:10.1038/srep00702.
- 644 **Choi, J.,y colaboradores, (2014)**. Further observational evidence of Hadley cell widening
 645 in the Southern Hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2590–2597,
 646 <https://doi.org/10.1002/2014GL059426>
- 647 **Chen, S., y colaboradores (2014)**. Regional changes in the annual mean Hadley circulation
 648 in recent decades. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 7815–7832.
 649 <https://doi.org/10.1002/2014JD021540>
- 650 **Davis, N., Birner, T. (2017)**. On the Discrepancies in Tropical Belt Expansion between
 651 Reanalyses and Climate Models and among Tropical Belt Width Metrics. *Journal of Climate*,
 652 30(4), 1211–1231. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0371.1>
- 653 **Davis, S. M., and K. H. Rosenlof, (2012)**. A multidagnostic intercomparison of tropical-
 654 width time series using reanalyses and satellite observations. *J. Clim.*, 25, 1061– 1078.
- 655 **Díaz, L.B. y Vera, C.S., (2018)**. South American precipitation changes simulated by PMIP3/
 656 CMIP5 models during the Little Ice Age and the recent global warming period. *Int. Journal.*
 657 *Climatol.* 2018; 1-13.
- 658 **Fahad, A. y colaboradores, (2020)**. How will southern hemisphere subtropical anticyclones
 659 respond to global warming? Mechanisms and seasonality in CMIP5 and CMIP6 model
 660 projections. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05290-7>
- 661 **Flores-Aqueveque, V y colaboradores, (2020)**. South Pacific Subtropical High from the
 662 late Holocene to the end of the 21st century: insights from climate proxies and general
 663 circulation models. *Clim. Past*, 16, 79–99, 2020, <https://doi.org/10.5194/cp-16-79-2020>
- 664 **Freitas, Ana Carolina y Ambrizzi, Tércio. (2015)**. Recent Changes in the Annual Mean
 665 Regional Hadley Circulation and Their Impacts on South America. *Advances in*
 666 *Meteorology*. Article ID 780205. 10.1155/2015/780205.
- 667 **Garreaud R. D. y colaboradores, (2020)**.The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A
 668 climate dynamics perspective, *International Journal*
 669 *Climate*, <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

Artículo en edición

- 670 **Garreaud, RD. y colaboradores (2017)**. The 2010–2015 megadrought in central Chile:
 671 Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol Earth Syst Sci* 21(12): 6307–6327.
 672 DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- 673 **Garreaud, R, Lopez, P, Minvielle, M and Rojas, M. (2013)**. Large-Scale Control on the
 674 Patagonian Climate. *J Climate* 26(1): 215–230. DOI: [https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1)
 675 00001.1
- 676 **Grise, K. M. y Davis, S. M., (2020)**. Hadley cell expansion in CMIP6 models, *Atmos. Chem.*
 677 *Phys.*, 20, 5249–5268, <https://doi.org/10.5194/acp-20-5249-2020>.
- 678 **Grise, K. M., y colaboradores, (2019)**. Recent tropical expansion: Natural variability or
 679 forced response? *J. Climate*, 32, 1551–1571, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0444.1>.
- 680 **Grise, K. M., y colaboradores (2018)**. Regional and seasonal characteristics of the recent
 681 expansion of the tropics, *J. Climate*, 31, 6839–6856, [https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0060.1)
 682 0060.1
- 683 **Grise, K. M. y Polvani, L. M, (2016)**. Is climate sensitivity related to dy-namical
 684 sensitivity?, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121, 5159–
 685 5176, <https://doi.org/10.1002/2015JD024687>
- 686 **IPCC, (2021)**. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working*
 687 *Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
 688 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y.
 689 Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K.
 690 Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University
 691 Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press,
 692 doi:10.1017/9781009157896.
- 693 **Kang, S y Polvani. L, (2011)**. The Interannual Relationship between the Latitude of the
 694 Eddy-Driven Jet and the Edge of the Hadley Cell, *Journal of Climate*, VOLUME 24, DOI:
 695 10.1175/2010JCLI4077.1
- 696 **Kendall, M. G., (1975)**. *Rank Correlation Methods*, Griffin, London.
- 697 **Lucas, C., y colaboradores, (2014)**. The expanding tropics: a critical assessment of the
 698 observational an modeling studies. *WIREs Clim Change* 5: 89-112.

Artículo en edición

- 699 **Lucas, C., y Nguyen, H., (2015).** Regional characteristics of tropical expansion and the role
700 of climate variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(14), 6809– 6824.
701 <https://doi.org/10.1002/2015JD023130>
- 702 **Mann, H. B., (1945).** 'Nonparametric tests against trend', *Econometrica* 13, 245-259.
- 703 **Mantua, NJ, Hare, SR, Zhang, Y, Wallace, JM y Francis, RC, (1997).** A Pacific
704 Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull Amer Meteor Soc*
705 78(6): 1069–1079. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
706 [0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
- 707 **Manney, G. L., y Hegglin, M. I. (2018).** Seasonal and regional variations of long-term
708 changes in upper-tropospheric jets from reanalyses. *Journal of Climate*, 31(1), 423–448.
- 709 **Montecinos, A and Aceituno, P. (2003).** Seasonality of the ENSO-Related Rainfall
710 Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *J Climate* 16(2): 281–
711 296. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2)
- 712 **Morales M.S., y colaboradores, (2020).** Six hundred years of South American tree rings
713 reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. *PNAS*, July 21,
714 2020, vol. 117 | no. 29, 16817
- 715 **Nguyen y colaboradores, (2017).** Variability of the extent of the Hadley circulation in the
716 southern hemisphere: a regional perspective. *Clim Dyn*, DOI 10.1007/s00382-017-3592-2
- 717 **Rivas, M. B., y A. Stoffelen, (2019).** Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind
718 biases using ASCAT. *Ocean Sci.*, 15, 831–852, <https://doi.org/10.5194/os-15-831-2019>.
- 719 **Reboita, M. y colaboradores (2019).** The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present
720 and Future Climate. *Front. Earth Sci.* 7:8. doi: 10.3389/feart.2019.00008
- 721 **Rutllant, J y Fuenzalida, H. (1991).** Synoptic aspects of the central chile rainfall variability
722 associated with the southern oscillation. *Int J Climatol* 11(1): 63–76. DOI:
723 <https://doi.org/10.1002/joc.3370110105>
- 724 **Saurral y colaboradores, (2017).** Low-frequency variability and trends in centennial
725 precipitation stations in southern South America. *Int. J. Climatol.* 37: 1774–1793, DOI:
726 10.1002/joc.4810
- 727 **Solomon, A., y colaboradores (2016).** Contrasting upper and lower atmospheric metrics of

Artículo en edición

- 728 tropical expansion in the Southern Hemisphere, *Geophys. Res.Lett.*,43, 10,496–
 729 10,503,doi:10.1002/2016GL070917
- 730 **Souza E. B, y Ambrizzi T (2002)**. ENSO impacts on the SouthAmerican rainfall during
 731 1980s: Hadley and Walker circulation. *Atmósfera* 15: 105–120
- 732 **Schwendike, J.P. y colaboradores (2014)**. Local Partitioning of the overturning circulation
 733 in the tropics and the connection to the Hadley and Walker circulations, *J. Geophys. Res.*
 734 *Atmos.*, 119, 1322– 1339, doi:[10.1002/2013JD020742](https://doi.org/10.1002/2013JD020742).
- 735 **Staten y colaboradores, (2020)**. Tropical Widening From Global Variations to Regional
 736 Impacts, American Meteorological Society, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0047.1>
- 737 **Staten, P.W., Grise, K.M, Davis, S.M.,Karnauskas, K.B, Davis, N.A., (2019)**. Regional
 738 widening of tropical overturning: Forced change, natural variability, and recent trends,
 739 American Geophysical Union, doi: 10.1029/2018JD030100.
- 740 **Staten, P.W. y colaboradores (2018)**. Re- examining tropical expansion. *Nature Climate*
 741 *Change*, 8(9), 768-775. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0246-2>. ISBN 4155801802462,
 742 ISSN 17586798.
- 743 **Studholme, J., y S. Gulev, (2018)**. Concurrent Changes to Hadley Circulation and the
 744 Meridional Distribution of Tropical Cyclones. *J. Climate*. doi:10.1175/JCLI-D-17-0852.1
- 745 **Varma, V., y colaboradores, (2012)**. Holocene evolution of the Southern Hemisphere
 746 westerly winds in transient simulations with global climate models. *Climate of the Past* 8:
 747 391–402.
- 748 **Vera, C.S y colaboradores, (2019)**. Influence of Anthropogenically-Forced Global
 749 Warming and Natural Climate Variability in the Rainfall Changes Observed Over the South
 750 American Altiplano. *Front. Environ. Sci.*, 13 June 2019 |
 751 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00087>
- 752 **Vera, CS y Díaz, L., (2015)**. Anthropogenic influence on summer precipitation trends over
 753 South America in CMIP5 models. *International Journal of Climatology* 35(10): 3172–3177.
- 754 **Villamayor y colaboradores, (2021)**. Causes of the long-term variability of southwestern
 755 South America precipitation in the IPSL- CM6A-LR model. *Climate Dynamics*, Springer
 756 Verlag, 2021. Insu-03230914

Artículo en edición

757 **Vuille y colaboradores, (2015)**. Impact of the global warming hiatus on Andean
758 temperature, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3745–3757, doi:10.1002/2015JD023126.

759 **Vuille y colaboradores, (2000)**. Interannual climate variability in the Central Andes and its
760 relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105,
761 NO. D10, Pages 12, 460, May 27.

762 **Waugh, D. W y colaboradores (2018)**. Revisiting the relationship among metrics of tropical
763 expansion. *J. Clim.* 31, 7565–7581. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0108.1

764 **Xian, T., y colaboradores, (2021)**. Is Hadley Cell Expanding? *Atmosphere*, 12, 1699.
765 <https://doi.org/10.3390/atmos12121699>

766 **Zaplotnik y colaboradores, (2022)**. Recent Hadley Circulation Strengthening: A Trend or
767 Multidecadal Variability?, *Journal of Climate*, DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0204.1

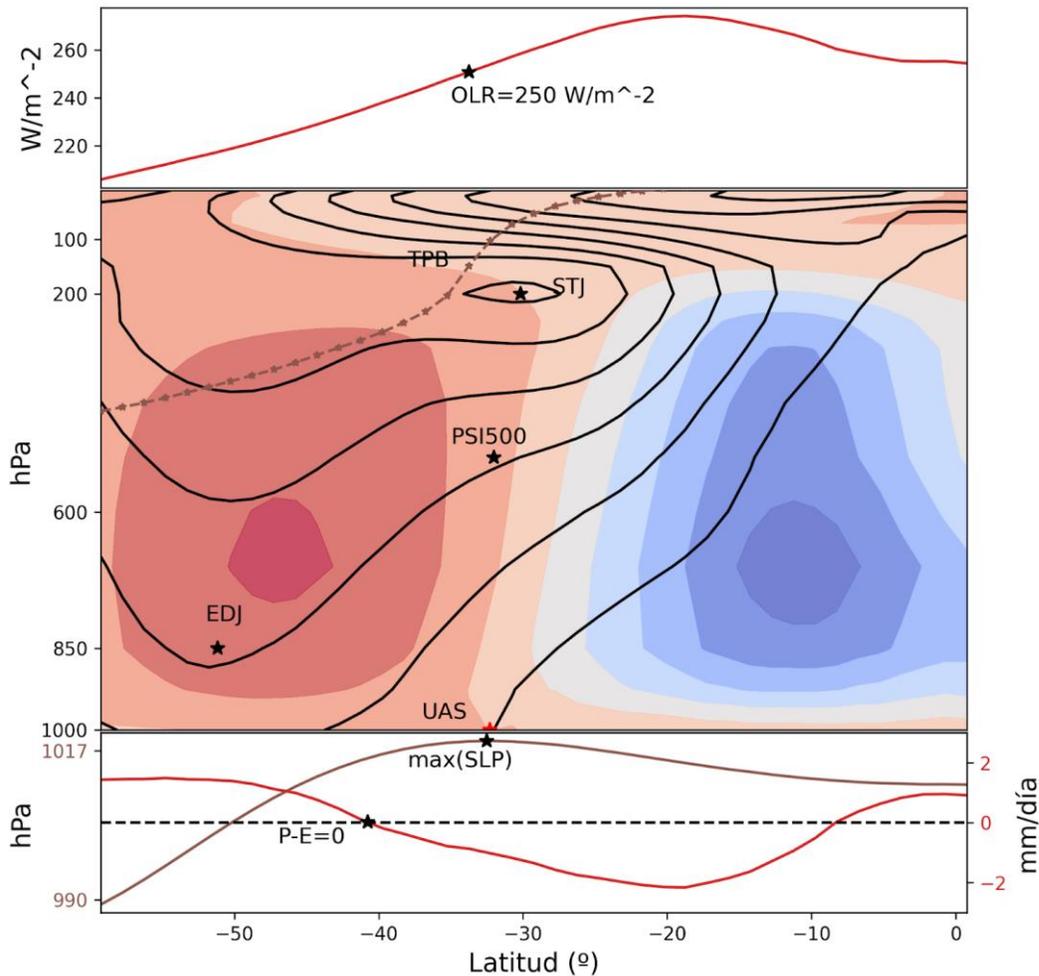
768

769

770

771

772



773
 774 *Figura 1. Representación esquemática de diferentes aspectos de la circulación de Hadley.*
 775 *Panel superior: en línea roja se observa la radiación de onda larga saliente (OLR), la*
 776 *estrella representa donde $OLR= 250Wm^{-2}$. En el panel central se representa a la Celda de*
 777 *Hadley en azul; Celda de Ferrel en rojo, altura de la tropopausa (TPB) (línea punteada en*
 778 *marrón), Corriente en chorro subtropical (STJ, representada por el máximo del viento medio*
 779 *zonal en contornos negros y asterisco), ψ_{500hPa} (PSI500 representa la posición de la rama*
 780 *de descenso de la Celda de Hadley), el flujo de remolinos turbulentos (eddy driven jet (EDJ))*
 781 *representada con estrella negra, donde cambia de signo el viento en superficie (UAS)*
 782 *representada con una estrella roja. En el panel inferior se observa el máximo de la presión*
 783 *a nivel del mar (SLP) con una estrella negra sobre la línea marrón y donde la precipitación*
 784 *menos la evaporación es igual a cero (P-E, estrella en línea roja). Adaptado de Waugh et*
 785 *al., (2018) para el Hemisferio Sur.*

786

787

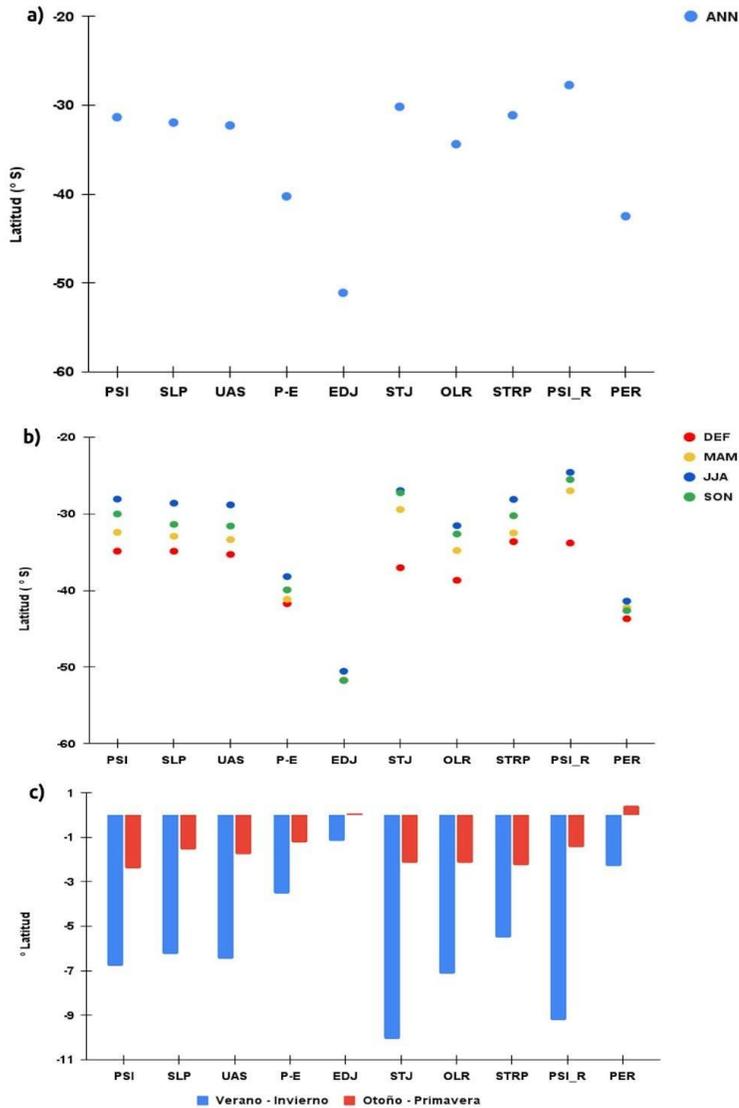
788 *Tabla I. Métricas hemisféricas y regionales seleccionadas para la evaluación de la rama*

Artículo en edición

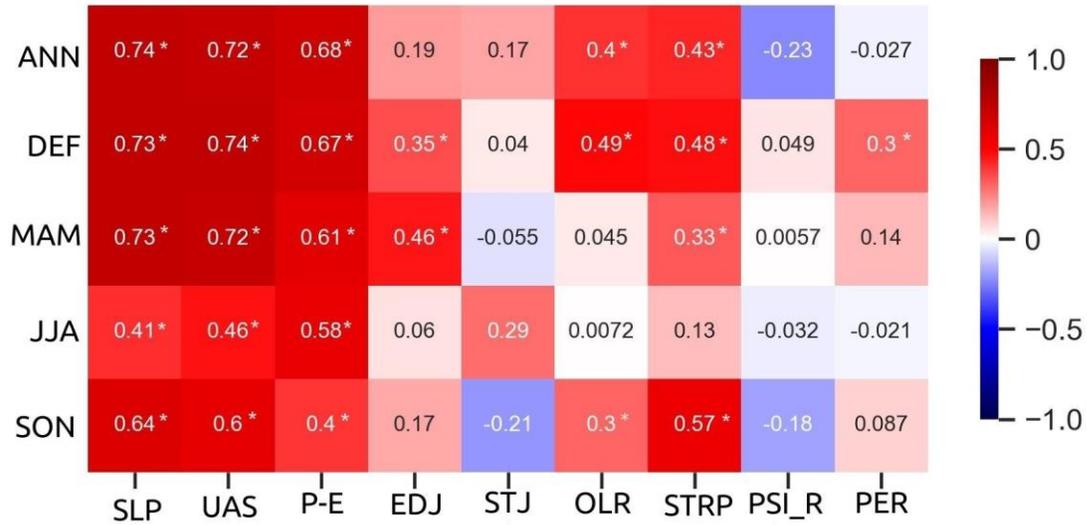
789 *de descenso de la Celda de Hadley al sudoeste de América del sur.*

Métrica	Definición	Variable	Referencia	Escala
$\psi_{500 \text{ hPa}}$	Latitud donde la función corriente del flujo de masa en 500 hPa es igual a cero	Viento meridional (V)	Gastineau et al., (2008); Lu et al., (2007)	Global
SLP	Latitud del máximo de presión a nivel del mar	Presión a nivel del mar (SLP)	Choi et al., (2014); Hu et al., (2011); Nguyen et al., (2015)	Global
UAS	Latitud donde el viento zonal en superficie cambia de signo	Viento zonal a 10 metros (U10)	Davis y Birner, (2013)	Global
P-E=0	Latitud donde la precipitación menos la evaporación es igual a cero	Precipitación (Pr) Evaporación (Er)	Lu et al., (2007)	Global
EDJ	Latitud del máximo del viento zonal medio en 850 hPa	Viento zonal en superficie (U)	Davis y Birner, (2017)	Global
STJ	Corriente en chorro subtropical	Viento zonal troposférico(U)	Archer y Caldeira, (2008)	Global
OLR	Latitud donde la radiación de onda larga saliente es igual a 250 Wm^{-2}	Radiación de Onda Larga(OLR)	Hu y Fu, (2007); Johanson y Fu, (2009)	Global
STRP	Latitud del máximo de presión a nivel del mar del Anticiclón del Pacífico Sur	Presión a nivel del mar (SLP)	Barrett y Hameed, (2016)	Regional
PSI_R	Latitud donde la función corriente del flujo de masa en 500 hPa es igual a cero promediado zonalmente en 110° W - 50° W	Viento meridional (V)	Vera et al., (2019)	Regional
PER	Precipitación menos la evaporación es igual a cero entre los 110° W - 50° W	Precipitación (Pr) Evaporación (Er)	Construcción propia	Regional

790



791
 792 *Figura 2. a) Posición latitudinal media anual (círculo azul) y b) estacional (DJF-círculo*
 793 *rojo; JJA-círculo azul; MAM-círculo amarillo; SON-círculo verde); c) diferencia latitudinal*
 794 *estacional de las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA 5*
 795 *para el período 1979-2021.*
 796

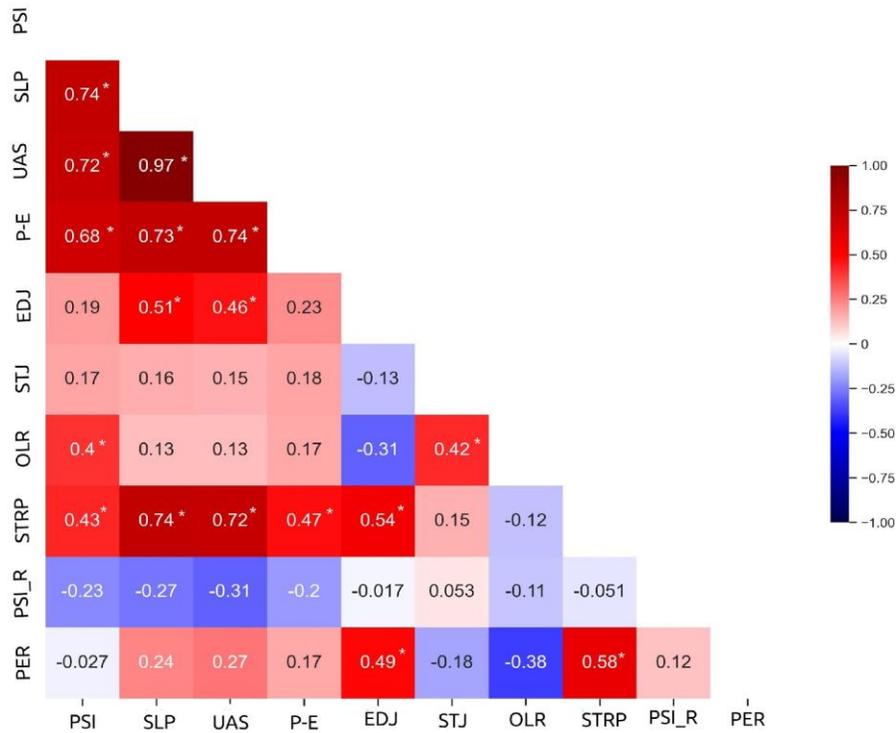


797

798

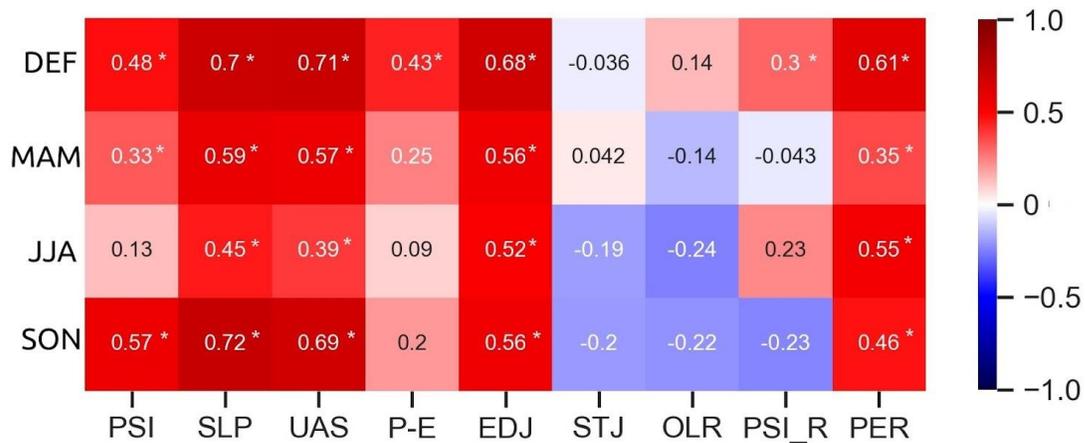
799 *Figura 3. Correlación anual y estacional entre la métrica ψ_{500hPa} y las diferentes métricas*
 800 *hemisféricas y regionales obtenidas del reanálisis ERA 5 para el período 1979-2021. El*
 801 *asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente significativa a un 95% de*
 802 *confianza.*

Artículo en edición



803

804 *Figura 4. Correlación anual entre pares de métricas del reanálisis ERA 5 para el período*
 805 *1979-2021. El asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente significativa a*
 806 *un 95% de confianza.*



807

808 *Figura 5. Correlación estacional entre la métrica regional STRP y las diferentes métricas*
 809 *hemisféricas y regionales obtenidas del reanálisis ERA 5 para el período 1979-2021. El*
 810 *asterisco simboliza donde la correlación es estadísticamente significativa a un 95% de*
 811 *confianza.*

812

813

814

815

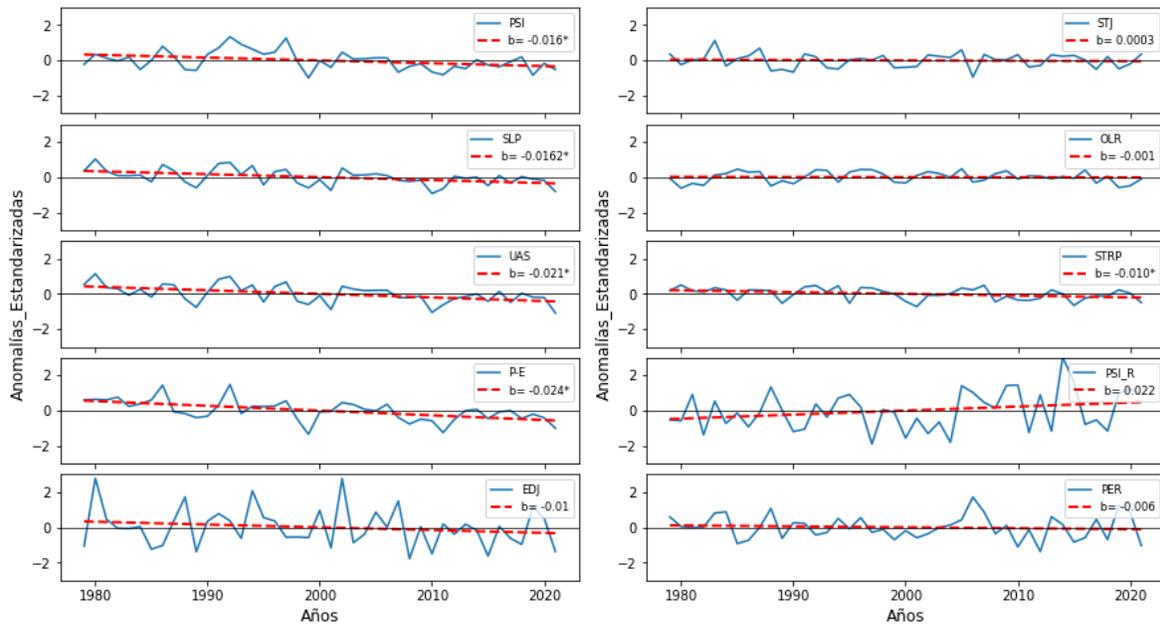
816

817

818

819

Artículo en edición



820

821 *Figura 6. Anomalías estandarizadas por normalización (línea azul) y tendencias anuales*
 822 *(línea roja discontinua) de las métricas hemisféricas y regionales obtenidas a partir del*
 823 *reanálisis ERA 5 durante el período de 1979-2021. El asterisco simboliza donde la tendencia*
 824 *anual es estadísticamente significativa a un 95% nivel de confianza.*

825

826

827

828

829

830

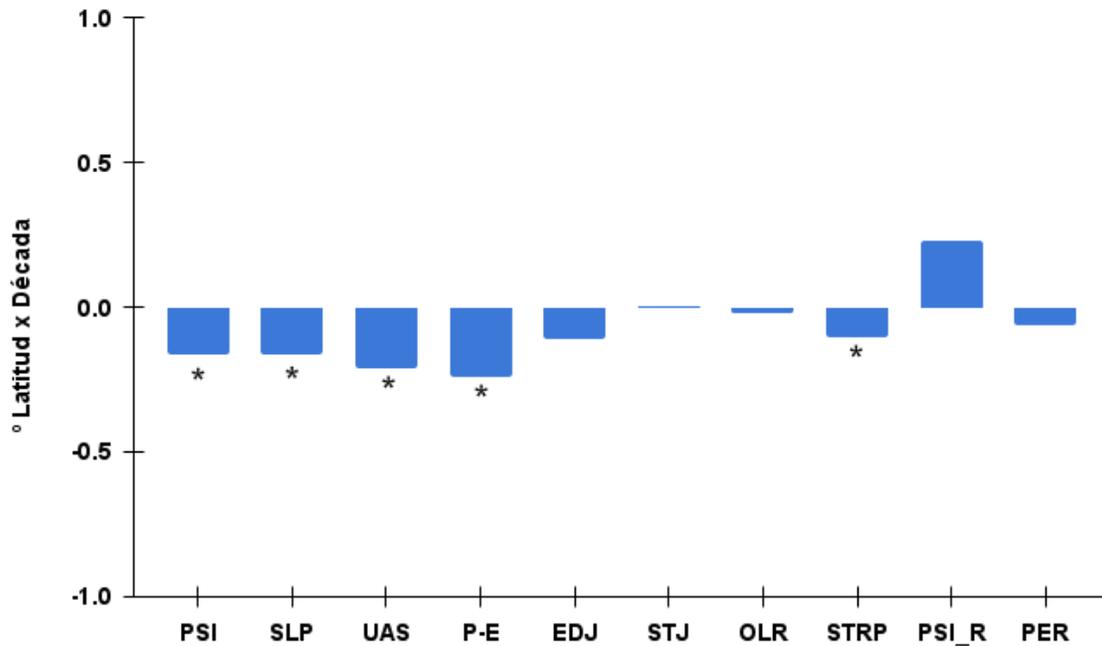
831

832

833

834

Artículo en edición



835

836

837 *Figura 7. Tendencias anuales (grados de latitud por década) de las métricas hemisféricas y*
 838 *regionales obtenidas a partir del reanálisis ERA 5 durante el período de 1979-2021. El*
 839 *asterisco simboliza donde la tendencia anual por década es estadísticamente significativa a*
 840 *un 95% nivel de confianza*

841

842

843

844

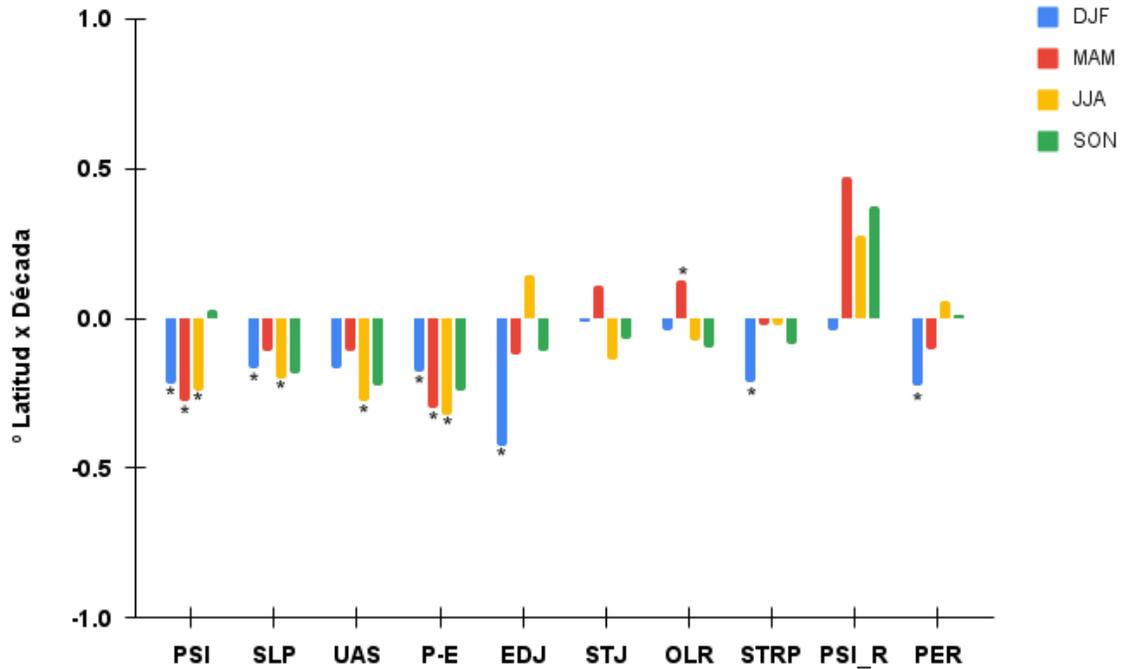
845

846

847

848

849



850

851 *Figura 8. Tendencias estacionales por década de la rama de descenso de la Celda de Hadley*
 852 *durante el período de 1979-2021. El asterisco simboliza donde la tendencia estacional por*
 853 *década es estadísticamente significativa a un 95% nivel de confianza.*