

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SUR DEL DEPARTAMENTO DE LA PAZ:
PATACAMAYA Y CALACOTO
CLIMATE-CHANGE SCENARIOS IN THE SOUTH OF LA PAZ DEPARTMENT (BOLIVIA):
PATACAMAYA AND CALACOTO

ANDRÉS W. BURGOA MARIACA
Instituto Investigaciones Físicas
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Universidad Mayor de San Andrés
La Paz – Bolivia

RESUMEN

El presente estudio está encaminado a generar una representación mensual de la cantidad diaria de precipitaciones para los escenarios futuros 2020 y 2085 en las estaciones meteorológicas de Patacamaya y Calacoto. Para tal efecto se hizo uso del análisis de componentes principales en el dominio de la frecuencia y de la regionalización estadística. Tanto en Patacamaya como en Calacoto, los escenarios futuros reproducen bastante bien el patrón de la precipitación mensual en lo que respecta a la distribución intranual. Sin embargo, a nivel estacional, se observa en Patacamaya, para el verano austral, una virtual disminución en la cantidad de precipitación, mientras que en el invierno austral no se observa cambios significativos. En Calacoto, los escenarios futuros no muestran cambios significativos en la cantidad de precipitación tanto a nivel mensual como estacional.

Descriptores: cambio climático — Bolivia

Código(s) PACS: 92.70.-j, 93.30.Jg

ABSTRACT

This study sets out to generate a monthly representation of the pluvial precipitation for the future scenarios of 2020 and 2085 using data from the meteorological stations of Patacamaya and Calacoto. We analyzed the principal frequency components and statistical regionalization. In both stations our future scenarios reproduce fairly well the pattern of monthly precipitation with respect to its intra-annual distribution. However, taking into account seasonal differences, we observed in Patacamaya a virtual decrease in precipitation for the austral summer while during winter there was no significant change. In Calacoto, future scenarios did not show significant changes in precipitation for both monthly and season time periods.

Subject headings: climate change — Bolivia

1. INTRODUCCIÓN

Para fines del presente estudio, los escenarios climáticos SRES A2 y SRES B2 son los empleados y representan tanto los niveles medio-alto y medio-bajo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Así, el escenario A2 supone un mundo muy heterogéneo, preservación de las identidades locales, alta tasa de crecimiento poblacional, desarrollo económico regional, desarrollo económico más lento que en otras regiones y provocaría una degradación de la calidad del aire en gran parte del planeta, al aumentar los niveles de la concentración de fondo de O₃; mientras que el escenario SRES B2 se centra en el sostenimiento medio ambiental, es decir, un mundo con énfasis en las soluciones locales, un au-

mento continuo de la población menor que en A2, niveles intermedios de desarrollo económico.

Los modelos de circulación general de la atmósfera (GCMs, en inglés) son una herramienta para la investigación del clima y sus fluctuaciones. Un modelo de circulación general (MCG) es una representación espacial y temporal aproximada de los principales procesos físicos que ocurren en la atmósfera y sus interacciones con los demás componentes del medio ambiente. De su resolución se obtiene la evolución temporal y espacial (tridimensional) del sistema climático en función de las condiciones iniciales y de contorno elegidas y de los valores de ciertos parámetros climáticos (por ejemplo, la concentración de CO₂ atmosférico). Lo anterior se denomina experimento numérico, simulación climática o experi-

TABLA 1

SE MUESTRA DE ARRIBA HACIA ABAJO LA ESTADÍSTICA BÁSICA DE LA CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN DIARIA EN PATACAMAYA Y CALACOTO.

No. de observaciones	Media	Varianza	Min.	Máx.
14975	1, 1	10, 7	0, 0	41, 3
No. de observaciones	Media	Varianza	Min.	Máx.
11307	1, 1	11, 2	0, 0	46, 5

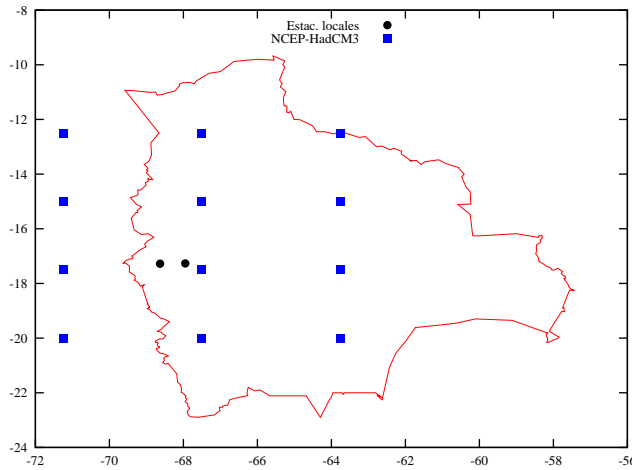


FIG. 1.— Se muestra en cuadros los puntos de grilla del NCEP Reanálisis y el HadCM3 en círculos negros para las estaciones meteorológicas de Patacamaya y Calacoto.

mento climático y puede orientarse tanto a la descripción del clima contemporáneo (experimentos de control), como a la investigación del clima resultante de uno o más cambios en los parámetros climáticos. Sin embargo, los MCGs no pueden reproducir hasta el momento los detalles de las condiciones climáticas regionales tanto a escala temporal como espacial. Por lo tanto, las salidas de los MCGs poseen -se dice- resolución gruesa (generalmente mayores a los $2, 0^{\circ}$ tanto en latitud como en longitud) para el estudio del impacto del cambio climático sobre una determinada región. Consecuentemente, existe una gran necesidad de desarrollar herramientas para regionalizar las predicciones que generan los MCGs sobre el cambio climático a escalas regionales, locales o de una estación en particular.

Actualmente existen dos grandes categorías de regionalización (Wilby y otros, 2002b): las técnicas de regionalización dinámica, basadas en la extracción de la información a escala regional de los datos a gran escala (GCM) que están apoyados en el modelado de los procesos dinámicos del clima regional y los procedimientos de regionalización estadística (o empírica) que son relaciones empíricas entre las variables atmosféricas de gran escala y los parámetros ambientales observados en superficie. La experiencia en otras latitudes ha demostrado que los métodos empleados en la regionalización estadística ofrece varias ventajas prácticas sobre los dinámicos, en especial por su flexibilidad y adaptación a objetivos específicos de un determinado estudio.

TABLA 2

SE MUESTRA LA LISTA DE VARIABLES ATMOSFÉRICAS PARA LOS DATOS DEL NCEP REANÁLISIS.

Variable	Niveles de Medición	
Presión a nivel del mar		
Intensidad del flujo de aire	Superficie	
Velocidad zonal	Superficie	
velocidad meridional	Superficie	
Vorticidad	Superficie	
Dirección del viento	Superficie	
Divergencia	Superficie	
Intensidad del flujo de aire	850 hPa	500 hPa
Viento zonal	850 hPa	500 hPa
Viento meridional	850 hPa	500 hPa
Vorticidad	850 hPa	500 hPa
Altura geopotencial	850 hPa	500 hPa
Dirección del viento	850 hPa	500 hPa
Divergencia	850 hPa	500 hPa
Humedad relativa	850 hPa	500 hPa
Humedad específica	Superficie	
Humedad relativa	Superficie	
Temperatura media	2 [m]	

2. CASO DE ESTUDIO

Las estaciones meteorológicas de Patacamaya ($-17, 23S$; $-67, 92W$; $3807m.s.n.m.$) y de Calacoto ($-17, 24S$; $-68, 76W$; $3822m.s.n.m.$) se encuentran ubicadas a $100 [km]$ y $125 [km]$ de la ciudad sede de gobierno, entre ambas estaciones existe aproximadamente $100 [km]$, el clima en ambas poblaciones es muy cambiante, en la época de verano se tiene un calor seco con un invierno indolente. La Tabla 1 nos proporciona la estadística básica de las precipitaciones a nivel diario en las mencionadas estaciones. Se eligieron 12 puntos de grilla para el presente estudio, estas comprenden los datos de NCEP Reanálisis y los escenarios de clima futuro (HadCM3), tal como se ilustra en la Figura 1. Las secciones 4 y 5 ejemplifican la metodología seguida.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

Dos son las series de datos utilizados: los datos provenientes de estaciones meteorológicas y los datos de NCEP Reanálisis. Además se incluye un escenario de clima futuro (HadCM3) con dos escenarios de emisión de CO_2 disponibles, SRES A2 y SRES B2. Los datos locales incluyen precipitación diaria para el período 1961-2001 y 1970-2000; registrados en las estaciones de Patacamaya y Calacoto. Los datos de NCEP Reanálisis cubren el mismo período que los datos locales y los escenarios SRES A2 y SRES B2 poseen una data de 1961-2099.

El modelo de regionalización estadística hace uso de los datos de NCEP Reanálisis como predictores (ver Tabla 2) y los datos locales como predictandos. La serie temporal de Patacamaya (Calacoto) para el período 1961-1980 (1970-1985) es utilizado para la etapa de calibración y los restantes del 1981-2001 (1986-2000) como la validación. Las salidas estadísticas son analizadas y comparadas a la estadística de los datos observados y evaluadas para el mismo período de corrida de los modelos.

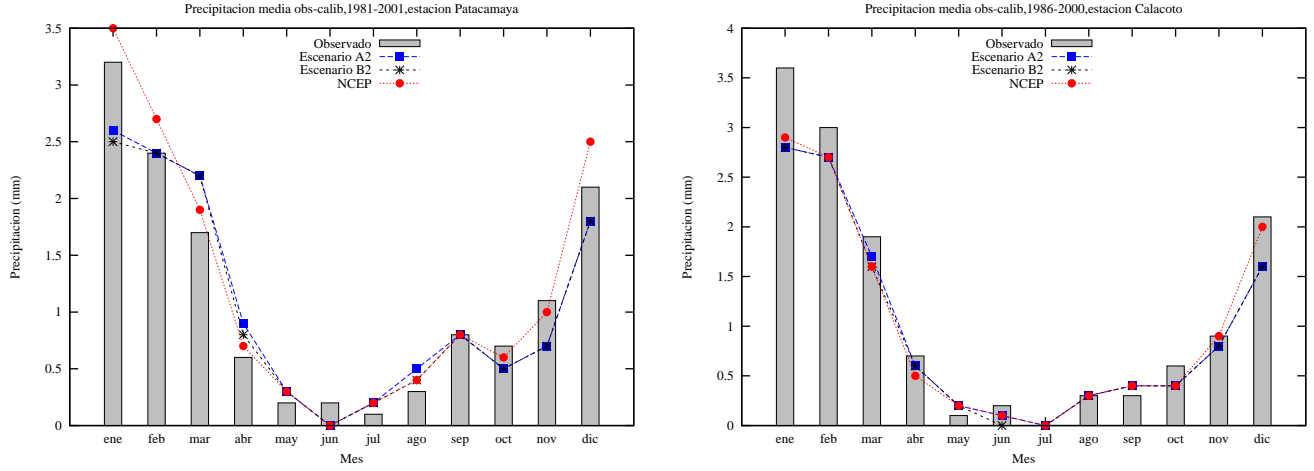


FIG. 2.— La Figura muestra de izquierda a derecha, las validaciones efectuadas a los datos observados mediante el NCEP Reanálisis y los escenarios futuros SRES A2 Y SRES B2.

4. METODOLOGÍA

4.1. Análisis de componentes principales en el dominio de la frecuencia

El análisis de componentes principales tiene como objetivo la reducción del número de variables. En tal sentido, el análisis de componentes principales transforma el conjunto de variables originales en un conjunto más pequeño de variables, las cuales son combinaciones lineales de las primeras, que contienen la mayor parte de la variabilidad conjunta presente en el conjunto inicial. Stoffer (1998), propone un refinamiento en el trabajo de Brillinger (1981) para calcular las componentes principales de $\{X(t)\}$.

En un contexto general, la filosofía de Stoffer se basa en la Cobertura Espectral. La técnica está basada en la detección de ciclos comunes en las series temporales multivariadas.

La idea es: para una frecuencia $\omega \in [0, 2\pi]$, se busca un vector complejo p-dimensional $c(\omega)$ tal que

$$\frac{c(\omega)' S_X(\omega) c(\omega)}{c(\omega)' c(\omega)}$$

sea máximo.

Se encuentra que este vector es el vector propio de $S_X(\omega)$ correspondiente al máximo valor propio, digamos $\lambda_1(\omega)$. Sea $V_1(\omega)$ este vector propio, Stoffer define

$$\begin{aligned} X_{1t}(\omega) &= [V_1(\omega)]' X_t \\ X_{1t}(\omega) &= V_1^{(1)}(\omega) X_{1t} + \dots + V_1^{(r)}(\omega) X_{rt}, \end{aligned}$$

con $V_1(\omega) = (V_1^{(1)}(\omega), \dots, V_1^{(r)}(\omega))'$, como la primera componente principal a la frecuencia ω . A la función

$$\max_{c(\omega) \neq 0} \frac{c(\omega)' S_X(\omega) c(\omega)}{c(\omega)' c(\omega)},$$

con $\omega \in [0, 2\pi]$, se denomina cobertura espectral del proceso. En las frecuencias ω donde esta función es

TABLA 3

DE IZQUIERDA A DERECHA, LAS TABLAS ILUSTRAN EL ACOPLAMIENTO ENTRE LAS VARIABLES PREDICTANDO Y LOS PREDICTORES PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE PATACAMAYA Y PARA LA DE CALACOTO.

Patacamaya	SRES A2, SRESB2
Precipitación	ζ_{850}, HR_{sup}
Calacoto	SRES A2, SRES B2
Precipitación	HE_{sup}

máxima, los ciclos asociados son compartidos por la mayoría o todas las series.

Obsérvese que

$$Var(X_{1t}) = [V_1(\omega)]' \Gamma_X(0) V_1(\omega).$$

5. REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA

5.1. Modelo de calibración

La calibración se realizó de manera independiente para los datos locales de Precipitación diaria en las estaciones de Patacamaya y Calacoto. La Tabla 3 muestra la conexión entre las variables predictando y los predictores para los escenarios futuros de cambio climático SRES A2 y SRES B2.

La Tabla 3 explica la relación entre predictores y predictando para la estación meteorológica de Patacamaya y Calacoto. El modelo explicativo para las precipitaciones diarias en las citadas estaciones es:

$$P_{Patacamaya} = P_{Patacamaya}(\zeta_{850}, HR_{sup}) \quad (1)$$

$$P_{Calacoto} = P_{Calacoto}(HE_{sup}) \quad (2)$$

5.2. Modelo de validación

A partir de la estimación de los modelos dados en las ecuaciones 1 y 2 para las estaciones meteorológicas de Patacamaya y Calacoto, se selecciono el período de validación para las estaciones locales los años 1981-2000 y 1985-2000. Los resultados pueden apreciarse en la Figura 2. Dichos períodos se los contrasto entre el NCEP Reanálisis, escenarios futuros SRES A2, SRES B2 y los datos observados para la misma época.

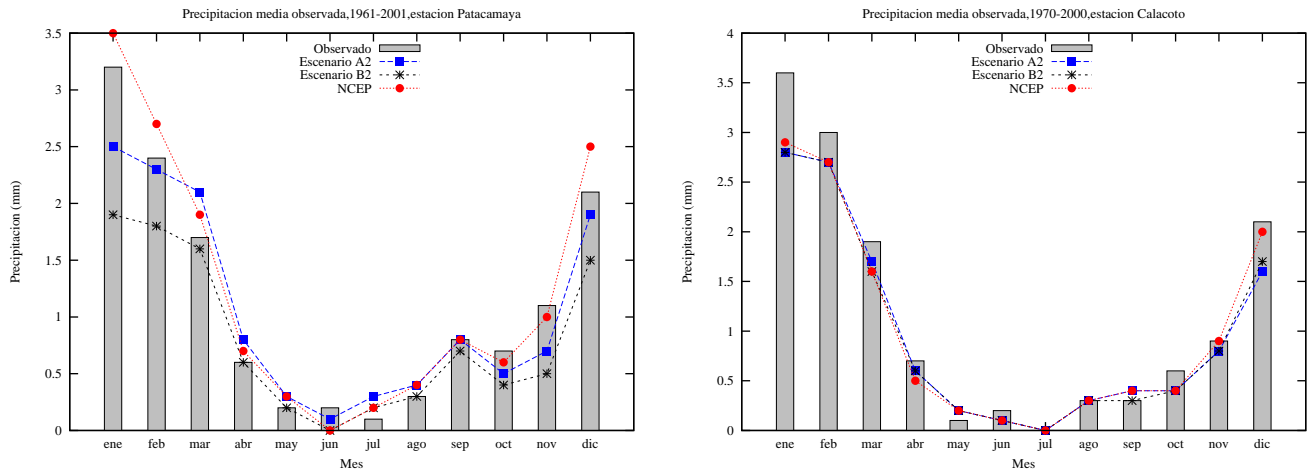


FIG. 3.— La Figura ejemplifica de izquierda a derecha, la similitud en el patrón de comportamiento mensual de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas de Patacamaya y Calacoto. En estas, tanto el NCEP Reanálisis como los escenarios de cambio futuro, subestiman los datos observados en las localidades mencionadas.

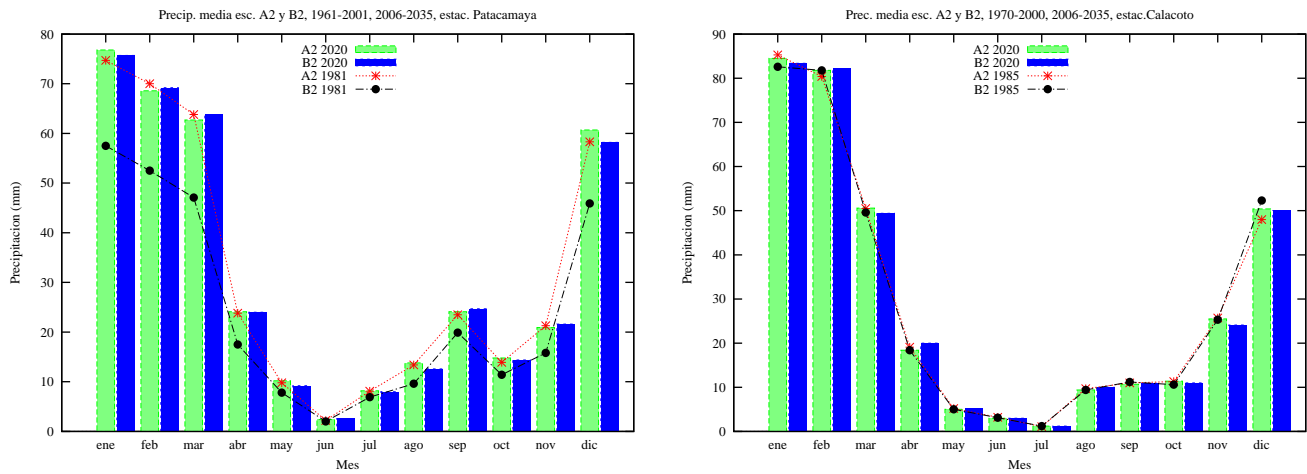


FIG. 4.— Se ilustra de izquierda a derecha la comparación de la lluvia acumulada mensual entre los escenarios SRES A2 y SRES B2 generados para el período 1961-2001 (1981), período 1970-2000 (1985) para el escenario futuro 2006-2035 (2020) en las estaciones de Patacamaya y Calacoto.

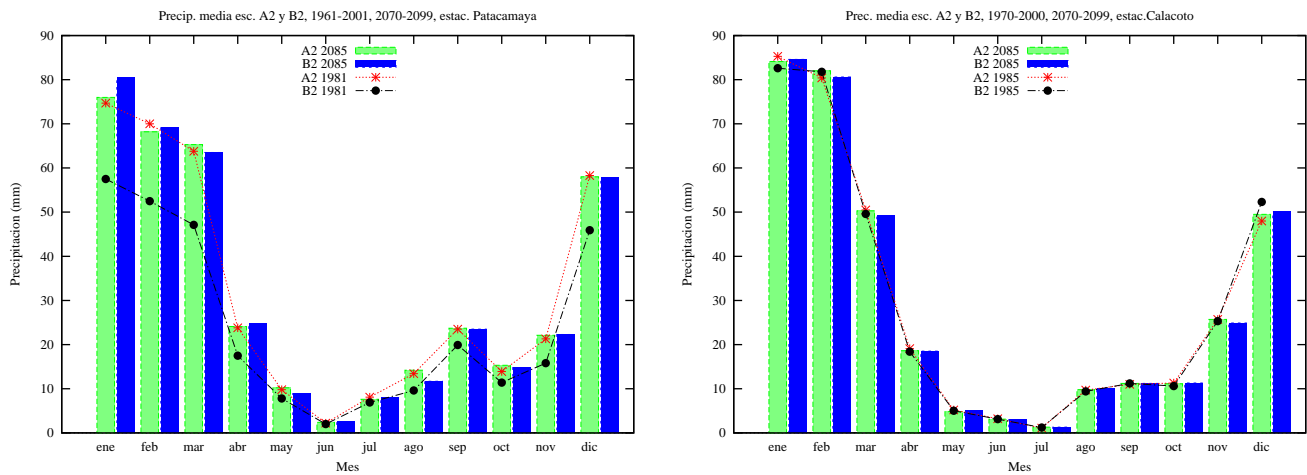


FIG. 5.— Se ilustra de izquierda a derecha la comparación de la lluvia acumulada mensual entre los escenarios SRES A2 y SRES B2 generados para el período 1961-2001 (1981), período 1970-2000 (1985) para el escenario futuro 2070-2099 (2085) en las estaciones de Patacamaya y Calacoto

6. PRECIPITACIÓN

La variabilidad interanual de la precipitación observada en las estaciones de Patacamaya y Calacoto reportan un período seco en el invierno Austral y una lluviosa en el verano correspondiente. Se observa una estructura monomodal, caracterizada por meses con ausencia de lluvias, en especial en los meses de mayo, junio y julio; mientras que en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo con meses lluviosos. Dicho comportamiento se extiende a gran parte del territorio nacional.

6.1. Comparación precipitación observada, modelo NCEP y escenarios, 1961-2000

6.1.1. Patacamaya

Los modelos de NCEP Reanálisis y de escenarios SRES A2 y SRES B2 reproducen bien el patrón de la lluvia mensual (Figura 3), en lo que se refiere a la distribución intranual, tales como: la estacionalidad (las épocas calurosas o relativamente frescas, un período frío o invernal, con descenso en las precipitaciones a partir de la llegada del otoño hasta el invierno Austral). Sin embargo, cuantitativamente tanto los resultados del NCEP Reanálisis, como los escenarios SRES A2 y SRES B2 generados para la climatología 1961-2001, subestiman los registros de la precipitación en un -5.4% en un caso y en el otro en -68% de la lluvia anual, en el caso mensual, SRES A2 sobrestima para el mes de marzo en un 2,7%. En los meses de la estación seca, especialmente en el mes de julio, esas sobrestimaciones son mayores en un 1,4% más.

6.1.2. Calacoto

Los modelos de reanálisis NCEP Reanálisis y de escenarios SRES A2 y SRES B2 reproducen bien el patrón de la lluvia mensual (Figura 3), en lo que se refiere a la distribución intranual, tales como: la estacionalidad (las épocas calurosas o relativamente frescas, un período frío o invernal, con descenso en las precipitaciones a partir de la llegada del otoño hasta el invierno Austral). Sin embargo, cuantitativamente tanto los resultados del NCEP Reanálisis, como los escenarios SRES A2 y SRES B2 generados para la climatología 1970-2000, subestiman los registros de la precipitación en un -1,8% en un caso y en el otro en -18.5% de la lluvia anual, en el caso mensual ambos escenarios sobrestiman para el mes de mayo un 0,2%. Para la estación del invierno Austral, el mes de julio no muestra cambio significativo en la cantidad de precipitación.

6.2. Análisis entre escenarios de precipitación SRES A2 y SRES B2, 1961-1990 y futuro 2020 y 2085

6.2.1. Patacamaya

La relación entre escenarios actuales y futuros para 2020 (promedio 2006-2035) se ilustra gráficamente en la figura 4, observándose que para el año 2020 no habría cambios significativos en el patrón de lluvias mensual. Sin embargo, los acumu-

TABLA 4

DE IZQUIERDA A DERECHA LAS TABLAS ILUSTRAN LA CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN Y ESCENARIOS FUTUROS SRES A2, SRES B2 PARA 2020 (2006-2035) Y 2085 (2070-2099) MENOS ESCENARIOS GENERADOS 1985 (1961-2001), ESTACIONES DE PATACAMAYA Y CALACOTO.

Precipitación media Patacamaya

Mes	Actual	Cambio climático (%)			
		2020 (2006-2035)		2085 (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Enero	98.8	-5.6	-6.0	-5.8	-4.7
Febrero	67.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Marzo	53.2	2.4	2.7	3.1	2.6
Abril	17.8	1.6	1.6	1.6	1.7
Mayo	6.2	1.0	0.7	1.0	0.6
Junio	5.3	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
Julio	3.3	1.2	1.2	1.1	1.2
Agosto	9.4	1.1	0.8	1.2	0.5
Septiembre	23.8	0.0	0.2	0.0	0.0
Octubre	21.0	-1.6	-1.7	-1.4	-1.6
Noviembre	31.8	-2.8	-2.6	-2.5	-2.4
Diciembre	65.8	-1.3	-1.9	-2.0	-2.0
Anual	403.8	-4.2	-5.1	-4.2	-4.2

Precipitación media Calacoto

Mes	Actual	Cambio climático (%)			
		2020 (2006-2035)		2085 (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Enero	112.4	-7.9	-8.2	-8.0	-7.9
Febrero	83.4	-0.6	-0.3	-0.3	-0.8
Marzo	59.4	-2.5	-2.8	-2.5	-2.9
Abril	19.9	-0.4	0.0	-0.3	-0.4
Mayo	4.1	0.2	0.3	0.1	0.2
Junio	4.9	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Julio	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Agosto	10.2	-0.2	0.0	-0.1	0.0
Septiembre	10.5	0.0	0.1	0.1	0.2
Octubre	18.0	-1.8	-1.9	-1.9	-1.9
Noviembre	26.6	-0.3	-0.7	-0.2	-0.4
Diciembre	65.2	-4.2	-4.3	-4.4	-4.3
Anual	415.7	-18.6	-18.6	-18.2	-18.8

lados totales (anuales) no disminuirían tan significativamente en la mayoría de los meses, excepto en el escenario B2 una disminución para el mes de diciembre en 0,6%, estimándose una disminución del 5,1% en la precipitación promedio anual, ver Tabla 4.

Hacia finales del presente siglo XXI (2085), los escenarios futuros y actuales siguen el mismo patrón de comportamiento mensual en las precipitaciones, excepto en el escenario SRES B2, el cual subestima la climatología 1961-2001, ver Figura 4. Sin embargo, se evidencian reducciones en la lluvia durante la primavera y verano Austral, en especial para el mes de diciembre (ver Tabla 4). Dichas reducciones alcanzan su pico en un 5,8% en el escenario SRES A2 (2085).

6.2.2. Calacoto

La relación entre escenarios actuales y futuros para 2020 (promedio 2006-2035) se muestra en la figura 5, se observa que para el año 2020 no se evidencian cambios significativos en el patrón de lluvias mensual. Los acumulados totales para las estaciones tanto del invierno como verano Austral, no muestran cambios importantes a lo largo de todo el año, es decir, tanto los escenarios futuros como los actuales muestran un mismo patrón de comportamiento en las precipitaciones, tal como se ejemplifica en la Tabla 4.

Hacia finales del presente siglo XXI (2085), los escenarios futuros y actuales siguen el mismo patrón de comportamiento mensual en las precipitaciones. Sin embargo, se evidencian para el mes de diciembre reducciones de hasta el 8,0% (ver Tabla 4) y de un 18,8% en la precipitación anual.

7. CONCLUSIONES

7.1. Patacamaya

El modelo de NCEP Reanálisis como el modelo de escenarios futuros SRESA2 y SRESB2, reproducen bastante bien la distribución intranual en lo que respecta a la estacionalidad (período de lluvias y estiaje), el verano Austral con diciembre-enero-febrero (DEF) y el invierno Austral con junio-julio-agosto (JJA), se observa una subestimación en el escenario B2 para los valores de la precipitación mensual promedio durante la época lluviosa observada, la reducción alcanza el 37% de lluvia anual y una reducción del 14% mensual para el mes de enero.

Los escenarios futuros indicarían disminuciones de la precipitación media anual hasta de un 5,1% para

2020 (B2) y para 2085 hasta un 4,2% (A2 y B2), con respecto a 1961-2001.

Los escenarios futuros SRESA2 y SRESB2 para los acumulados de la lluvia mensual, en los años 2020 y 2085, muestran el mismo patrón actual de régimen de lluvia intranual. Sin embargo, dichos escenarios muestran reducciones e incrementos en la cantidad de lluvia, las cuales serían después de 2020, de más de un 3,1% en el mes de marzo para el escenario SRESA2 para 2085 y una reducción del 4.7% en el escenario SRESB2 para 2085.

7.2. Calacoto

Tanto el modelo de reanálisis NCEP Reanálisis como los escenarios futuros SRESA2 y SRESB2, reproducen bastante bien la distribución intranual en lo que respecta a la estacionalidad (período de lluvias y estiaje). El verano Austral con los meses de diciembre-enero-febrero (DEF) y el invierno Austral con junio-julio-agosto (JJA), en estos se observan subestimaciones en los valores en la precipitación mensual promedio durante todo el año, las mayores subestimaciones se observan en los meses de diciembre y enero con reducciones del orden de un 5,0%.

Los escenarios futuros no evidencian disminuciones significativas de la precipitación media anual para ambos escenarios SRESA2 y SRESB2, con respecto a 1961-2001.

Los futuros escenarios SRESA2 y SRESB2 de los acumulados de la lluvia mensual, para los años 2020 y 2085, muestran el mismo patrón actual de régimen de lluvia intranual. En consecuencia, dichos escenarios no evidencian reducciones o incrementos en la cantidad de lluvia.

REFERENCIAS

- Bettoli, M. L. & Penalba, O. C. 2008, Downscaling daily rainfall in La Plata basin: statistical approach (UBA, Ciudad Universitaria, Argentina)
- Brillinger, D. R. 1981, Time Series: Data Analysis and Theory (Holden-Day, San Francisco)
- Cavazos, T. & Hewitson, B. C. 2005, Climate Research, 28, 95
- Johns, T. C., Carnell, R. E., Crossley, J. F., Gregory, J. M., Mitchell, J. F. B., Senior, C. A., Tett, S. F. B., & Wood, R. A. 1997, Climate Dynamics, 13, 103
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., et al. 1996, Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437
- Stoffer, D. S. 1999, J. Amer. Statist. Assoc., 94, 1341
- Wilby, R. L., Conway, D., & Jones, P. D. 2002b, Hydrological Processes, 16, 1215
- Zorita, E. & von Storch, H. 1999, Journal of Climate, 12, 2474