

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH WEAP TRONG ĐÁNH GIÁ TÁC ĐỘNG CỦA BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU TỚI DÒNG CHẢY LƯU VỰC SÔNG BA^(*)

Nguyễn Thị Huỳnh Mai^{(1),(3)}, Lê Hoàng Anh^{(1),(3)}, Phạm Thị Lợi^{(1),(3)},
Nguyễn Thị Mộng Lan^{(4),(5)}, Phạm Thị Thảo Nhi^{(2),(3)}

⁽¹⁾Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, TP. Hồ Chí Minh

⁽²⁾Khoa Khoa học Liên ngành, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, TP. Hồ Chí Minh

⁽³⁾Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

⁽⁴⁾Viện Địa lý tài nguyên TP. Hồ Chí Minh

⁽⁵⁾Viện Nghiên cứu khoa học Tây Nguyên

Ngày nhận bài: 09/10/2024; ngày chuyển phản biện: 10/10/2024; ngày chấp nhận đăng: 14/11/2024

Tóm tắt: Chế độ thủy văn của lưu vực sông chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố, bao gồm biến đổi khí hậu và các hoạt động phát triển kinh tế - xã hội. Biến đổi khí hậu có thể làm trầm trọng thêm tình trạng thiếu nước ở các con sông trong mùa khô hoặc làm tăng lũ lụt trong mùa mưa. Nghiên cứu này đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến dòng chảy của lưu vực sông Ba bằng mô hình Hệ thống đánh giá và quản lý nguồn nước (WEAP) và kết quả từ sáu Mô hình hoàn lưu toàn cầu (GCM) theo hai kịch bản chia sẻ kinh tế - xã hội (SSP). Việc chi tiết hóa dữ liệu toàn cầu được thực hiện bằng công cụ LARS-WG. Kết quả từ các kịch bản biến đổi khí hậu chỉ ra rằng lượng mưa hàng năm trên toàn lưu vực từ năm 2021 đến năm 2100 có xu hướng tăng so với hiện tại, lượng mưa giảm vào mùa khô và tăng vào mùa mưa. Nhiệt độ lớn nhất và nhỏ nhất dự kiến tăng 1,64°C và 1,6°C theo kịch bản SSP2-4.5; và tăng 2,23°C và 2,34°C theo kịch bản SSP5-8.5. Lưu lượng dòng chảy trong tương lai dự kiến giảm trong mùa khô, mức giảm lớn nhất đạt khoảng 40%, trong khi lưu lượng dòng chảy trong mùa mưa có thể tăng tới 31% theo cả hai kịch bản SSP.

Từ khóa: LARS-WG, sông Ba, SSP, thủy văn, WEAP.

1. Mở đầu

Nước là thành phần chính đóng góp vào sự phát triển toàn cầu và sự phát triển bền vững của mỗi quốc gia. Áp lực lên tài nguyên nước liên tục gia tăng do sự gia tăng dân số, và phát triển kinh tế - xã hội cũng như biến đổi khí hậu. Sự phân bố tài nguyên nước và chu trình thủy văn bị ảnh hưởng phần lớn bởi sự gia tăng khí nhà kính trong khí quyển và sự nóng lên toàn cầu. Biến đổi khí hậu (BĐKH) là mối đe dọa lớn đối với nhân loại, ảnh hưởng trực tiếp hoặc gián tiếp đến an ninh lương thực, nước và năng lượng. BĐKH cũng đang tác động mạnh mẽ tới tài nguyên nước trên các lưu vực, và cũng ảnh hưởng tới việc cung cấp nước cho các hoạt động sống của con người.

Liên hệ tác giả: Nguyễn Thị Huỳnh Mai
Email: huynhmai11nguyen@gmail.com

Lưu vực sông Ba nằm ở miền Nam Trung Bộ Việt Nam, trên lưu vực có nhiều hồ chứa lớn nhỏ, đất sản xuất nông nghiệp hơn 681.000 ha. Trong bối cảnh của BĐKH, ở hạ lưu lưu vực sông Ba, lượng mưa mùa mưa có xu hướng tăng dẫn đến sự gia tăng dòng chảy lũ khiến cho tình hình ngập lụt ở khu vực hạ lưu ngày càng nghiêm trọng. Tuy nhiên theo Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Tây Nguyên, những năm gần đây lượng mưa trên lưu vực sông Ba chỉ đạt khoảng 60% năm 2018 và mùa mưa lại kết thúc sớm nên khô hạn đã diễn ra ngay trong mùa mưa kéo dài đến năm 2019. Đến thời điểm cuối năm 2018, đã xảy ra tình trạng thiếu nước nghiêm trọng ở lưu vực sông Ba, do chịu ảnh hưởng của El Nino dẫn đến các tháng 2, 3, 4 có số trận mưa cũng ít hơn. Mùa mưa 2019 đến muộn hơn, dẫn đến khả năng thiếu nước ở phía Đông, Đông Nam Gia Lai diễn ra nghiêm trọng. Khô hạn kéo dài cũng tác

động nghiêm trọng đến hoạt động của hệ thống thủy điện trên lưu vực sông Ba [1].

Hiện nay, các nhà nghiên cứu thường sử dụng các mô hình thủy văn để đánh giá và mô phỏng nguồn nước của các lưu vực sông trong quá khứ và trong tương lai. Bên cạnh đó, mô hình Hệ thống đánh giá và quản lý nguồn nước (WEAP) có hỗ trợ mô phỏng thủy văn cho lưu vực từ đó có thể đánh giá tác động BĐKH ảnh hưởng đến cân bằng nước đồng thời cũng giúp trong việc lên quy hoạch và phân bổ nguồn nước trên lưu vực sông. Các nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra hiệu quả của WEAP trong việc mô phỏng và dự báo tác động của khí hậu lên tài nguyên nước [2-7]. Ở Việt Nam cũng như ở lưu vực sông Ba, các nghiên cứu thường ứng dụng WEAP trong việc phân bổ và quản lý nguồn nước dưới ảnh hưởng của kinh tế - xã hội cũng như BĐKH [8-10]. Ngoài ra, các nghiên cứu trước đây đã sử dụng Mô hình lưu thông toàn cầu (GCM) từ các kịch bản CMIP5, CMIP6 cùng với mô hình WEAP để phân tích tác động của BĐKH đối với thủy văn [11-14]. Tuy nhiên, các GCM CMIP6 đã mang lại những cải tiến đáng kể về hiệu suất của GCM về độ phân giải không gian, các quy trình hệ thống trái đất và phạm vi kết quả trong tương lai [15-17]. Ngoài ra, độ phân giải thô của GCM vẫn khó nắm bắt được các biến động khí hậu cục bộ, đòi hỏi phải thu hẹp quy mô xuống độ phân giải chi tiết hơn. Máy phát thời tiết (WG), như Máy phát thời tiết của Trạm nghiên cứu Long Ashton (LARS-WG), cung cấp một giải pháp có

giá trị bằng cách tạo ra các biến thời tiết hàng ngày phù hợp với dữ liệu quan sát được, cho phép tính toán nhanh hơn và thu nhỏ các dự đoán của GCM [18-22]. Cách tiếp cận này cung cấp một cách toàn diện để đánh giá tác động của BĐKH đối với các quá trình thủy văn ở quy mô nhỏ hơn.

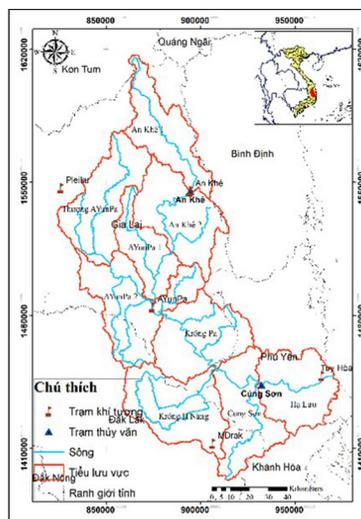
Do đó, nghiên cứu này đã kết hợp mô hình WEAP và LARS-WG nhằm mục đích mô phỏng các quá trình thủy văn của lưu vực sông Ba bằng mô hình WEAP dưới ảnh hưởng của BĐKH.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Lưu vực sông Ba có diện tích tự nhiên toàn lưu vực là 13.900 km² nằm trên địa phận hành chính của các huyện, thị thuộc 4 tỉnh Kon Tum, Gia Lai, Đắk Lắk và Phú Yên. Phía Bắc giáp lưu vực sông Trà Khúc; phía Nam giáp lưu vực sông Cái và sông Sêrêpôk; phía Tây giáp lưu vực sông Sêsan và sông Sêrêpôk; phía Đông giáp lưu vực sông Kône, sông Kỳ Lộ và Biển Đông (Hình 1).

Lưu vực sông Ba không có trung lưu, phần thượng lưu sông ngắn và dốc nên nước tập trung nhanh, lũ lớn. Do lưu vực có địa phận thuộc cả Tây và Đông Trường Sơn nên mùa mưa ở lưu vực này có sự khác biệt rõ rệt. Phía Tây Trường Sơn, mùa mưa bắt đầu từ tháng V đến tháng XI và mùa khô từ tháng XII đến tháng IV, còn phía Đông Trường Sơn, mùa mưa bắt đầu từ tháng IX đến tháng XII và mùa khô từ tháng I đến tháng VIII.

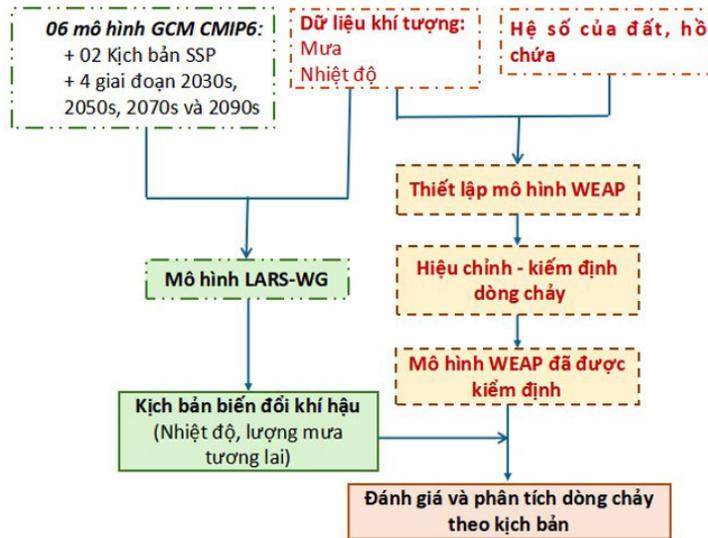


Hình 1. Khu vực nghiên cứu

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Hình 2 trình bày khung nghiên cứu chung, cung cấp tổng quan về phương pháp tiếp cận nghiên cứu. Hình 2 minh họa dữ liệu được sử dụng và mô hình được áp dụng để mô phỏng dòng chảy của lưu vực sông Ba. Ban đầu, mô hình WEAP sẽ được hiệu chỉnh kiểm định dòng

chảy giai đoạn 1980-2011 để chọn ra bộ thông số phù hợp cho lưu vực. Trong tương lai, với kết quả mưa và nhiệt độ từ 6 mô hình của mô hình GCM theo hai kịch bản SSP đã được đưa vào mô hình WEAP sau kiểm định để tiến hành mô phỏng dòng chảy tương lai trong 4 giai đoạn từ năm 2021 đến 2100.



Hình 2. Khung phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Mô hình WEAP

WEAP được phát triển bởi Paul Raskin năm 1988, và được hỗ trợ từ các trung tâm tổ chức khác như SEI là tổ chức hỗ trợ chính cho việc phát triển mô hình WEAP, Trung tâm Kỹ thuật Thủy văn của quân đội Mỹ đã tài trợ cho việc cải tiến mô hình, một số cơ quan bao gồm Ngân hàng Thế giới, USAID và Quỹ Cơ sở Hạ tầng Toàn cầu của Nhật Bản đã hỗ trợ dự án.

WEAP cung cấp ba phương pháp để mô phỏng các quá trình thủy văn lưu vực như bốc hơi, thoát hơi nước và thấm. Các phương pháp này là (1) Lượng mưa chảy tràn và (2) Phương pháp hệ số giảm lượng và (3) Phương pháp độ ẩm đất. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp độ ẩm đất của WEAP để mô phỏng quá trình thoát hơi nước, dòng chảy bề mặt, dòng chảy xen kẽ và thấm thấu sâu cho lưu vực sông Ba.

Cân bằng nước theo phương pháp độ ẩm đất cho lưu vực có thể được xác định bằng phương trình (1) [23]:

$$S_{wj} \frac{dz_{1,j}}{dt} P_e(t) PET(t) k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (1)$$

Trong đó: $z_{1,j}$ là lượng nước tương đối trong đất (không có thứ nguyên), S_{wj} là sức chứa nước của đất (mm), $P_e(t)$ biểu diễn lượng mưa hữu hiệu (mm), $PET(t)$ là thoát hơi nước Penman-Monteith (mm/ngày), $k_{c,j}(t)$ là hệ số cây trồng, LAI_j là chỉ số diện tích lá, dòng chảy bề mặt được

biểu diễn lần lượt bằng $P_e(t) z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}}$, dòng chảy xen kẽ lớp đất thứ nhất $f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$ và thấm sâu $(1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$, trong đó độ dẫn thủy lực bão hòa là $k_{s,j}$ (mm/thời gian) và f_j là hệ số phân chia liên quan đến lớp phủ đất, địa hình và loại đất. Trong suốt thời gian hiệu chỉnh, chỉ số diện tích lá LAI_j và sức chứa nước của đất S_{wj} được lấy từ một nguồn tham chiếu [24-25].

Phương pháp độ ẩm đất trong WEAP bao

gồm bảy thông số liên quan đến đất và sử dụng đất có thể được sử dụng để hiệu chỉnh lại mô hình thủy văn. Các tham số này bao gồm hệ số cây trồng (Kc), khả năng giữ nước của đất (Sw), khả năng giữ nước sâu (DWC), hệ số cản dòng chảy bề mặt (RRF), độ dẫn của vùng rễ (Ks), độ dẫn của vùng sâu (DC), hướng dòng chảy ưu tiên (F) và tỷ lệ lưu trữ ban đầu tại thời điểm bắt đầu mô phỏng của lớp đất trên (Z1) và tỷ lệ lưu trữ ban đầu tại thời điểm bắt đầu mô phỏng của lớp đất dưới (Z2).

Lưu vực sông Ba được chia thành 9 tiểu lưu vực trong mô hình WEAP được dựa theo Quyết định số 5205/QĐ-BNN-TCLL năm 2018 về Phê duyệt điều chỉnh quy hoạch thủy lợi lưu vực sông Ba và phụ cận giai đoạn đến 2030, tầm nhìn đến 2050 và dữ liệu về các trạm quan trắc, hình thái của sông (Hình 1). Các yếu tố khí tượng tại các tiểu lưu vực sẽ dùng phương pháp đa giác Thiessen để đánh giá mức độ ảnh hưởng

của các trạm tới mỗi tiểu lưu vực.

Hiệu quả của mô hình WEAP trong mô phỏng dòng chảy được đánh giá bằng các chỉ tiêu thống kê được sử dụng để đánh giá khả năng mô phỏng dòng chảy của mô hình theo giai đoạn gồm có hệ số hiệu quả mô phỏng Nash-Sutcliffe (NSE), hệ số tương quan (R^2) và phần trăm sai số PBIAS với giá trị các chỉ số $NSE \geq 0,5$; $R^2 \geq 0,5$; $PBIAS \leq 45\%$ thì kết quả mô phỏng được xem là phù hợp [26].

Để mô phỏng các quá trình thủy văn hàng tháng của lưu vực bằng mô hình thủy văn WEAP, cần có các dữ liệu khí tượng bao gồm lượng mưa hàng tháng, nhiệt độ, tốc độ gió, và độ ẩm tương đối. Ngoài dữ liệu khí hậu, bản đồ sử dụng đất, độ sâu của lớp đất, và vĩ độ địa lý cũng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định các quá trình thủy văn của lưu vực (Bảng 1 và Bảng 2).

Bảng 1. Dữ liệu đầu vào

Tên trạm	Thông số quan trắc	Thời gian
An Khê	Lưu lượng, nhiệt độ, lượng mưa	1980-2020
AYunPa	Nhiệt độ, lượng mưa	1980-2020
M'Drak	Nhiệt độ, lượng mưa	1980-2020
Pleiku	Nhiệt độ, lượng mưa	1980-2020
Tuy Hòa	Nhiệt độ, lượng mưa	1980-2020
Củng Sơn	Lưu lượng	1980-2020

Bảng 2. Dữ liệu đầu vào mô hình WEAP

Dữ liệu	Nguồn	Mô tả
Khí hậu	Trung tâm Tư liệu Khí tượng Thủy văn (HMDC)	Nhiệt độ lớn nhất, nhiệt độ thấp nhất, lượng mưa
Thủy văn	Trung tâm Tư liệu Khí tượng Thủy văn (HMDC)	Lưu lượng dòng chảy
Bản đồ sử dụng đất	European Space Agency - Cơ quan Vũ trụ châu Âu	Các loại hình sử dụng đất của khu vực nghiên cứu
Hồ chứa	Quy trình vận hành liên hồ chứa lưu vực sông Ba (Quyết định số 878-QĐ-TTg năm 2018)	Dung tích toàn bộ, dung tích chết, mực nước hồ,...

2.2.2. Mô hình LARS-WG

Công cụ LARS-WG phiên bản 8.0 được sử dụng nhằm xây dựng kịch bản BĐKH cho lưu vực sông Ba trong giai đoạn 2021-2100. Chi tiết về cơ sở lý thuyết của mô hình LARS-WG được thảo luận trong tài liệu của Semenov [27]. Kịch bản

biến đổi khí hậu tại lưu vực sông Ba được tính dựa trên 6 mô hình GCM của CMIP6 với hai kịch bản SSP24.5 và SSP58.5 (Bảng 3).

Mô hình ban đầu sẽ được hiệu chỉnh kiểm định với dữ liệu quan trắc tại lưu vực để đánh giá độ thích hợp của mô hình với lưu vực sông

Ba. Mức độ thích hợp này sẽ được đánh giá dựa vào việc so sánh các chỉ số thống kê (R^2 , RMSE) của dữ liệu mô phỏng từ mô hình với dữ liệu quan trắc. Sau đó sẽ xây dựng kịch bản cho 4 giai đoạn 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 và 2081-2100 từ kết quả mô phỏng của GCM.

Các bước tiến hành trong LARS-WG, đầu tiên từ chuỗi số liệu quan trắc (mưa hoặc nhiệt độ) tại trạm khí tượng, mô hình LARS-WG sẽ tính toán các thuộc tính thống kê như tổng lượng mưa, độ lệch chuẩn,... để xây dựng hàm phân

bố xác suất cho các thông số khí tượng (trong mô hình LARS-WG có 23 hàm phân bố bán thực nghiệm SED). Số liệu khí tượng (mưa, nhiệt độ) mô phỏng trong giai đoạn hiện trạng của các mô hình GCM sẽ được dùng làm đầu vào cho hàm phân bố xác suất ở trên để kiểm tra khả năng mô phỏng dữ liệu khí tượng quan trắc. Bước này là hiệu chỉnh và kiểm định khả năng mô phỏng của LARS-WG nhằm xác định hàm phân bố SED nào là phù hợp.

Bảng 3. Mô hình GCM trong mô hình LARS-WG

STT	Mô hình	Quốc gia	Độ phân giải
1	ACCESS-ESM1-5	Úc	1,25° x 1,875°
2	CNRM-CM6-1	Pháp	1,40° x 1,406°
3	GFDL-ESM4	Mỹ	1,00° x 1,25°
4	HadGEM3-GC31-LL	Anh	1,25° x 1,88°
5	MPI-ESM1-2-LR	Đức	1,39° x 1,41°
6	MRI-ESM2-0	Nhật	1,113° x 1,125°

3. Kết quả - Thảo luận

3.1. Hiệu chỉnh - kiểm định dòng chảy

Các dữ liệu khí hậu theo tháng như lượng mưa, nhiệt độ trung bình, độ ẩm tương đối, số giờ nắng, tốc độ gió, sử dụng đất và các thông số đất đã được sử dụng để mô phỏng lưu lượng dòng chảy. Mô hình đã được hiệu chỉnh để ước tính các tham số liên quan đến sử dụng đất bằng phương pháp thủ công (thử và sai) cho đến khi đạt được sự phù hợp tốt giữa dòng chảy đo được và dòng chảy mô phỏng.

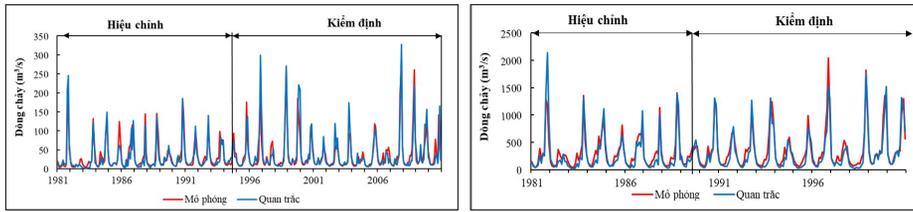
Do thời gian xuất hiện của các hồ chứa trên lưu vực sông Ba khác nhau, nên mô phỏng dòng chảy trong WEAP được tiến hành hiệu chỉnh giai đoạn 1981-1990, kiểm định giai đoạn 1991-2000 đối với trạm Củng Sơn và đối với trạm An Khê hiệu chỉnh giai đoạn 1981-1995, kiểm định giai đoạn 1996-2011 theo bước thời gian tháng.

Kết quả thống kê tại 2 trạm An Khê và Củng Sơn được trình bày trong Bảng 4 cho thấy hệ số tương quan R^2 và hệ số hiệu quả NSE đều ở mức rất tốt và chỉ số PBIAS ở mức tốt trở lên.

Kết quả mô phỏng dòng chảy tại lưu vực sông Ba của mô hình WEAP trong giai đoạn hiệu chỉnh và kiểm định đều đạt mức tốt trở lên. Có chỉ số R^2 và NSE đều lớn hơn 0,8. Bên cạnh việc đánh giá bằng các chỉ số thì việc so sánh giá trị quan trắc và mô phỏng bằng đồ thì cũng cho thấy được độ tin cậy của kết quả từ mô hình WEAP. Trong Hình 3a và Hình 3b cho thấy được kết quả mô phỏng và quan trắc của 2 trạm An Khê và Củng Sơn có sự đồng nhất đáng kể vào mùa mưa hay mùa khô, kết quả mô phỏng bắt xu hướng rất tốt. Nhìn chung, với các kết quả đạt được cho thấy mô hình WEAP có khả năng mô phỏng tốt dòng chảy quan trắc và kết quả hiệu chỉnh có độ tin cậy cao.

Bảng 4. Kết quả hiệu chỉnh, kiểm định dòng chảy lưu vực sông Ba

Trạm quan trắc	Hiệu chỉnh			Kiểm định		
	NSE	R^2	PBIAS	NSE	R^2	PBIAS
An Khê	0,81	0,82	-9,74	0,82	0,82	2,70
Củng Sơn	0,85	0,87	-10,56	0,87	0,89	-15,47



a) Trạm An Khê
b) Trạm Củng Sơn
Hình 3. Kết quả hiệu chỉnh (1981-1995) và kiểm định (1996-2010) dòng chảy

3.2. Xây dựng kịch bản biến đổi khí hậu

Các dữ liệu lượng mưa được hiệu chỉnh trong giai đoạn 1990-2004 và kiểm định trong giai đoạn 2005-2014. Dữ liệu quan trắc và mô phỏng được thực hiện so sánh và đánh giá mức độ phù hợp bằng các chỉ số thống kê như RMSE, và R^2 đối với bước thời gian tháng, các trạm quan trắc được xem xét trong khu vực nghiên cứu bao gồm: An Khê, AyunPa, M'Drak, Pleiku, Tuy Hòa. Thông số thống kê R^2 đối với lượng mưa dao động từ 0,22 đến 0,65 đối với giai đoạn hiệu chỉnh và kiểm định, các giá trị này phần lớn đều nhỏ hơn 0,5 (Bảng 5). Sở dĩ các giá

trị tương quan này không tiệm cận tới 1 (như đối với giá trị tương quan của nhiệt độ) là do lượng mưa có tính sự kiện, trong 1 chuỗi số liệu mưa có ngày mưa và ngày không mưa, những ngày không mưa lượng mưa có giá trị bằng 0. Do tính chất thống kê của chuỗi dữ liệu khiến cho mô hình không thể mô phỏng hoàn toàn chính xác tính “sự kiện” của chuỗi dữ liệu này. Bên cạnh đó, so sánh các nghiên cứu trước đã được thực hiện về dự báo khí hậu tương lai trong và ngoài nước đều cho thấy, mô hình mô phỏng với R^2 khoảng 0,5 và giá trị RMSE < 200 mm là chấp nhận được và hiệu quả trong xây dựng kịch bản biến đổi khí hậu về lượng mưa.

Bảng 5. Kết quả hiệu chỉnh, kiểm định lượng mưa lưu vực sông Ba

Thông số	Hiệu chỉnh		Kiểm định	
	RMSE (mm)	R^2	RMSE (mm)	R^2
An Khê	114,07	0,41	121,05	0,42
AyunPa	98,65	0,31	72,56	0,51
M'Drak	157,60	0,38	168,27	0,42
Pleiku	124,67	0,59	113,90	0,65
Tuy Hòa	235,46	0,34	220,30	0,22

Bảng 6. Kết quả hiệu chỉnh, kiểm định nhiệt độ Tmax và Tmin

Thông số	Tmax				Tmin			
	Hiệu chỉnh		Kiểm định		Hiệu chỉnh		Kiểm định	
	RMSE (°C)	R^2	RMSE (°C)	R^2	RMSE (°C)	R^2	RMSE (°C)	R^2
An Khê	0,99	0,89	1,26	0,83	0,73	0,87	0,7	0,87
AyunPa	1,04	0,82	1,14	0,79	0,82	0,86	0,66	0,9
M'Drak	1,11	0,87	1,29	0,83	0,62	0,88	0,59	0,9
Pleiku	1,07	0,71	1,03	0,68	0,76	0,89	0,69	0,9
Tuy Hòa	4,53	0,91	0,89	0,92	3,72	0,92	0,61	0,88

Các thông số thống kê RMSE, R^2 cho giá trị tháng của nhiệt độ lớn nhất và thấp nhất đã thể hiện giá trị tương quan cao (Bảng 6). Đối với Tmax trong giai đoạn hiệu chỉnh, hệ số tương

quan nằm khoảng 0,71-0,91 và giai đoạn kiểm định nằm trong khoảng 0,68-0,92. Đối với Tmin, giai đoạn hiệu chỉnh R^2 trong khoảng 0,86-0,92 và trong giai đoạn kiểm định nằm trong khoảng

0,87-0,9. Tmax và Tmin đều nằm ở trên mức phù hợp trở lên, từ đó cho thấy mức độ tin cậy của mô hình khí hậu tương lai được sử dụng trong nghiên cứu này, điều này giúp đảm bảo cho khả năng mô phỏng hiệu quả cho kịch bản khí hậu tương lai ở khu vực nghiên cứu. Từ các lý do trên, có thể minh chứng rõ ràng cho khả năng mô phỏng của mô hình LARS-WG cho lượng mưa của lưu vực sông Ba.

Lưu vực sông Ba có địa hình nằm ở cả phía Đông và Tây của dãy núi Trường Sơn, nên khí hậu ở đây cũng bị ảnh hưởng tương đối nhiều. Mùa mưa và mùa khô của các trạm quan trắc trên lưu vực cũng có sự khác biệt do ảnh hưởng của phía Đông - Tây Trường Sơn (Bảng 7).

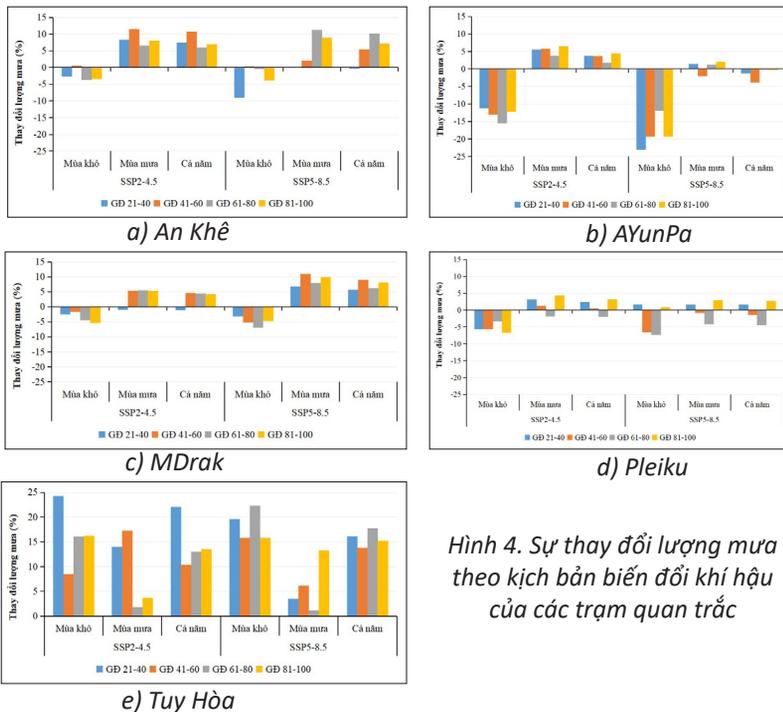
Đối với các trạm quan trắc trên lưu vực, trạm An Khê và Tuy Hòa có cùng thời gian mùa mưa và mùa khô, theo kịch bản biến đổi khí hậu thì

lượng mưa cả năm hai trạm có xu hướng tăng so với giai đoạn hiện trạng. Đối với trạm An Khê (Hình 4a), vào mùa khô lượng mưa có xu hướng giảm hơn so với hiện trạng tại hai kịch bản dao động trong khoảng -9,09 đến 0,56%, vào mùa mưa, lượng mưa có xu hướng tăng trong khoảng 0-11,55% so với hiện trạng. Riêng đối với trạm Tuy Hòa (Hình 4b), lượng mưa các mùa và cả năm đều có xu hướng tăng trong các giai đoạn của kịch bản.

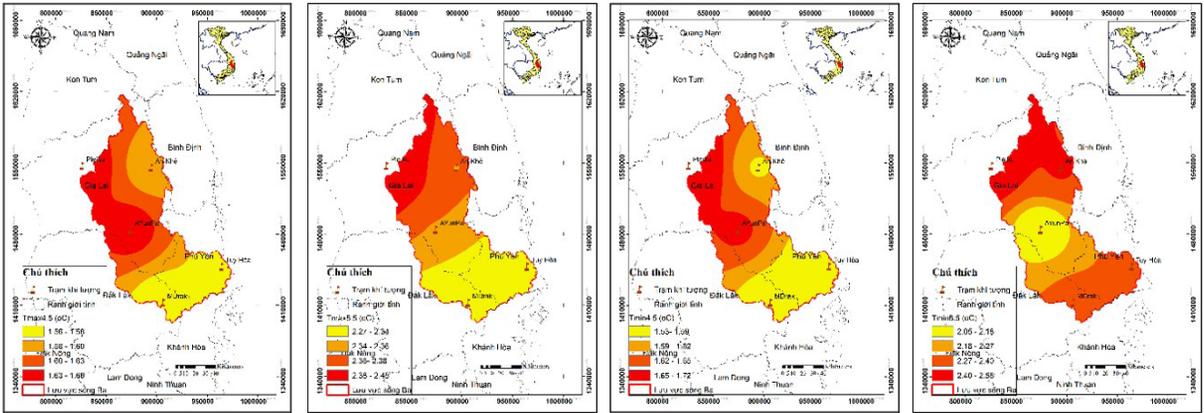
Đối với 3 trạm Pleiku, AYunPa, MDrak, phần lớn lượng mưa mùa khô có xu hướng giảm hơn so với giai đoạn hiện trạng và giảm nhiều hơn ở kịch bản SSP5-8.5 so với kịch bản SSP2-4.5. Đối với mùa mưa tại các trạm có xu hướng tăng hơn so với hiện trạng và tăng nhiều hơn ở kịch bản SSP2-4.5 so với kịch bản SSP5-8.5, ngoại trừ trạm MDrak (Hình 4c, Hình 4d, Hình 4e).

Bảng 7. Thời gian mùa mưa và khô tại các trạm quan trắc

Trạm quan trắc	Mùa mưa	Mùa khô
An Khê	Tháng 9-11	Tháng 12-8 năm sau
Pleiku	Tháng 5-10	Tháng 11-4 năm sau
AYunPa	Tháng 5-11	Tháng 12-4 năm sau
MDrak	Tháng 5-12	Tháng 1-4
Tuy Hòa	Tháng 9-11	Tháng 12-8 năm sau



Hình 4. Sự thay đổi lượng mưa theo kịch bản biến đổi khí hậu của các trạm quan trắc



a) Tmax SSP2-4.5

b) Tmax SSP5-8.5

c) Tmin SSP2-4.5

d) Tmin SSP5-8.5

Hình 5. Bản đồ thay đổi nhiệt độ theo kịch bản BĐKH của lưu vực trung bình các giai đoạn

Đối với nhiệt độ cao nhất (Tmax) và nhiệt độ thấp nhất (Tmin) tại các trạm quan trắc theo kịch bản BĐKH của từng giai đoạn đều có xu hướng tăng hơn so với giai đoạn hiện trạng, trung bình lần lượt là 1,64°C và 1,6°C đối với kịch bản SSP2-4.5 và 2,23°C và 2,34°C đối với kịch bản SSP5-8.5. Có xu hướng tăng nhiều nhất là ở phía thượng nguồn lưu vực, gần trạm An Khê, Pleiku và đèo xuống AyunPa (Hình 5a-d).

Xét tổng thể về cả năm của toàn lưu vực, nhìn chung lượng mưa và nhiệt độ đều có xu hướng tăng hơn so với hiện trạng và kịch bản SSP5-8.5 có xu hướng tăng nhiều hơn SSP2-4.5, riêng giai đoạn 2021-2060 thì lượng mưa giai đoạn này kịch bản SSP2-4.5 tăng cao hơn.

3.3. Dòng chảy lưu vực sông Ba dưới ảnh hưởng của BĐKH

Tỷ lệ tương đối của ba thành phần của dòng chảy (dòng chảy cơ bản, dòng chảy ngầm và dòng chảy bề mặt) phụ thuộc vào đặc điểm vật lý của lưu vực, sử dụng đất, đất đai, địa hình, địa mạo và địa chất.

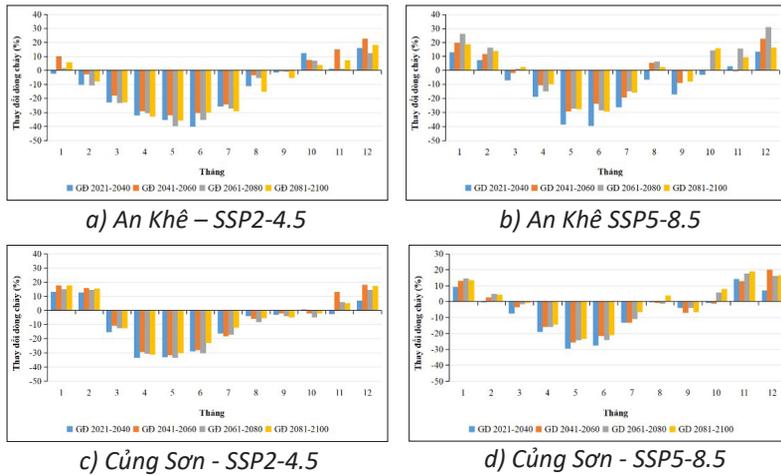
Sự thay đổi dòng chảy dưới ảnh hưởng của BĐKH của lưu vực sông Ba theo tháng được thể hiện qua 2 trạm quan trắc thủy văn là An Khê và Củng Sơn (Hình 6). Dưới ảnh hưởng của biến đổi khí hậu, tại 2 trạm quan trắc vào mùa kiệt lưu lượng dòng chảy có xu hướng giảm và có xu hướng tăng vào mùa lũ. Tại trạm An Khê, vào mùa kiệt, lưu lượng có xu hướng giảm dần và vào tháng 5, 6 có lưu lượng giảm nhiều nhất, có thể đạt tới khoảng 40% đối với kịch bản SSP2-4.5 giai đoạn 2021-2060 và khoảng 39% đối với

kịch bản SSP5-8.5 giai đoạn 2021-2040. Và vào mùa lũ, lưu lượng có xu hướng tăng dần cho tới cuối mùa lũ, tăng cao nhất là vào tháng 12 hơn 22% ở kịch bản SSP2-4.5 giai đoạn 2041 -2060 và hơn 31% ở kịch bản SSP5-8.5 giai đoạn 2061-2080 (Hình 6a và 6b). Đối với trạm Củng Sơn, lưu lượng nước giảm nhiều nhất vào tháng 4 khoảng 33% đối với kịch bản SSP2-4.5 và vào tháng 6 giảm hơn 27% đối với kịch bản SSP5-8.5 đều ở giai đoạn 2021-2040. Lưu lượng nước trạm Củng Sơn có xu hướng tăng dần lại trong mùa lũ và tới đầu mùa kiệt khoảng tháng 2, và tăng cao nhất là vào tháng 12 hơn 18% ở kịch bản SSP2-4.5 và hơn 20% ở kịch bản SSP5-8.5 cùng ở giai đoạn 2041-2060 (Hình 6c và 6d).

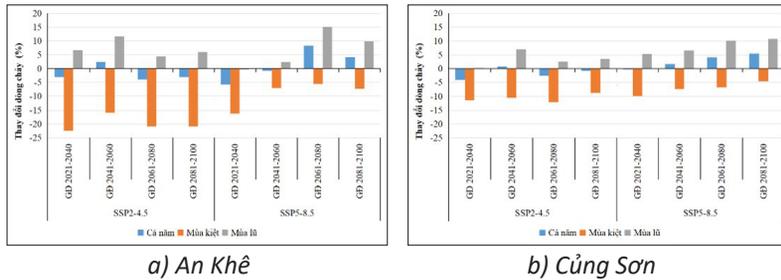
Như vậy, dựa vào hai trạm quan trắc thủy văn của lưu vực sông Ba, dưới ảnh hưởng của BĐKH trong tương lai là lượng mưa có xu hướng giảm vào mùa khô và tăng vào mùa mưa, đồng thời nhiệt độ có xu hướng tăng dần qua từng kịch bản. Từ đó cũng dẫn tới lưu lượng tại hai trạm có xu hướng giảm vào mùa kiệt và tăng vào mùa lũ. Bên cạnh đó thì theo kịch bản SSP5-8.5 lưu lượng của các trạm có xu hướng nhiều hơn so với kịch bản SSP2-4.5. Lưu lượng cả năm tại trạm An Khê ở kịch bản SSP2-4.5 các giai đoạn đều có xu hướng giảm trong khoảng 2,91-3,94%, riêng giai đoạn 2041-2060 có xu hướng tăng 2,48% so với hiện trạng. Kịch bản SSP5-8.5, hai giai đoạn đầu có xu hướng giảm và 2 giai đoạn sau lại có xu hướng tăng và tăng cao nhất vào giai đoạn 2061-2080 khoảng 8,31% (Hình 7a). Đối với trạm Củng Sơn, các giai đoạn đều có xu hướng giảm

và tăng nhẹ vào giai đoạn 2041 -2060 khoảng 0,79% đối với kịch bản SSP2-4.5. Và đối với kịch bản SSP5-8.5, giai đoạn 2021-2040 lưu lượng

cả năm có xu hướng không đổi và các giai đoạn còn lại có xu hướng tăng dần năm trong khoảng 1,72-5,4% (Hình 7b).



Hình 6. Sự thay đổi dòng chảy tháng theo kịch bản biến đổi khí hậu của hai trạm quan trắc



Hình 7. Sự thay đổi dòng chảy từng giai đoạn theo kịch bản biến đổi khí hậu

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã kết hợp mô hình WEAP và LARS-WG để đánh giá tác động biến đổi khí hậu đến thủy văn lưu vực sông Ba. Qua kết quả hiệu chỉnh và kiểm định giữa giá trị quan trắc và mô phỏng cho thấy mô hình phù hợp để xây dựng kịch bản trong tương lai cho lưu vực.

Lượng mưa trung bình cả năm lưu vực sông Ba của kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5 có xu hướng tăng so với giai đoạn hiện trạng. Đối với kịch bản SSP2-4.5 lượng mưa tăng trong khoảng 3,4-5,13% và cao nhất vào giai đoạn 2041-2060, đối với kịch bản SSP5-8.5 lượng có xu hướng tăng dần về giai đoạn sau và tăng trong khoảng 2,37-5,2%. Đối với nhiệt độ kịch bản SSP5-8.5 tăng cao hơn so với kịch bản SSP2-4.5 và đều cao hơn so với giai đoạn hiện trạng.

Tại hai trạm quan trắc thủy văn của lưu vực sông Ba, dưới ảnh hưởng của biến đổi khí hậu thì lưu lượng tại hai trạm này có xu hướng giảm vào mùa kiệt và tăng vào mùa lũ. Bên cạnh đó thì theo kịch bản SSP5-8.5 lưu lượng của các trạm có xu hướng nhiều hơn so với kịch bản SSP2-4.5. Tại trạm An Khê, vào tháng 5, 6 có lưu lượng giảm nhiều nhất, lên tới 40% kịch bản SSP2-4.5 và khoảng 39% kịch bản SSP5-8.5. Và tăng cao nhất là vào tháng 12 hơn 22% ở kịch bản SSP2-4.5 và hơn 31% ở kịch bản SSP5-8.5. Đối với trạm Củng Sơn, lưu lượng nước giảm nhiều nhất vào tháng 4 khoảng 33% đối với kịch bản SSP2-4.5 và tháng 6 giảm hơn 27% đối với kịch bản SSP5-8.5. Có xu hướng tăng dần lại trong mùa lũ và tăng cao nhất là vào tháng 12 hơn 18% ở kịch bản SSP2-4.5 và hơn 20% ở kịch bản SSP5-8.5.

Đóng góp của từng tác giả trong bài báo: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: Nguyễn Thị Huỳnh Mai, Lê Hoàng Anh, Phạm Thị Thảo Nhi; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: Nguyễn Thị Huỳnh Mai, Lê Hoàng Anh, Phạm Thị Thảo Nhi; Xử lý số liệu: Phạm Thị Lợi, Nguyễn Thị Mộng Lan; Chạy mô hình: Nguyễn Thị Huỳnh Mai; Viết bản thảo bài báo: Nguyễn Thị Huỳnh Mai; Chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Thị Huỳnh Mai, Lê Hoàng Anh, Phạm Thị Thảo Nhi, Phạm Thị Lợi, Nguyễn Thị Mộng Lan.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của mình, chưa từng công bố trước đó, không sao chép, đạo văn; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Nam Thành và cộng sự (2019), "Nghiên cứu xây dựng bản đồ phân vùng hạn hán lưu vực sông Ba trong bối cảnh biến đổi khí hậu", *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 704, 20-27.
2. Harma, K. J. et al. (2012), "Future water supply and demand in the Okanagan Basin, British Columbia: a scenariobased analysis of multiple, interacting stressors", *Water Resour Management*, 26, 667-689.
3. Lempert, R. J. and Groves, D. G. (2010), "Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west", *Technol Forecast Soc Change* 77(6), 960-974.
4. Mounir, Z. M. et al. (2011), "Application of Water Evaluation and Planning (WEAP): a model to assess future water demands in the Niger River (In Niger Republic)", *Mod Appl Sci*, 5, 38-49.
5. Usha, B. and Mudgal, B. (2014), "Climate variability and its impacts on runoff in the Kosasthaliyar sub-basin, India", *Earth Sciences Research Journal*, 18, 45-49.
6. Gedefaw, M. and Denghua, Y. (2023), "Simulation of stream flows and climate trend detections using WEAP model in awash river basin", *Cogent Engineering*, 10(1), 2211365.
7. Faiz, M. A. et al. (2018), "Stream flow variability and drought severity in the Songhua River Basin, Northeast China", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 1225-1242.
8. Peter, K. et al. (2018), "Assessment of impacts of climate change on surface water availability using coupled SWAT and WEAP models: case of upper Pangani River Basin", *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 378, 23-27.
9. Farhad, M., et al. (2021), "Study of climate change impact on water resources allocation in Maragheh Plain using WEAP Model", *Water Harvesting Research*, 4(2), 153-166.
10. Hadri, A. et al., (2022), "Integrated water management under climate change through the application of the WEAP model in a Mediterranean arid region", *Journal of Water and Climate Change*, 13(6), 2414-2442.
11. Kumar, M. et al. (2022), "Understanding land use/land cover and climate change impacts on hydrological components of Usri watershed, India", *Applied Water Science*, 12(3), 39.
12. Sun, J. et al. (2022), "Investigating impacts of climate change on runoff from the Qinhuai River by using the SWAT model and CMIP6 scenarios", *Water*, 14 (11), 1178–1195.
13. Hersi, N. A. M. et al. (2023), "Groundwater recharge estimation under changing climate and land use scenarios in a data-scarce Bahi (Manyoni) catchment in Internal Drainage Basin (IDB), Tanzania using Soil and Water Assessment Tool (SWAT)". *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100957.
14. Chisanga, C. B. et al. (2017), "Statistical downscaling of precipitation and temperature using long Ashton research station weather generator in Zambia: A case of Mount Makulu agriculture research station", *American Journal of Climate Change*, 6(3), 487-512.
15. Kishiwa, P. et al. (2018), "Assessment of impacts of climate change on surface water availability using coupled SWAT and WEAP models: Case of upper Pangani River Basin, Tanzania", *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 378, 23-27.
16. Mehan, S. et al. (2017), "Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation", *Climate* 5(2), 26.

17. Mwabumba, M. et al. (2022), "Rainfall and temperature changes under different climate scenarios at the watersheds surrounding the Ngorongoro Conservation Area in Tanzania", *Environmental Challenges*, 7, 100446.
18. Tibangayuka, N. et al. (2022), "Assessing the potential impacts of climate change on streamflow in the data-scarce Upper Ruvu River watershed, Tanzania", *Journal of Water and Climate Change*, 13(9), 3496-3513.
19. Yates, D. et al. (2005), "WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics", *Water international*, 30(4), 487-500.
20. Jackson, R. et al. E (1996), "A global analysis of root distributions for terrestrial biomes", *Oecologia*, 108, 389-411
21. Scurlock, J. et al. (2001), *Global leaf area index from field measurements, 1932-2000*. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1/9/2024. Link: https://daac.ornl.gov/VEGETATION/LAI_des.html.
22. Moriasi, D. N. et al. (2015), "Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria", *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
23. Semenov, M. A. (2021), *LARS-WG stochastic weather generator*, doi.org/10.5281/zenodo.4572752

APPLICATION OF WEAP MODEL IN ASSESSING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE BA RIVER BASIN

Nguyen Thi Huynh Mai^{(1),(3)}, Le Hoang Anh^{(1),(3)}, Pham Thi Loi^{(1),(3)},
Nguyen Thi Mong Lan^{(4),(5)}, Pham Thi Thao Nhi^{(2),(3)}

⁽¹⁾Faculty of Environment, University of Science, Ho Chi Minh City

⁽²⁾Faculty of Interdisciplinary Science, University of Science, Ho Chi Minh City

⁽³⁾Vietnam National University, Ho Chi Minh City

⁽⁴⁾Ho Chi Minh City Institute of Resources Geography

⁽⁵⁾Tay Nguyen Institute for Scientific Research

Received: 09/10/2024; Accepted: 14/11/2024

Abstract: *The hydrological regime of a river basin is influenced by various factors, including climate change and socio-economic development activities. Climate change can exacerbate water shortages in rivers during the dry season or increase flooding during the wet season. This study assesses the impact of climate change on the hydrology of the Ba River basin using the Water Evaluation and Planning (WEAP) model and results from six Global Circulation Models (GCMs) under two Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios. Downscaling of global data was conducted using the LARS-WG tool. Climate change scenario results indicate that annual rainfall across the basin from 2021 to 2100 tends to increase compared to the present, with a decrease in rainfall during the dry season and an increase during the wet season. The maximum and minimum temperatures are projected to increase by 1.64°C and 1.6°C under the SSP2-4.5 scenario, and by 2.23°C and 2.34°C under the SSP5-8.5 scenario. Future streamflow is expected to decrease during the dry season, with a maximum reduction of approximately 40%, while streamflow during the wet season may increase by up to 31% under both SSP scenarios.*

Keywords: LARS-WG, Ba River, SSP, hydrology, WEAP.