

## Evaluación de impactos ecohidrológicos del cambio climático en una cuenca de la región central de Venezuela

Oscar Silva<sup>1\*</sup> y Conrado Tobón<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Apdo. 4579, Maracay 2101, Aragua, Venezuela.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

### RESUMEN

Se estimaron posibles impactos del cambio climático sobre variables ecohidrológicas en la cuenca media del río Pao (estado Cojedes, región central de Venezuela). Para ello, se empleó el modelo SWAT con información de clima histórico (1976-1992) y 50 años ajustados futuro (2026-2042) para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5. La información climática futura se estimó mediante los modelos climáticos globales Mohc-Hadgem2-CC y Mohc-Hadgem2-ES, a partir de los registros diarios de precipitación de seis estaciones y una de temperatura ajustados alto térmicamente. Se consideró la variación de concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico. La temperatura presentó incrementos aproximados de 2,1 °C en RCP 4.5 y 2,5 °C en RCP 8.5, con mayor variación de la temperatura mínima. La evapotranspiración potencial incrementó entre 8,1 y 9,9%. La precipitación presentó tendencias contradictorias según el modelo de climático global. Con Mohc-Hadgem2-CC la precipitación disminuyó (-13,6%) en RCP 4.5 y aumentó (10,5%) en RCP 8.5. Con Mohc-Hadgem22-ES casi no varió (0,6%) en RCP 4.5 y disminuyó (-11%) en RCP 8.5. Consecuentemente, el rendimiento de agua, escorrentía superficial y la precipitación excedente disminuyeron en todos los escenarios (-4 y -40%), excepto en la combinación RCP 8.5-Hadgem22-CC, donde estas variables aumentaron de valor (entre 15 y 36%) debido al incremento de precipitación estimado. En cuanto a rendimiento de agua, escorrentía superficial, flujo base y el exceso de precipitación se obtuvo que: a) cambios en la precipitación se corresponderán con cambios mayores en el mismo sentido, y b) en casos en que la precipitación varíe poco, estas variables disminuirán por el efecto de la mayor ETP. Se concluye que dada la posible disminución de la precipitación, y del consistente incremento de la temperatura y ETP, puede esperarse que estos flujos disminuyan por efecto del cambio climático. Con el fin de establecer escenarios representativos del grado y sentido del impacto del cambio climático, se hace recomendable la exploración de resultados climáticos globales diversos.

**Palabras clave:** Escorrentía superficial, evapotranspiración, flujo base, rendimiento de agua, río Pao, trayectorias representativas de concentración.

---

\*Autor de correspondencia: Oscar Silva

E-mail: oscarsilvae@gmail.com

## Evaluation of ecohydrological impacts of climate change in a river basin in the central region of Venezuela

### ABSTRACT

Possible impacts of climate change on ecohydrological variables in the middle Pao river basin (Cojedes state, central region of Venezuela) were estimated. For this, the SWAT model was used with historical climate information (1976 -1992) and 50 years adjusted future (2026-2042) for the RCP 4.5 and 8.5 climate change scenarios. Future climate information was estimated using the global climate models Mohc-Hadgem2-CC and Mohc-Hadgem2-ES, from the daily records of precipitation from six stations and one of temperature adjusted high thermally. The variation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration was considered. The temperature presented approximate increases of 2.1 °C in RCP 4.5 and 2.5 °C in RCP 8.5, with a greater variation of the minimum temperature. Potential evapotranspiration increased between 8.1 and 9.9%. Precipitation presented contradictory trends according to the global climate model. With Mohc-Hadgem2-CC precipitation decreased (-13.6%) in RCP 4.5 and increased (10.5%) in RCP 8.5. With Mohc-Hadgem22-ES it almost did not vary (0.6%) in RCP 4.5 and decreased (-11%) in RCP 8.5. Consequently, water yield, surface runoff and excess precipitation decreased in all scenarios (-4 and -40%), except in the RCP 8.5-Hadgem22-CC combination, where these variables increased in value (between 15 and 36%) due to the estimated increase in precipitation. In terms of water yield, surface runoff, base flow and excess precipitation, it was obtained that: a) changes in precipitation will correspond to greater changes in the same direction, and b) in cases where precipitation varies little, these variables will decrease due to the effect of the higher ETP. It is concluded that given the possible decrease in precipitation, and the consistent increase in temperature and ETP, these flows can be expected to decrease due to climate change. In order to establish representative scenarios of the degree and direction of the impact of climate change, the exploration of diverse global climatic results is recommended.

**Key words:** Surface runoff, evapotranspiration, base flow, water yield, Pao River, representative concentration trajectories.

### INTRODUCCIÓN

El rendimiento y la regulación de agua en cuencas hidrográficas son procesos ecosistémicos de gran valor para comunidades humanas y ecosistemas. Diversas experiencias señalan al cambio climático como una amenaza a la capacidad de rendimiento de agua de las cuencas hidrográficas. Se señala que en la medida en que avanza el cambio climático, en razón de la reducción de la precipitación, aumento de la temperatura y de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, el rendimiento de agua y otras variables ecohidrológicas, se afectarán perjudicialmente (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2014, Lu *et al.*, 2012; Stone *et al.*, 2001; Jha *et al.*, 2004; Ranesh y Thampi, 2011). En Venezuela, según estimaciones para cuencas hidrográficas del sur y centro-occidente del país, el rendimiento de agua podrá disminuir significativamente por efecto de la reducción de las precipitaciones (SCNCC, 2017).

Dado que es imposible desarrollar experimentos fácticos que contemplen cambios en los elementos climáticos en plazos largos, el empleo de modelos de simulación, al considerar relaciones recíprocas entre el ciclo hidrológico y el desarrollo de la vegetación en plazos extensos, puede ser una opción para evaluar relaciones entre el cambio climático y variables ecohidrológicas.

En general, el uso de modelos de simulación en la evaluación del impacto ecohidrológico del cambio climático se basa en: a) definición de escenarios futuros, y estimación de información climática asociada a ellos, y b) empleo de esa información en un modelo de simulación. Los escenarios futuros pueden plantearse de manera arbitraria (por ejemplo, el doble de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y ciertas tasas de cambio en la precipitación y la temperatura) o basarse en modelos climáticos globales. En tal caso, se emplean Modelos Climáticos Globales regionalizados,

en escenarios de tiempo (períodos futuros) y de concentración de gases de efecto invernadero (por ejemplo, las llamadas Trayectorias Representativas de Concentración – RCP<sup>1</sup>). Con ello, se obtiene la información climática ajustada a futuro (en específico, los cambios de magnitud de temperatura y precipitación) (Stone *et al.*, 2001; Duku *et al.*, 2018; Jha *et al.*, 2004; Ranesh y Thampi, 2011).

En este trabajo, mediante el empleo de escenarios de cambio climático obtenidos de dos Modelos de Circulación General para dos RCP, y el modelo de simulación de procesos de cuencas hidrográficas SWAT, se caracteriza y cuantifican posibles impactos del cambio climático sobre las variables ecohidrológicas en una cuenca estratégica de la Región Central de Venezuela.

Con ello, se espera contribuir al conocimiento conducente a establecer directrices para la evaluación del impacto conjunto del cambio climático y del uso de la tierra sobre el rendimiento de agua de cuencas hidrográficas subhúmedas, en especial de Zona de Vida de Bosque Seco Tropical y Premontano en Venezuela.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio fue la cuenca media del río Pao (estado Cojedes, región central de Venezuela), estratégica por surtir de agua a una numerosa población de los estados Aragua y Carabobo. Tiene una superficie de 1 529 km<sup>2</sup>, alrededor de las coordenadas 9,758 °N y 68,025 °O, con altitudes entre 200 y 1 300 m. El clima corresponde a la Zona de Vida de Bosque Seco Tropical, de tipo subhúmedo (precipitación del 300 a 1 500 mm año<sup>-1</sup> distribuidos estacionalmente, temperatura media de 24 a 26 °C, evapotranspiración potencial de 1 675 a 1 845 mm año<sup>-1</sup>). El relieve es de montañas bajas, colinas y valles aluviales. El uso de la tierra es de bosques secos claros, matorrales, herbazales y una fracción menor de tipos agrícolas mecanizados y de subsistencia (MARN, 1989; MARN-IGNSB, 2003; Guillén y Silva, 2003; Estrada y García, 1997).

Los posibles impactos del cambio climático sobre las variables ecohidrológicas rendimiento de agua, escorrentía superficial, flujo base, evapotranspiración potencial<sup>2</sup>(ETP) y ocurrida<sup>3</sup> (ET), y precipitación excedente (PE<sub>x</sub>)<sup>4</sup> se simuló con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2011).

SWAT, dentro de un marco físico y conceptual, describe las relaciones o interacciones entre los factores o elementos del sistema ecohidrológico de manera más física o más empírica, según el conocimiento disponible. Opera de manera continua a lo largo de una serie de registros climatológicos y permite desagregar la cuenca en unidades relativamente homogéneas en cuanto a suelos, vegetación, uso y manejo de la tierra. La demanda y consumo de agua por parte de la vegetación (además del desarrollo de ésta), es sensible a las variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, lo cual es relevante en estudios de cambio climático. En Venezuela se cuentan diversas evaluaciones del modelo que califican como adecuado su funcionamiento (Carmona, 2007; Silva, 2004, 2009, 2010; MINEA-PDVSA, 2017; Barrios y Urribarri, 2010).

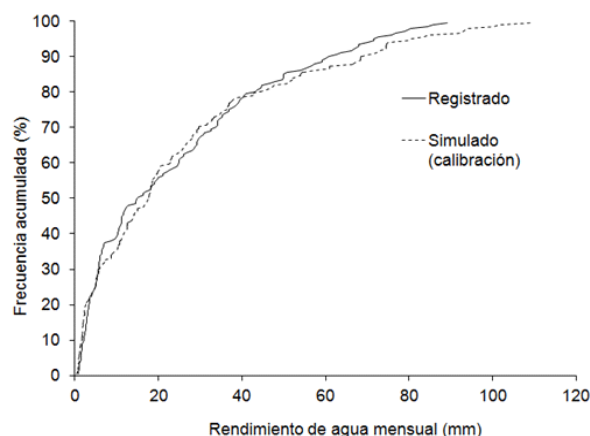
El modelo SWAT se empleó con calibración y validación previa (Silva 2009, 2010). Ante la falta de concordancia temporal entre registros de precipitación (para emplear en el modelo), y de hidrometría (para emplear como referencia de ajuste), se recurrió a la comparación de la distribución de frecuencias del rendimiento de agua simulado para el período 1977 a 1991 con el registrado de 1952 a 1965. En la Figura 1 y Cuadro 1, se muestran comparativamente los resultados de estas simulaciones. Luego, se procedió a una validación más exigente, mediante la comparación

<sup>2</sup> Aunque se emplea la ecuación de Penman – Monteith, que estima la “evapotranspiración de referencia”, en atención a la formulación y documentación del modelo SWAT, se emplea la expresión “evapotranspiración potencial” como indicador de la demanda atmosférica de agua.

<sup>3</sup> Se prefiere el empleo de “evapotranspiración ocurrida” en vez de “evapotranspiración real”. Además de que “ocurrida” es más intuitivo, “real” puede ser confuso en el contexto de los métodos basados en simulación.

<sup>4</sup> PE<sub>x</sub> = P – ET. Se refiere al agua disponible para procesos ecohidrológicos una vez ocurrida la evapotranspiración.

<sup>1</sup> Del inglés Representative Concentration Pathways (RCP)



**Figura 1.** Frecuencias acumuladas del rendimiento de agua simulado (1977 a 1991) y registrado (1952 a 1965). Fase de calibración (Silva, 2009, 2010).

de 72 pares de valores simulados y registrados de rendimiento de agua mensual (de 1967 a 1983, sin 1969 por carecer de información). En el Cuadro 2, se muestran los indicadores de esta validación.

Con el modelo calibrado, se efectuaron simulaciones con las series climáticas registrada (1976-1992) y “futuras” (2026-2042) en los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5. La información climática futura se estimó mediante los Modelos Climáticos Globales Mohc-Hadgem22-CC y Mohc-Hadgem22-ES<sup>5</sup>(MOHC, 2009; disponibles y regionalizados en CGIAR, 2014) a

**Cuadro 1.** Índices de distribución de frecuencias del rendimiento de agua registrado y simulado.

Índice	Registrado	Simulado	Diferencia (mm)
Percentil 25	5,1	5,0	-0,1
Percentil 50	15,0	17,5	2,5
Percentil 75	37,0	35,6	-1,4
Promedio	23,8	25,2	1,4
Suma	4279,2	4533,0	253,8
Desviación	22,9	25,8	2,8

<sup>5</sup>Hadgem2-ES : Hadley Global Environment Model 2 - Earth System; Hadgem2-CC : Hadley Global Environment Model 2 - Carbon Cycle.

**Cuadro 2.** Índices de la evaluación de la simulación del rendimiento de agua. Fase de validación (Silva 2009, 2010).

Eficiencia de la simulación ( $EF$ )	0,97
Coefficiente de concordancia ( $d$ )	0,99
Error medio absoluto ( $EMA$ , mm)	2,58
Coefficiente de correlación ( $R$ )	0,99
$P_{(t)}R = 0$	0
Pendiente de la recta de regresión ( $B_1$ )	1,09
$P_{(t)}B_1 = 1$	0,026
Intercepto de la línea de regresión ( $B_0$ )	0,17
$P_{(t)}B_0 = 0$	0,87

partir de los registros diarios de precipitación (1976-1992) de seis estaciones y de temperatura máxima y mínima (1982-1999) de una estación ajustados altotérmicamente (MARN-SINAIHME, 2002). Se consideró la concentración de  $CO_2$  atmosférico de cada escenario (Van Vuuren *et al.*, 2011). La evapotranspiración se simuló con el Método de Penman-Monteith que provee el modelo, el cual es sensible a dicha concentración. Los valores promedio mensuales de humedad del aire y de velocidad del viento se obtuvieron mediante los sistemas de base de datos e interpolación espacial Aquastat (FAO, 2019a) y New LocClim (FAO, 2019b). En total, se simularon cinco escenarios: el correspondiente a condiciones climáticas históricas y los cuatro escenarios futuros (combinaciones de las dos RCP y los dos modelos climáticos globales).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cambios en la temperatura y en la precipitación

La temperatura resultó con incrementos promedio de 2,1 °C (0,043 °C año<sup>-1</sup>) en RCP 4.5 y 2,5 °C (0,049 °C año<sup>-1</sup>) en RCP 8.5, con mayor variación relativa de la temperatura mínima que de la máxima. La diferencia entre modelos climáticos globales fue muy pequeña, alrededor de 0,1°C. La variación de temperatura ocasionó incrementos de evapotranspiración potencial en todas las simulaciones (entre 8,1 y 9,9%).

La precipitación resultó con tendencias variables a lo largo de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según el modelo climático global empleado. Se destaca que la mayor disminución de precipitación se obtuvo en la combinación RCP 4.5 – Mohc-Hadgem22-CC (y no en RCP 8.5), y además, con el empleo de este modelo, la precipitación aumenta en RCP 8.5.

Con Mohc-Hadgem2-CC en RCP 4.5 la precipitación disminuyó 13,6% (-3,8 mm año<sup>-1</sup>) mientras que con Mohc-Hadgem 22ES se mantuvo casi sin variación (-0,6%, -0.2 mm año<sup>-1</sup>). Como se indicó, en RCP 8.5 se obtuvieron resultados totalmente opuestos entre modelos. Con Mohc-Hadgem2-CC la precipitación aumentó con respecto al período histórico (10,5%, 2,9 mm año<sup>-1</sup>), mientras que con Mohc-Hadgem22-ES disminuyó (-11%, -3,1 mm año<sup>-1</sup>).

Los cambios de temperatura y precipitación causan una variación menor en la relación ETP/P (desde 1,3 en el período de registros hasta 1,6 en el futuro). Con ello, no se causan cambios cualitativos en el tipo climático pues se mantiene en subhúmedo.

### **Impacto en las variables ecohidrológicas**

Con excepción de la evapotranspiración ocurrida, los valores promedio anuales muestran que los flujos de agua disminuirán en todos los escenarios, excepto en la combinación RCP 8.5-Hadgem22-CC, donde aumentarán en consistencia con el incremento de precipitación que ocurriría en ésta (Figura 2). Se observa que los cambios en las variables ecohidrológicas son notablemente mayores que los correspondientes cambios en precipitación. El consumo de agua por parte de la vegetación disminuyó en las combinaciones escenario-modelo climático general donde la precipitación presentó descensos. En los casos donde la precipitación se mantuvo igual o aumentó, el consumo de agua incrementó.

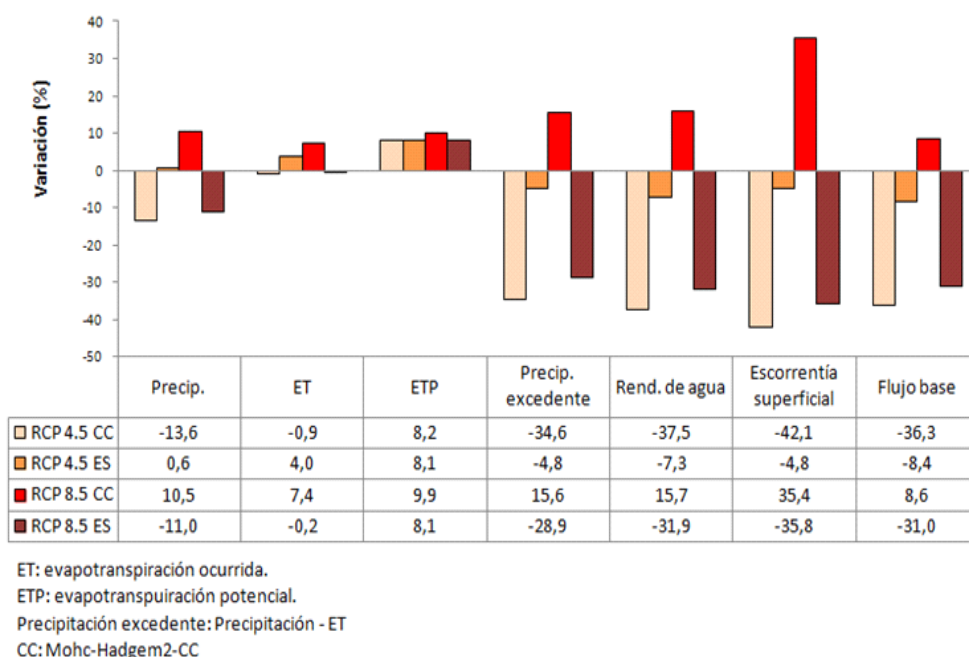
En general, según el modelo climático Mohc-Hadgem2-ES, en ambos escenarios de cambio climático, el rendimiento de agua y sus componentes (escorrentía superficial y flujo base), al igual que la precipitación excedente, disminuirían progresivamente. Obsérvese que en RCP 4.5, aunque la precipitación varía (aumenta) muy

poco, el incremento del consumo de agua (ET), a su vez, asociado al aumento de la ETP, hace que disminuyan los flujos de agua. En RCP 8.5, la mayor disminución en la precipitación, por sí sola, hace que estos flujos disminuyan.

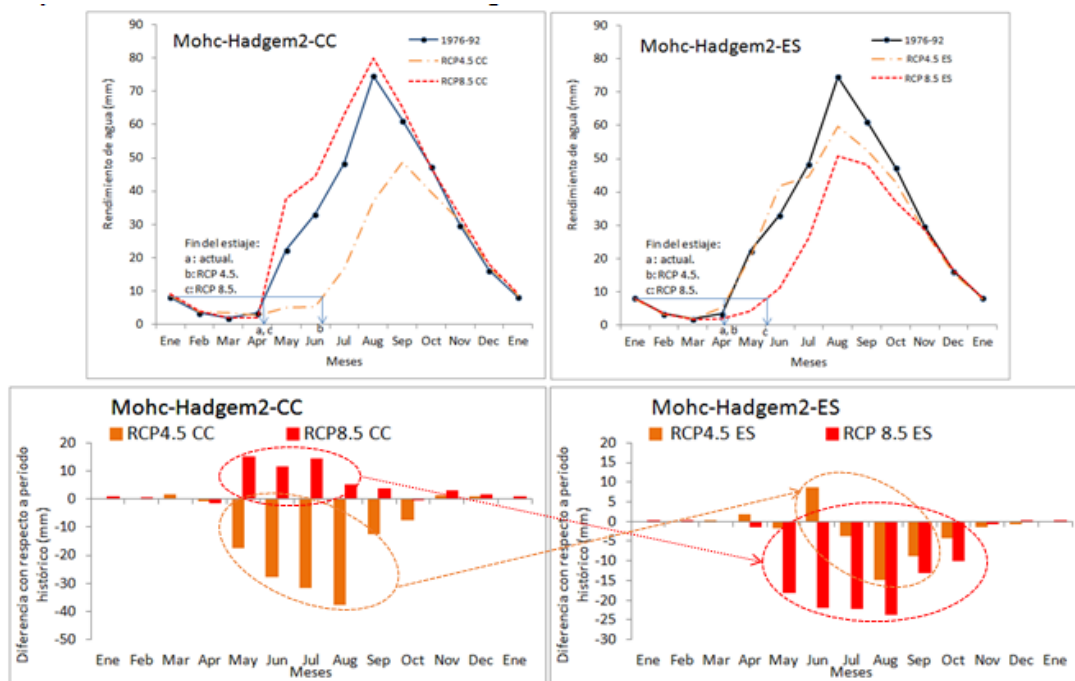
Con el modelo climático general Mohc-Hadgem2-CC, los resultados no presentaron una tendencia consistente en su variación entre los escenarios de cambio climático. La precipitación, al presentar la mayor disminución en RCP 4.5, hace que los flujos de agua disminuyan también en la mayor proporción. En contraste, en RCP 8.5, asociados con la mayor precipitación estimada por el modelo climático, los flujos de agua aumentan. Además, dada la mayor ETP, y al mismo tiempo, mayor precipitación, el consumo de agua (ET) y el excedente de precipitación también aumentan.

La estacionalidad del rendimiento de agua se afectó de manera según el modelo climático y el escenario de cambio climático. En general, se observa entre los meses de diciembre a marzo (época de estiaje o de flujo mínimo), el rendimiento de agua varía muy poco, e incluso puede presentar pequeños incrementos relativos, y que la época de estiaje se extiende entre uno y dos meses antes de dar paso a la época de incrementos relevantes en el flujo de agua en el cauce. Además, las mayores diferencias relativas se presentan al inicio de la época húmeda (entre abril y octubre). No obstante, estas variaciones no son consistentes entre las combinaciones escenario – modelo climático (Figura 3.)

Con el modelo Mohc-Hadgem2-CC, se observa que el rendimiento de agua a lo largo de los meses se afecta mucho más en RCP 4.5 que en RCP 8.5. En RCP 4.5, debido a la menor precipitación estimada, en combinación con una mayor ETP, ocurre una notable reducción entre los meses de mayo y octubre, y además, una extensión del período de estiaje de aproximadamente 1,5 meses (hasta finales de junio). En oposición, en RCP 8.5, debido a la mayor precipitación estimada, independientemente de la mayor ETP, se observa que durante casi todos los meses el rendimiento de agua es mayor, y con un patrón muy similar al del período histórico, además, el flujo en los meses de estiaje aumentó en una pequeña proporción.



**Figura 2.** Impacto sobre variables ecohidrológicas del cambio climático según los dos modelos climáticos generales en los dos escenarios de cambio climático. Variación (%) en el futuro (2026 – 2042) con respecto al período 1976 – 1992.



**Figura 3.** Variaciones en el patrón estacional del rendimiento de agua según dos modelos climáticos globales y dos escenarios de cambio climático. Valores promedio mensuales (mm) y variación (%) en el futuro (2026 – 2042) con respecto al período 1976 – 1992.

Con el modelo Mohc-Hadgem2-ES, se observa que el rendimiento de agua mensual en RCP 4.5 es similar al del período histórico, aunque con una reducción en los meses de agosto, septiembre y octubre, sin que exista una extensión apreciable del periodo de estiaje. En RCP 8.5, debido a la mayor reducción de la precipitación e incremento de la ETP, el flujo disminuye notablemente en los meses de mayo a octubre, con una prolongación del período de estiaje hasta principios de junio; en ambos escenarios, durante los meses de estiaje, el flujo puede aumentar ligeramente, lo que se atribuye a pequeños incrementos en la precipitación estimada (en esta época) por los modelos climáticos.

Aunque la distribución del rendimiento de agua mantenga un patrón estacional en todos los escenarios (actual y futuros), se observan cambios en cuanto a su fraccionamiento de flujos superficiales y subsuperficiales a lo largo del año (Figura 4). En general, se observa que en RCP 4.5, comparado con el escenario histórico (actual) la fracción de escorrentía superficial es menor desde mayo hasta agosto (durante el período de incremento del rendimiento de agua) y complementariamente, predomina el flujo base, mientras que en RCP 8.5, tiende a existir una fracción de escorrentía superficial, si no predominante, con mayor expresión que en RCP 4.5. Ello implica, que dadas las variaciones inconsistentes de precipitación entre escenarios según el modelo climático, el incremento de temperatura ocasiona cambios en los factores y procesos transpirativos de la vegetación, que a su vez afectan la infiltración y contenido de agua en el suelo, y finalmente, a la cantidad de agua disponible para escurrir superficial o sub superficialmente. Nótese al respecto, que en el escenario RCP 4.5, donde la precipitación bien sea disminuye considerablemente (con el modelo Mohc-Hadgem2-CC) o se mantenga casi igual (con el modelo Mohc-Hadgem2-ES), se reduce la fracción de escorrentía superficial. Mientras que en RCP 8.5, bien sea con incrementos en la precipitación con el modelo Mohc-Hadgem2CC) o ante una disminución de ella (con el modelo Mohc-Hadgem2-ES), la fracción de escorrentía superficial es mayor que en escenario RCP 4.5.

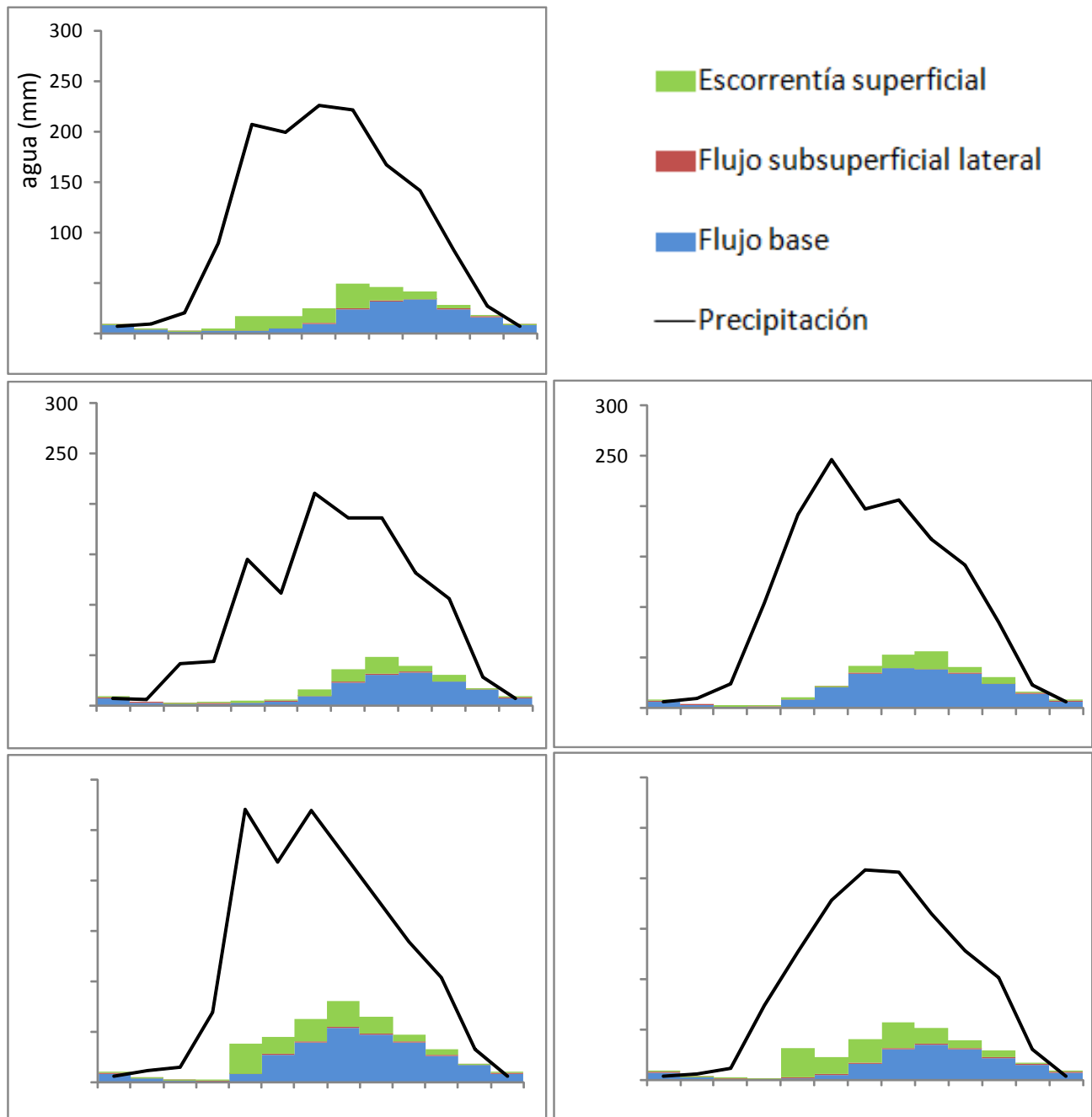
En general, la evapotranspiración potencial (ETP) incrementó a lo largo de los escenarios de

cambio climático en casi todos los meses del año. Con el modelo Mohc-Hadgem2-CC las diferencias entre RCP 4.5 y RCP 8.5 fueron notablemente mayores que con el modelo Mohc-Hadgem2-ES (Figura 5).

El incremento de la evapotranspiración potencial implica que la demanda de agua de la vegetación podrá ser mayor en el futuro, y consecuentemente, aunque se suponga que la precipitación no varíe, el rendimiento de agua y otros flujos de agua se verán disminuidos. No obstante, como en el caso del escenario RCP 8.5 según el modelo Mohc-Hadgem2-CC, el cambio en ETP es compensado, e incluso superado por un importante incremento de la precipitación. Y al contrario, como el caso de RCP 4.5 con el mismo modelo, ocurra un descenso importante en los flujos de agua en razón del incremento de la ETP y disminución de la precipitación.

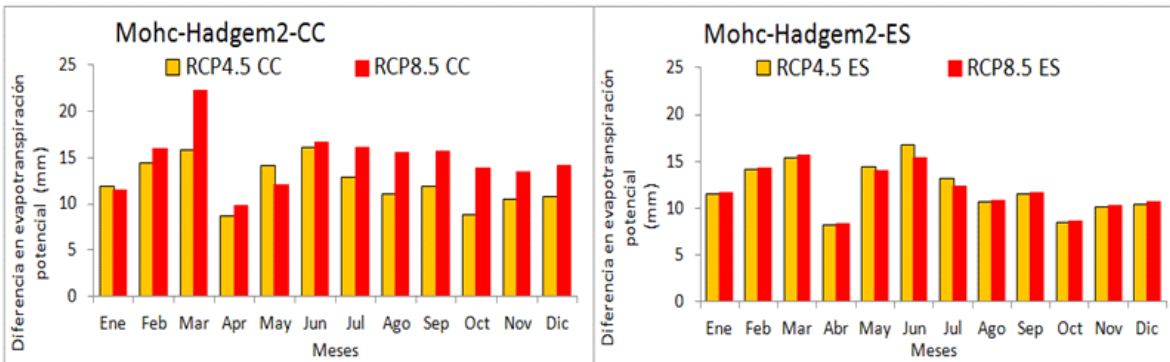
La evapotranspiración ocurrida (agua consumida por la vegetación y evaporada desde el suelo), al depender de la precipitación, presentó diferencias opuestas según el modelo climático empleado, en especial durante los meses desde marzo hasta julio (inicio hasta el máximo de lluvias) (Figura 6).

Con Mohc-Hadgem2-CC, en el escenario RCP 4.5, se observan disminuciones entre los meses de abril y julio, atribuibles a la disminución de la precipitación, mientras que en RCP 8.5, se observan incrementos a partir de mayo (y hasta finales del año), atribuibles al incremento de precipitación en este escenario, que compensan (o superan) el requerimiento de agua consecuente al incremento de evapotranspiración potencial. Con Mohc-Hadgem2-ES se observa un comportamiento a la inversa: en RCP 4.5, entre marzo y julio, incrementa el consumo de agua, pues la precipitación, que varió en poca media, es capaz de suplir el incremento en la demanda de agua. En RCP 8.5, la disminución de la precipitación, hace que disminuya la disponibilidad de agua para ser consumida. En todas las combinaciones escenario-modelo climático, a partir del mes de julio, y hasta finales de año, el consumo de agua incrementa con respecto al escenario histórico. Ello implica, que aunque la precipitación aumente o disminuya, puede haber reservas de agua en el suelo que compense en



**Figura 4.** Promedios mensuales del rendimiento de agua y sus flujos componentes, simulados para el período histórico (1976 – 1992) y dos escenarios de cambio climático (2026 – 2042) según dos modelos climáticos globales.



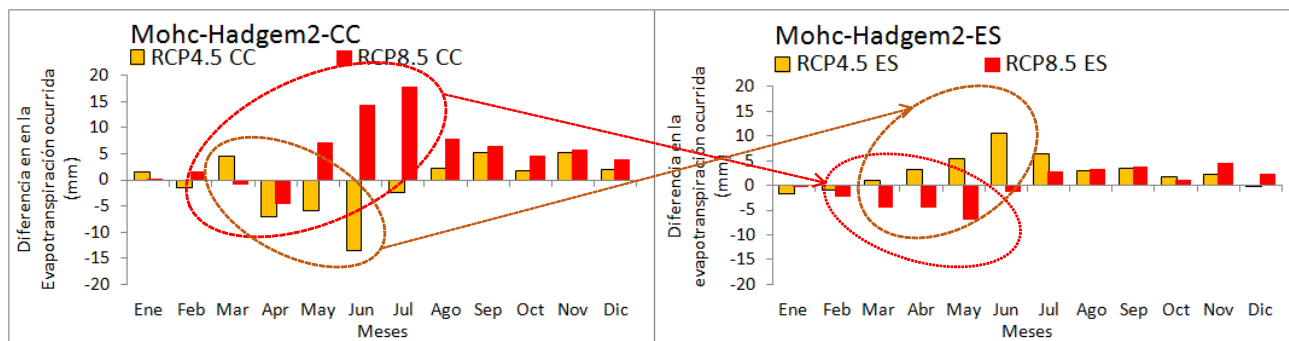


**Figura 5.** Diferencias en los promedios mensuales de evapotranspiración potencial (ETP) simuladas en dos escenarios de cambio climático según dos modelos climáticos globales para el período (2026 – 2042) con respecto al período histórico (1976 – 1992).

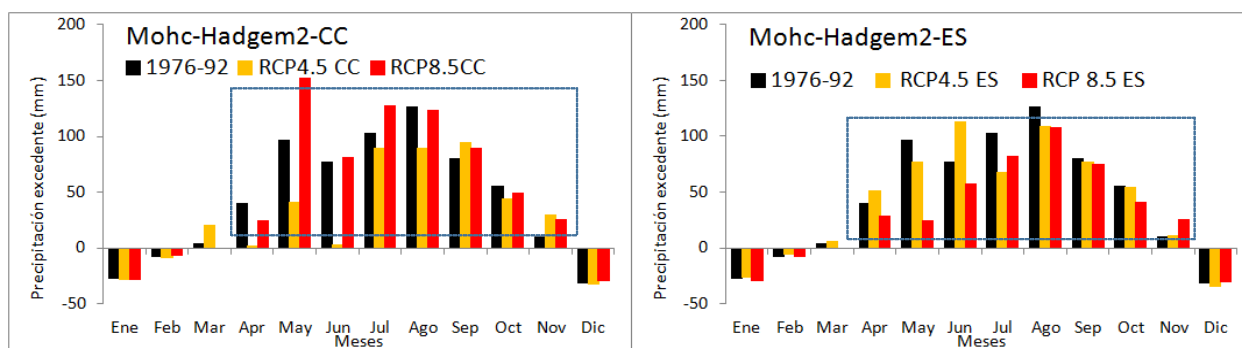
cierta medida el incremento en la demanda de agua debido los mayores valores de evapotranspiración potencial.

Los promedios mensuales de la precipitación excedente indican que el patrón de distribución estacional de esta variable es similar en todos los escenarios (Figura 7). Entre los meses de marzo y noviembre, toma valores positivos, es decir, que el agua disponible (precipitación más agua en el suelo) fue mayor que la evapotranspiración ocurrida (agua consumida por la vegetación más la evaporada desde el suelo). Ello implica, que luego de cumplir con el consumo de agua, aún resta un excedente para otras funciones ecohidrológicas. Entre diciembre y febrero, la precipitación excedente es negativa. Es decir, que para cumplir con el consumo de agua, la vegetación recurrió al almacenamiento del suelo.

En la mayoría de los meses en los que la precipitación excedente es positiva, se observa que por efecto del cambio climático en los escenarios simulados, esta variable se afectará negativamente, dado que la precipitación disminuye y la evapotranspiración potencial aumenta. Ello con excepción del escenario RCP 8.5 según el modelo Mohc-Hadgem2-CC, en el cual la precipitación aumenta y compensa el incremento de demanda de agua consecuente con la mayor evapotranspiración. En los meses de consumo de agua del suelo, el impacto del cambio climático será poco, pues indistintamente del incremento en demanda de agua, la disponibilidad en establecimiento baja, dependiente de la capacidad del suelo.



**Figura 6.** Diferencias en los promedios mensuales de evapotranspiración ocurrida (ET) simulada en dos escenarios de cambio climático según dos modelos climáticos globales para el período (2026 – 2042) con respecto al período histórico (1976 – 1992).



**Figura 7.** Promedios mensuales de precipitación excedente simulada en el escenario histórico (1976 – 1992) y dos escenarios de cambio climático según dos modelos climáticos globales para el período (2026 – 2042).

## CONCLUSIONES

El empleo conjunto de Modelos Climáticos Globales con modelos de simulación de cuencas hidrográficas demostró ser de utilidad para la evaluación del impacto del cambio climático sobre variables ecohidrológicas asociadas al rendimiento de agua, pues permite una aproximación de impactos en términos comparativos entre escenarios.

Dada la consistencia de los Modelos Climáticos Globales empleados en cuanto a un aumento de temperatura entre escenarios de cambio climático, puede esperarse que el requerimiento de agua por parte de la atmósfera y de la vegetación aumente. Ello ocasionaría que de mantenerse igual o de disminuir la precipitación, el agua disponible para los procesos ecohidrológicos sea menor, con la consecuente disminución del rendimiento de agua en la cuenca.

La falta de consistencia de los cambios de la precipitación entre los escenarios de cambio climático según el Modelo Climático Global empleado, hace más incierta la evaluación de impactos sobre variables en las que interviene este elemento.

En cuanto al rendimiento de agua, la escorrentía superficial, el flujo base y el exceso de precipitación: a) cambios en la precipitación se corresponderían con cambios en el mismo sentido pero mayores en proporción y b) en casos

en que la precipitación varíe poco, estas variables disminuirían por efecto de la mayor ETP. Dada la posible disminución de la precipitación, y del consistente incremento de la temperatura y ETP, puede esperarse que estos flujos disminuyan por efecto del cambio climático.

En atención a los resultados contradictorios, y con el fin de establecer escenarios representativos del grado y sentido del impacto del cambio climático, se hace recomendable la exploración de resultados a partir de varios Modelos Climáticos Globales.

## AGRADECIMIENTO

Los autores manifiestan su agradecimiento a Héctor Tobón y Jorge Cardona (de CIAT-CGIAR, Colombia) y Virginie Gillet (AQUASTAT-FAO) por la asistencia prestada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, J.G.; R. Srinivisan; R.S. Muttiah; P.M. Allen. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1): 73-89.
- Barrios, A.; L. Urribarri. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana* 51(1): 11-29.

- Carmona, A. 2007. Ajuste de la producción de agua simulada por el modelo SWAT y análisis de sensibilidad ante características hidrológicas del suelo en una cuenca pequeña de alta pendiente. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía. UCV.
- CGIAR-CCAFS, 2014. Downscaled Data Portal and Data Bias Correction. Consultative Group for International Agricultural Research – Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security. [http://ccafs-climate.org/data\\_bias\\_correction/](http://ccafs-climate.org/data_bias_correction/).
- Duku, C.; S.J. Zwart; L. Hein. 2018. Impacts of climate change on cropping patterns in a tropical, sub-humid watershed. *PLoS ONE* 13(3): e0192642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192642>.
- Estrada, L.; M. García 1997. Evaluación de las tierras del sector Higuero tal, cuenca media del río Pao, estado Cojedes, con fines de conservación de suelos y aguas. Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía. UCV.
- FAO. 2019a. Aquastat: Climate Information Tool. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://aquastat.apps.fao.org/climate-info-tool/>.
- FAO. 2019b. Local Climate Estimator (New\_LocClim). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1032167/>.
- Guillén, J.; O. Silva. 2003. Prioridades de atención conservacionista según los riesgos de erosión potencial y actual en la Cuenca media del Río Pao, Venezuela. En: *Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo*. Documentos Técnicos en Hidrología del PHI, número de serie 71. pp 83-88. UNESCO.
- Jha, M.; J.G. Arnold; P.W. Gassman; R. Gu. 2004. Climate Change Sensitivity Assessment on Upper Mississippi River Basin Streamflows Using SWAT. Working Paper 04-WP 353. January 2004. Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University.
- Jiménez-Cisneros, B.E.; T. Oki; N.W. Arnell; G. Benito; J.G. Cogley; P. Döll; T. Jiang; and S.S. Mwakalila, 2014. Freshwater resources. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.
- Lu, N; G. Sun; X. Feng and B. Fu. 2012 . Water yield responses to climate change and variability across the North–South Transect of Eastern China (NSTEC). *Journal of Hydrology* 481 (2013) 96–105.
- MARN – IGVSB. 2003. Sistema de Cuencas Hidrográfica, Isoyetas e Isotermas. [CD]. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables - Instituto Geográfico Simón Bolívar.
- MARNR. 1989. Plan de desarrollo integral conservacionista para la cuenca alta y media del río Pao. Dirección Regional. Cojedes.
- MARN-SINAIHME. 2002. Información climatológica diaria de las estaciones Pao-Oficina, Pao-Planta, Morita-Casería, Manuare, Las Dos Bocas, Cachinche y San Carlos Unellez. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales- Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica. Archivo digital.
- MINEA - PDVSA. 2017. Base Técnica del Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso de la Zona Protectora y Reserva Hidráulica de la Cuenca del Río Sanchón, Estado Carabobo. Editores: A. O. Castillo y J. Comerma. Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (Dirección General de Gestión Territorial del Ambiente) - Petróleos de Venezuela, S.A. (Refinería El Palito). Caracas, Venezuela.

- MOHC. 2009. HadGEM2 family: Met Office Climate Prediction Model. <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2>.
- Neitsch, S.; J.G. Arnold; J.R. Kiniry; J.R. Williams. 2011. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Grassland, Version 2009. Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>.
- Ranesh, K.Y. G. Thampi. 2011. A study on the impact of climate change on streamflow at the watershed scale in the humid tropics. *Hydrological Sciences Journal*. 56:6, 946-965, DOI: 10.1080/02626667.2011.595371.
- SCNCC, 2017. Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. República de Venezuela – Ministerio de Ecosocialismo y Agua.
- Silva, O. 2004. El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: simulación de la producción de agua. *Agronomía Tropical* 54 (3): 275
- Silva, O. 2009. Evaluación del modelo de simulación SWAT para la producción de agua en una cuenca hidrográfica prioritaria de la región central de Venezuela. Caso cuenca media del río Pao. Trabajo de ascenso. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay.
- Silva, O. 2010. Evaluación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca media del río Pao en Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 36 (3): 134-145.
- Stone, M.C.; R.H. Hotchkiss; C.M. Hubbard; T.A. Fontaine; L.O. Mearns; J.G. Arnold. 2001. Impacts of climate change on Missouri river basin water yield. *Journal of The American Water Resources Association*. 37 (5): 1119-1129.
- Van Vuuren, D. P.; J. Edmonds; M. Kainuma; K. Riahi; A. Thomson; K. Hibbard; G.C. Hurtt; T. Kram; V. Krey; J.F. Lamarque; T. Masui; M. Meinshausen; N. Nakicenovic; S.J. Smith; S.K. Rose. 2011. Their representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 2011 109:5–31.