VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences

Journal homepage: https://js.vnu.edu.vn/EES

Original Article

Drought Evolution in the Srepok River Basin (2000-2022) Based on the Vegetation Health Index (VHI) and Standardized Precipitation Index (SPI)

Huynh Cong Luc*, Luong Van Viet

Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Received 8th July 2025
Revised 17th September 2025; Accepted 01st December 2025

Abstract: This study aims to evaluate drought dynamics using the Vegetation Health Index (VHI) in the Srepok River Basin during the period 2000–2022 and to analyze the relationship between meteorological drought and vegetation condition. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) data derived from MODIS satellite imagery were utilized to calculate the VHI, while rainfall data from meteorological stations were employed to compute the Standardized Precipitation Index (SPI). The analysis shows that VHI exhibits the strongest correlation with SPI at a 6-month scale (SPI6), particularly in April, marking the end of the dry season. During the 23-year study period, drought events demonstrated a recurrence pattern of approximately 3–5 years, with severe episodes occurring in 2005 and 2016, coinciding with strong El Niño events. Spatial analysis indicates that the northwestern middle and lower sub-basins were most severely affected, with drought durations exceeding six months and frequencies greater than 14%. Crop-specific assessment shows that annual crops and rice were the most drought-sensitive groups, while perennial crops exhibited higher drought tolerance but still sustained significant damage due to their extensive cultivation area. These findings underscore the effectiveness of integrating VHI and SPI6 as tools for agricultural drought monitoring and early warning in the region.

Keywords: VHI, SPI, drought, El Niño, Srepok.

* Corresponding author.
E-mail address: huynhcongluc@iuh.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5314

Diễn biến hạn hán lưu vực Srêpốk giai đoạn 2000-2022 thông qua phân tích chỉ số sức khỏe thực vật (VHI) và chỉ số lượng mưa chuẩn hóa (SPI)

Huỳnh Công Lực*, Lương Văn Việt

Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh
12 Nguyễn Văn Bảo, Hạnh Thông, Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 08 tháng 7 năm 2025
Chỉnh sửa ngày 17 tháng 9 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 01 tháng 12 năm 2025

Tóm tắt: Nghiên cứu này nhằm đánh giá diễn biến hạn hán thông qua chỉ số sức khỏe thực vật (VHI) tại lưu vực sông Srêpốk trong giai đoạn 2000–2022 và phân tích mối liên hệ giữa hạn khí tượng với tình trạng thảm thực vật. Dữ liệu chỉ số phản xạ thực vật chuẩn hóa (NDVI) và nhiệt độ bề mặt đất (LST) từ vệ tinh MODIS được sử dụng để tính chỉ số VHI, trong khi dữ liệu lượng mưa từ các trạm khí tượng được dùng để tính chỉ số lượng mưa chuẩn hóa (SPI). Kết quả phân tích cho thấy VHI có tương quan chặt chẽ nhất với SPI6, đặc biệt trong tháng 4 – thời điểm cuối mùa khô. Trong 23 năm nghiên cứu, hạn hán có xu hướng lặp lại theo chu kỳ 3–5 năm, với các đợt nghiêm trọng xảy ra vào các năm 2005 và 2016, trùng với các kỳ El Niño mạnh. Phân tích không gian cho thấy khu vực trung và hạ lưu phía tây bắc lưu vực chịu ảnh hưởng nặng với thời gian hạn kéo dài trên 6 tháng và tần suất trên 14%. Đánh giá theo nhóm cây trồng cho thấy cây hàng năm và lúa là nhóm nhạy cảm nhất với hạn, trong khi cây lâu năm có mức độ chịu hạn cao hơn nhưng vẫn ghi nhận thiệt hại lớn do diện tích rộng. Kết quả nghiên cứu khẳng định hiệu quả của việc kết hợp chỉ số VHI và SPI6 trong giám sát và cảnh báo sớm hạn hán nông nghiệp.

Keywords: VHI, SPI, hạn hán, El Niño, Srêpốk.

1. Mở đầu

Hạn hán là một trong những hiện tượng thời tiết cực đoan gây thiệt hại nghiêm trọng đến nông nghiệp, tài nguyên nước và đời sống con người tại nhiều khu vực trên thế giới [1]. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, tần suất và cường độ của hạn hán có xu hướng gia tăng, đặc biệt tại các khu vực nhiệt đới và cận nhiệt đới [2, 3]. Tác động của hạn hán đã gây thiệt hại ít nhất 124 tỷ USD về kinh tế và ảnh hưởng tới hơn 1,5 tỷ người trên toàn thế giới từ năm 1998 đến năm 2017 [4]. Không giống như các thảm họa thiên nhiên khác, hạn hán phát triển dần dần và tác động của nó có thể kéo dài trong nhiều năm, gây khó khăn trong công tác giám sát và quản lý [5].

Hạn hán thường được phân loại thành bốn loại chính: hạn hán khí tượng, hạn hán nông nghiệp, hạn hán thủy văn và hạn hán kinh tế - xã hội [6, 7]. Mỗi loại có các đặc trưng, nguyên nhân và tác động khác nhau. Hạn hán ngắn hạn có thể ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát triển và sinh trưởng của cây trồng, trong khi hạn hán kéo dài có thể gây ra những thay đổi sâu sắc trong cấu trúc và chức năng của hệ sinh thái [8, 9]. Biến đổi khí hậu đang làm trầm trọng thêm tình

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: huynhcongluc@iuh.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5314

trạng khô hạn thông qua nhiệt độ tăng cao, lượng mưa biến động thất thường và quá trình bốc hơi gia tăng [10, 11]. Các khu vực có nền nông nghiệp chủ yếu dựa vào thiên nhiên thường chịu tác động nặng nề từ hạn hán [12, 13].

Lưu vực sông Srêpốk thuộc Tây Nguyên là một trong những vùng nông nghiệp quan trọng của Việt Nam, với khí hậu nhiệt đới gió mùa và diện tích canh tác lớn các loại cây công nghiệp có giá trị kinh tế cao như cà phê, hồ tiêu, cao su và cây lương thực [14]. Trong đó, cà phê có diện tích khoảng 5.825 km² ở Tây Nguyên, chiếm khoảng 10% diện tích. Đây là khu vực sản xuất cà phê thâm canh và tập trung nhất trên thế giới [15], với khoảng 86% cà phê ở Việt Nam được sản xuất ở Tây Nguyên [16]. Những năm gần đây, khu vực này đã chứng kiến nhiều đợt hạn hán nghiêm trọng, gây thiệt hại đáng kể cho sản xuất nông nghiệp và sinh kế của người dân địa phương [17, 18]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra mối liên hệ chặt chẽ giữa hiện tượng El Niño và hạn hán tại khu vực Đông nam Á, trong đó có Tây Nguyên Việt Nam [19-22]. Tuy nhiên, mức độ tác động cụ thể của hiện tượng này đến thảm thực vật và các loại hình canh tác khác nhau trên lưu vực sông Srêpốk vẫn cần được nghiên cứu chi tiết hơn.

Để đánh giá mức độ nghiêm trọng của hạn hán, các phương pháp giám sát hạn hán truyền thống thường dựa vào các chỉ số khí tượng thủy văn như chỉ số hạn hán Palmer (PDSI - Palmer Drought Severity Index) [23], Chỉ số lượng mưa chuẩn hóa (SPI - Standardized Precipitation Index) [24], và chỉ số bốc thoát hơi lượng mưa chuẩn hóa (SPEI - Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) [25]. Mặc dù các chỉ số này cung cấp thông tin quan trọng về tình trạng khô hạn, chúng phụ thuộc nhiều vào dữ liệu quan trắc khí tượng, vốn có thể không đầy đủ hoặc không liên tục ở các khu vực xa xôi và có địa hình phức tạp [26].

Trong những năm gần đây, các phương pháp viễn thám đã mở ra hướng tiếp cận mới trong giám sát hạn hán, cho phép phân tích không gian với độ phân giải cao và phạm vi rộng [27, 28]. Đặc biệt, Chỉ số Sức khỏe Thực vật (VHI - Vegetation Health Index) được phát triển bởi Kogan [29, 30] đã chứng minh hiệu quả trong việc giám sát tình trạng hạn hán nông nghiệp thông qua đánh giá sức khỏe thảm thực vật và tác động của nhiệt độ bề mặt [31, 32]. VHI được tính toán từ Chỉ số Tình trạng Thực vật (VCI - Vegetation Condition Index) và Chỉ số Tình trạng Nhiệt độ (TCI - Temperature Condition Index), dựa trên dữ liệu Chỉ số Khác biệt Thực vật Chuẩn hóa (NDVI) và Nhiệt độ Bề mặt Đất (LST) từ vệ tinh MODIS. Lợi thế lớn của VHI là khả năng kết hợp cả hai yếu tố căng thẳng do thiếu nước và căng thẳng do nhiệt độ cao, giúp đánh giá chính xác hơn tác động của hạn hán đến thực vật [33].

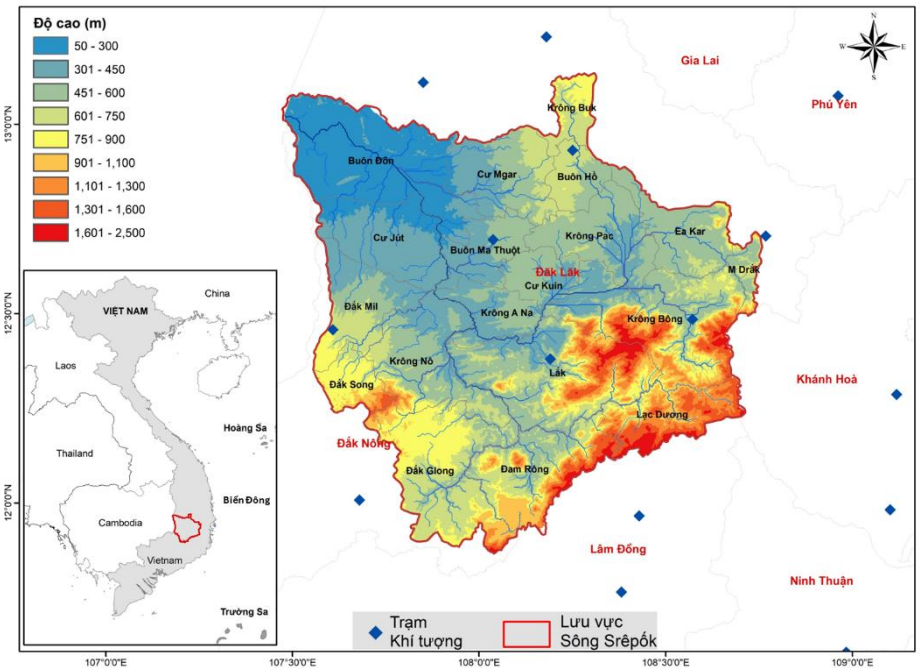
Nhiều nghiên cứu gần đây đã ứng dụng VHI trong giám sát hạn hán tại các khu vực khác nhau trên thế giới. Imran và cs (2021) đã sử dụng VHI để đánh giá hạn hán tại Bangladesh và chỉ ra mối tương quan cao giữa VHI và các chỉ số hạn hán khí tượng [34] . Tương tự, Rojas và cs (2011) đã kết hợp VHI với các chỉ số khác để xây dựng hệ thống cảnh báo sớm hạn hán cho khu vực Nam Mỹ [35]. Tại Việt Nam, một số nghiên cứu bước đầu đã áp dụng VHI để giám sát hạn hán ở Tây Nguyên [36-39], tuy nhiên, các nghiên cứu này còn hạn chế về khung thời gian và chưa phân tích chi tiết mối quan hệ giữa VHI với các chỉ số khí tượng, cũng như tác động đến các loại hình sử dụng đất khác nhau .

Nghiên cứu này nhằm đánh giá diễn biến hạn hán trên lưu vực sông Srêpốk trong giai đoạn 2000–2022 thông qua việc phân tích chỉ số Sức khỏe Thực vật (VHI). Bên cạnh đó, nghiên cứu xác định quy mô thời gian và thời điểm phù hợp của chỉ số lượng mưa chuẩn hóa (SPI) để giám sát hạn hán, làm rõ mối tương quan giữa VHI và SPI. Ngoài ra, nghiên cứu cũng tập trung phân tích phân bố không gian và thời gian của các đặc trưng hạn hán như thời gian kéo dài, cường độ và tần suất. Cuối cùng, nghiên cứu xem xét mức độ ảnh hưởng của hạn hán đến các loại hình sử dụng đất nông nghiệp khác nhau, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho công tác giám sát và cảnh báo sớm hạn hán trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Giới thiệu về lưu vực

Lưu vực sông Srêpốk có tổng diện tích là 30.942 km^2, trong đó phần thuộc Việt Nam là 18.162 km^2 và thuộc Campuchia là 12.780 km^2. Lưu vực Srêpốk là một tiểu lưu vực sông Mê Kông, nằm ở Cao nguyên miền Trung Việt Nam. Khu vực này nằm giữa vĩ độ 11°45′–13°15′B và kinh độ 107°15′–109°Đ, có độ cao từ 140 đến 2406 mét (Hình 1). Nằm trong vùng nhiệt đới gió mùa, khí hậu khu vực này có 2 mùa là mùa mưa và mùa khô. Mùa mưa kéo dài 6 tháng (từ tháng 5 đến tháng 10) trùng với thời kỳ gió mùa Tây Nam. Mùa khô kéo dài từ tháng 11 đến tháng 4 với lượng mưa chiếm từ 10 - 25% lượng mưa cả năm và thường xảy ra thiếu nước phục vụ cho nông nghiệp. Lưu vực này có dân số khoảng 2,3 triệu người [40] và nông nghiệp là hoạt động kinh tế chính ở nơi đây. Trong những năm gần đây, do biến đổi khí hậu và gia tăng diện tích trồng trọt đã làm tăng nhu cầu sử dụng nước và làm cho tình trạng hạn hán trở nên ngày càng nghiêm trọng, gây ảnh hưởng lớn đến đời sống và sản xuất nông nghiệp ở địa phương. Điều này đặt ra các yêu cầu về nghiên cứu đánh giá hạn hán trên lưu vực.



Hình 1. Lưu vực nghiên cứu và vị trí của các trạm khí tượng.

2.2. Dữ liệu

Để tính toán các chỉ số hạn khí tượng và chỉ số thực vật, nghiên cứu đã sử dụng dữ liệu lượng mưa từ các trạm quan trắc khí tượng và dữ liệu NDVI, LST từ vệ tinh MODIS. Việc thu thập và tiền xử lý các dữ liệu này được mô tả chi tiết dưới đây.

Dữ liệu lượng mưa sử dụng trong nghiên cứu được thu thập từ 14 trạm khí tượng thuộc mạng lưới quan trắc do Tổng cục Khí tượng Thủy văn Việt Nam quản lý, đảm bảo tuân thủ các tiêu chuẩn kiểm soát và kiểm định chất lượng dữ liệu quốc gia. Trong đó, khu vực lưu vực sông Srêpốk có 5 trạm chính (Buôn Ma Thuột, Buôn Hồ, Krông Bông, Lắk, Đắk Mil) và 9 trạm nằm tại vùng lân cận (Đắk Nông, Ea Súp, M'Đrắk, Ea H'leo, Sơn Hòa, Nha Trang, Cam Ranh, Đà Lạt, Liên Khương) nhằm tăng mật độ điểm quan trắc và độ phủ không gian khu vực nghiên cứu. Vị trí phân bố của các trạm được thể hiện trên Hình 1.

Các trạm khí tượng được lựa chọn có chuỗi dữ liệu quan trắc tương đối đầy đủ, chỉ thiếu khoảng 6,4% dữ liệu, và phần thiếu này được bổ sung bằng phương pháp hồi quy tuyến tính từng bước dựa trên quan hệ tương quan với các trạm lân cận.

Dữ liệu NDVI và LST của MODIS được thu thập qua trang https://earthexplorer.usgs.gov/. Trên trang web này NDVI được lấy từ gói Mod13A1 VI, dữ liệu có độ phân giải không gian là 463 m × 463 m và độ phân giải thời gian là 16 ngày. LST được lấy từ gói Mod11A2, dữ liệu này có độ phân giải không gian là 926,6 m × 926,6 m và độ phân giải thời gian là 8 ngày. Để đảm bảo tính tin cậy, dữ liệu NDVI và LST từ MODIS được sàng lọc chất lượng dựa trên chỉ số *Quality Assurance* đã được tích hợp. Các pixel bị mây che, bóng mây hoặc nhiễu khí quyển không đạt chuẩn được loại bỏ. Các vùng thiếu dữ liệu kéo dài được nội suy không gian bằng phương pháp *Spatial Mean Filter* trong phạm vi 3x3 pixel, với điều kiện tỷ lệ pixel đạt chuẩn ≥ 70%. Để phân tích ảnh hưởng của hạn hán đến thảm thực vật trồng, dữ liệu viễn thám cần có độ phân giải không gian chung, và các chỉ số hạn khí tượng cũng như chỉ số thực vật phải có cùng độ phân giải không gian và thời gian. Về mặt thời gian, dữ liệu theo tháng được chọn để tính toán. Dữ liệu LST hàng tháng đã được nội suy lại bằng phương pháp Bilinear để phù hợp với độ phân giải không gian của NDVI. Dữ liệu NDVI hàng tháng được lấy từ dữ liệu NDVI đầu vào có độ phân giải 16 ngày, bằng cách áp dụng phương pháp Maximum Value Composite (MVC), giúp giảm ảnh hưởng của điều kiện khí quyển [41-44].

Bản đồ sử dụng đất của lưu vực Srêpốk được lấy từ Phân viện Quy hoạch và Thiết kế nông nghiệp trong năm 2015 được sử dụng trong nghiên cứu.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Xác định các chỉ số VHI

Chỉ số VHI (Vegetation Health Index) được phát triển để đánh giá tình trạng sức khỏe của thảm thực vật bằng cách kết hợp chỉ số điều kiện thảm thực vật (VCI - Vegetation Condition Index) và chỉ số điều kiện Nhiệt độ (TCI - Temperature Condition Index). Do đó, VHI phản ánh tình trạng thảm thực vật, tác động của hạn hán và ảnh hưởng của nhiệt độ bề mặt đến sự phát triển của thảm thực vật [29, 30, 45]. VHI được tính theo công thức sau:

$$VHI = \propto VCI + (1-\propto)TCI \quad (1)$$

Trong đó, hệ số trọng số α thường được đặt là 0,5, và VCI cũng như TCI là giá trị chuẩn hóa của NDVI và LST theo thời gian, tương ứng. Chỉ số VCI và TCI được tính theo công thức sau:

$$VCI = 100\frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

$$TCI = 100\frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (3)$$

Trong đó:

$NDVI_i$ là giá trị NDVI của một pixel cụ thể tại thời điểm *i* trong một năm nhất định.

$NDVI_{max}$ và $NDVI_{min}$ lần lượt là giá trị NDVI lớn nhất và nhỏ nhất trong khoảng thời gian phân tích.

LST_i là giá trị LST của một pixel cụ thể tại thời điểm i trong một năm nhất định.

LST_{max} và LST_{min} lần lượt là giá trị LST lớn nhất và nhỏ nhất trong khoảng thời gian phân tích.

Số liệu VHI tại các ô lưới và số liệu trung bình theo các đơn vị hành chính được sử dụng để phân tích đặc điểm của hạn hán và ảnh hưởng của hạn hán khí tượng đến cây trồng.

Theo các tài liệu [30, 45], cấp hạn được phân chia theo giá trị của VHI như sau:

- VHI < 10: Hạn nghiêm trọng;
- 10 < VHI < 20: hạn nặng;
- 20 < VHI < 30: hạn vừa;
- 30 < VHI < 40: hạn nhẹ;
- VHI > 40: không hạn.

Nghiên cứu này cũng sử dụng thang chia trên trong việc xây dựng các bản đồ hạn hán cho khu vực nghiên cứu.

2.2.2 Tính chỉ số lượng mưa chuẩn hóa

SPI được McKee cùng các đồng sự đề xuất vào năm 1993 [24], đây là một chỉ số được sử dụng rộng rãi trên thế giới để giám sát và đánh giá hạn khí tượng. Chỉ số này được xây dựng dựa trên phân bố xác suất của lượng mưa, cho phép chuẩn hóa dữ liệu theo thời gian và không gian,

từ đó so sánh điều kiện khô hạn hoặc ẩm ướt giữa các khu vực khác nhau. SPI có thể được tính toán tại nhiều bước thời gian khác nhau, thường dao động từ 1 đến nhiều tháng, nhằm phản ánh đặc điểm của các dạng hạn ngắn hạn đến dài hạn. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng chương trình con 'cdfgam' để ước lượng hàm phân phối Gamma – nền tảng cho việc tính toán SPI. Quy mô thời gian từ 1 đến 12 tháng được chọn dựa trên điều kiện khí hậu đặc thù của khu vực nghiên cứu, qua đó hỗ trợ phân tích hiệu quả các biến động theo mùa và đảm bảo tính nhất quán của kết quả đánh giá hạn.

Gọi x là lượng mưa ứng với bước thời gian chọn trước của một tháng bất kỳ trong năm, SPI sẽ được tính theo các bước sau:

- Xác định các tham số hình dạng (β) và tham số tỷ lệ (α) theo theo phân bố Gamma như sau:

$$\beta = \frac{1+\sqrt{1+4U/3}}{4U}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\bar{X}}{\beta}, \quad (5)$$

ở đây $\overline{X}$ là giá trị trung bình của X và U là hệ số thống kê. Gọi n là số lượng quan trắc lượng mưa, khi đó U được tính như sau:

$$U = ln(\bar{X}) - \frac{\sum ln(X)}{n} \quad (6)$$

- Xác định hàm phân bố Gamma theo phương trình sau:

$$G(x) = \frac{\int_0^x x^{\alpha-1} e^{\frac{-x}{\beta}} dx}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad (7)$$

ở đây Γ(α) = (α - 1)!, nó được gọi là hàm Gamma. Vì hàm Gamma không được xác định cho x = 0 và phân phối lượng mưa có thể chứa các số không, nên xác suất tích lũy trở thành:

$$H(x) = q + (1-q)G(x), \quad (8)$$

trong đó q là xác xuất ứng với x = 0.

- Tính SPI

Xác suất tích lũy H (x) sau đó được chuyển thành biến ngẫu nhiên chuẩn hóa với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng một, là giá trị của SPI:

$$SPI = \frac{2{,}515517+0{,}802583t+0{,}010328t^2}{1+1{,}432788t+0{,}189269t^2+0{,}001308t^3} - t \quad 0 < H(x) \leq 0{,}5$$

$$SPI = t - \frac{2{,}515517+0{,}802583t+0{,}010328t^2}{1+1{,}432788t+0{,}189269t^2+0{,}001308t^3} \quad 0{,}5 < H(x) \leq 1 \quad (9)$$

Ở đây

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)} \quad 0 < H(x) \leq 0{,}5$$

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad 0{,}5 < H(x) \leq 1 \quad (10)$$

Nghiên cứu này sử dụng hàm Gamma trong chương trình Cdflib.f90 từ trang web của Đại học bang Florida để tính SPI: https://people.sc.fsu.edu/jburkardt/f_src/cdflib/cdflib.html

SPI được tính tại các trạm, sau đó nội suy bằng phương pháp IDW với lưới 463 m × 463 m, phù hợp độ phân giải VHI. Giá trị trung bình SPI cho từng huyện được trích xuất từ raster theo ranh giới hành chính.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mối quan hệ giữa VHI với chỉ số lượng mưa chuẩn hóa

Nghiên cứu mối tương quan giữa chỉ số sức khỏe thực vật (VHI) và chỉ số lượng mưa chuẩn hóa (SPI) nhằm xác định quy mô thời gian SPI phù hợp nhất và thời điểm thích hợp trong năm để giám sát hạn hán trên lưu vực sông Srêpốk. Theo từng tháng trong năm, hệ số tương quan Pearson được tính riêng cho từng huyện ứng với quy mô thời gian khác nhau của SPI. Từ kết quả này, hệ số tương quan cao nhất, 75%, trung vị, 25% và thấp nhất cho mùa khô (từ tháng 11 năm trước đến tháng 4 năm sau) và mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 10) được thống kê và được trình bày trong Hình 2.

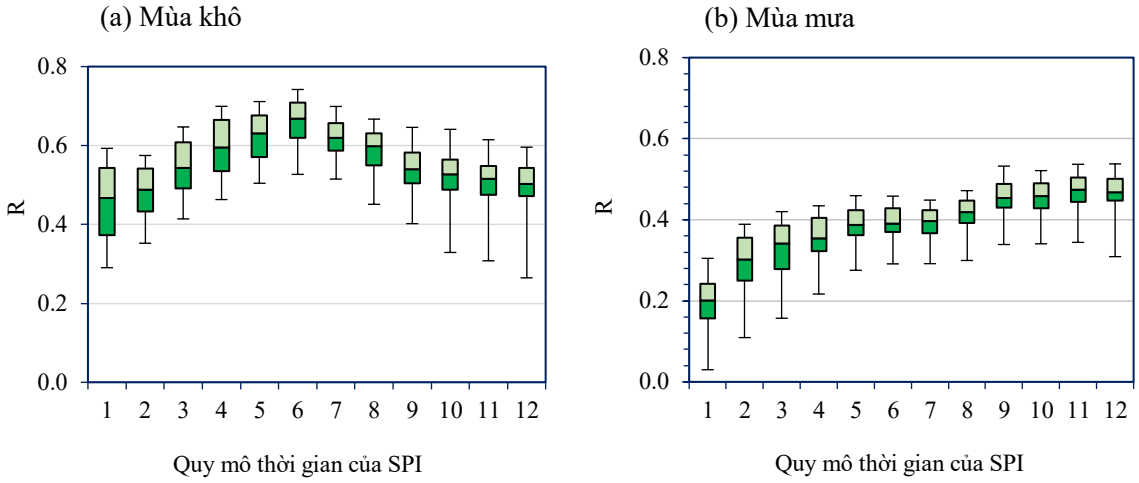
Theo Hình 2a, trong mùa khô hệ số tương quan quan giữa VHI với SPI tăng nhanh khi thang thời gian của SPI tăng từ 1 đến 6 tháng sau đó giảm chậm. Đặc điểm này cho thấy SPI với thang thời gian một vài tháng không nhạy với các thay đổi của VHI. SPI ứng với quy mô thời gian 6 tháng (SPI6) là lựa chọn tốt nhất trong giám sát hạn hán. Hình này cũng cho thấy tương quan giữa VHI và SPI là có sự khác biệt đáng kể giữa

các huyện và ứng SPI6 có trên 75% số huyện có hệ số tương quan trên 0,6.

So với mùa khô, hệ số tương quan quan giữa VHI với SPI trong mùa mưa (Hình 2b) thấp hơn đáng kể. Hay biến động lượng mưa trong mùa khô ít ảnh hưởng đến thảm thực vật. Khi quy mô thời gian của SPI tăng từ 1 đến 5 tháng thì hệ số tương quan tăng nhanh sau đó giảm chậm. Cũng như trong mùa mưa, hệ số tương quan giữa VHI và SPI là có sự khác biệt đáng kể giữa các huyện.

Trong mùa khô, SPI6 phản ánh tốt nhất các ảnh hưởng của hạn hán đến thảm thực vật của khu vực này là do đặc điểm phân bố mưa. SPI6 của tháng đầu mùa khô được tính từ lượng mưa của tháng 6 đến tháng 11, của tháng cuối mùa khô được tính từ lượng mưa của tháng 11 đến tháng 4. Nói cách khác SPI6 trong các tháng mùa khô chứa thông tin về lượng mưa của tháng 11. Như vậy lượng mưa của tháng 11 và các tháng lân cận quyết định sức khỏe cây trồng trong toàn mùa khô.

Như vậy SPI6 là quy mô thời gian tối ưu để giám sát biến động của thảm thực vật trong mùa khô tại lưu vực. Những phát hiện này tương đồng với nghiên cứu của tác giả [46] ở Srêpốk và các nghiên khác ở Việt Nam [47, 48].



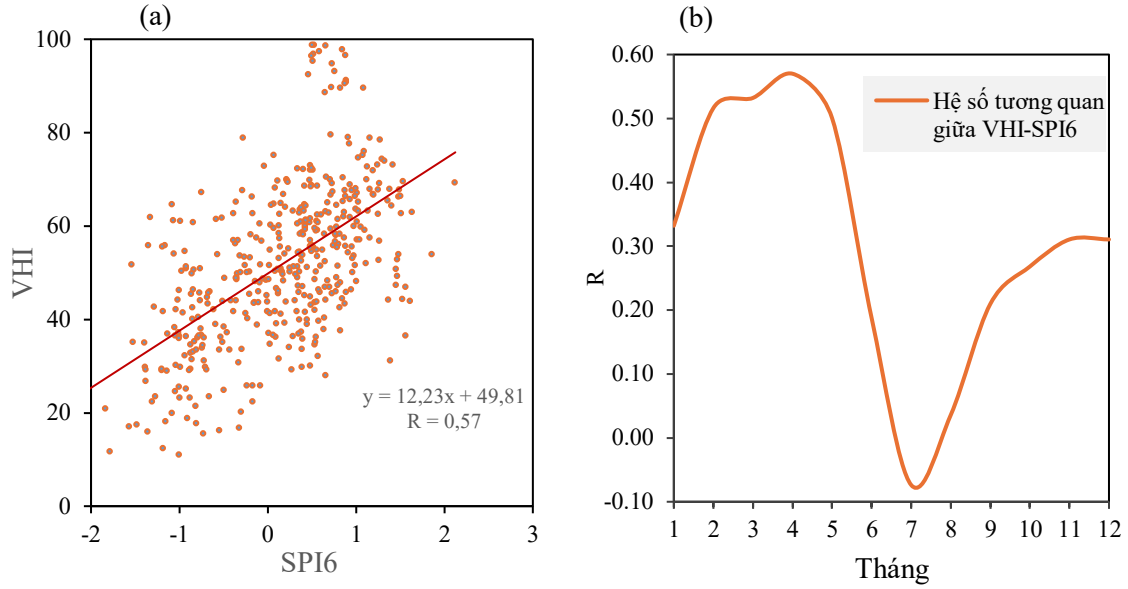
Hình 2. Thống kê giá trị cao nhất, 75%, 50%, 25% và thấp nhất của hệ số tương quan giữa VHI với SPI theo các huyện trong: (a) mùa khô, và (b) mùa mưa.

Để xác định thời điểm trong năm mà hạn hán ảnh hưởng rõ rệt nhất, nghiên cứu đã phân tích tương quan VHI–SPI6 riêng cho từng tháng. Hình 3a minh họa quan hệ VHI–SPI6 vào tháng 4 (cuối mùa khô) thông qua biểu đồ phân tán với chuỗi phân tích có độ dài 437 được tạo thành từ 23 năm quan trắc và 19 huyện. Hình 3b tổng hợp sự biến thiên hệ số tương quan theo tháng, cho thấy giai đoạn từ tháng 2 đến tháng 5 có tương quan VHI–SPI6 cao nhất, hay đây là khoảng thời gian mà tác động của hạn hán là rõ rệt nhất. Trong các tháng này, tháng 4 là tháng mà mức độ ảnh hưởng của hạn hán là mạnh nhất.

Từ tháng 2 đến 4 mức độ khan hiếm nước tăng dần do đây là các tháng cuối mùa khô và có lượng mưa không đáng kể. Tháng 5 là tháng bắt đầu mùa mưa nhưng lượng mưa còn thấp khá thấp. Tháng 4 và tháng 5 có nhiệt độ cao nhất trên khu vực này do lượng mây thấp và độ cao mặt trời lớn. Nhiệt độ cao đã làm tăng lượng bốc thoát hơi và gây thiếu hụt độ ẩm đất và làm cho tình trạng hạn vào các tháng này có thể trở lên trầm trọng. Các báo cáo khác cũng cho thấy hạn hán trên khu vực này thường xuất hiện vào cuối mùa khô và đầu mùa mưa, nhất là vào tháng 4 và tháng 5 [38, 49, 50].

Hệ số tương quan giữa SPI6 và VHI vào tháng 2 là khá cao. Do lượng mưa trong mùa khô không đáng kể nên SPI6 của tháng 2 phụ thuộc chính vào lượng mưa từ tháng 9 đến tháng 11 của năm trước. Do đó có thể dựa trên mức độ thiếu

hụt lượng mưa của các tháng này nhằm cảnh báo sớm các tác động của hạn đến thảm thực vật.



Hình 3. (a) Biểu đồ phân tán về hệ số tương quan giữa SPI6 và VHI của tháng 4, và (b) hệ số tương quan giữa SPI6 và VHI theo các tháng trong năm.

3.2. Diễn biến hạn hán lưu vực Srêpốk giai đoạn 2000 đến 2022 qua VHI

Khu vực nghiên cứu có khí hậu đặc trưng bởi hai mùa rõ rệt: mùa mưa và mùa khô. Theo các hệ số tương quan trong Hình 2 và Hình 3 cho thấy cây trồng chịu tác động đáng kể của tình trạng hạn hán, đặc biệt trong mùa khô. Ngoài ra nó còn cho thấy sức khỏe thực vật ở tháng cuối mùa khô (tháng 4) phản ánh tốt nhất các ảnh hưởng của hạn hán nên VHI của tháng này được lựa để phân tích mức độ ảnh hưởng của hạn đến thảm thực vật. Cũng theo phân tích trên thì SPI6 là phù hợp nhất trong giám sát hạn khu vực này.

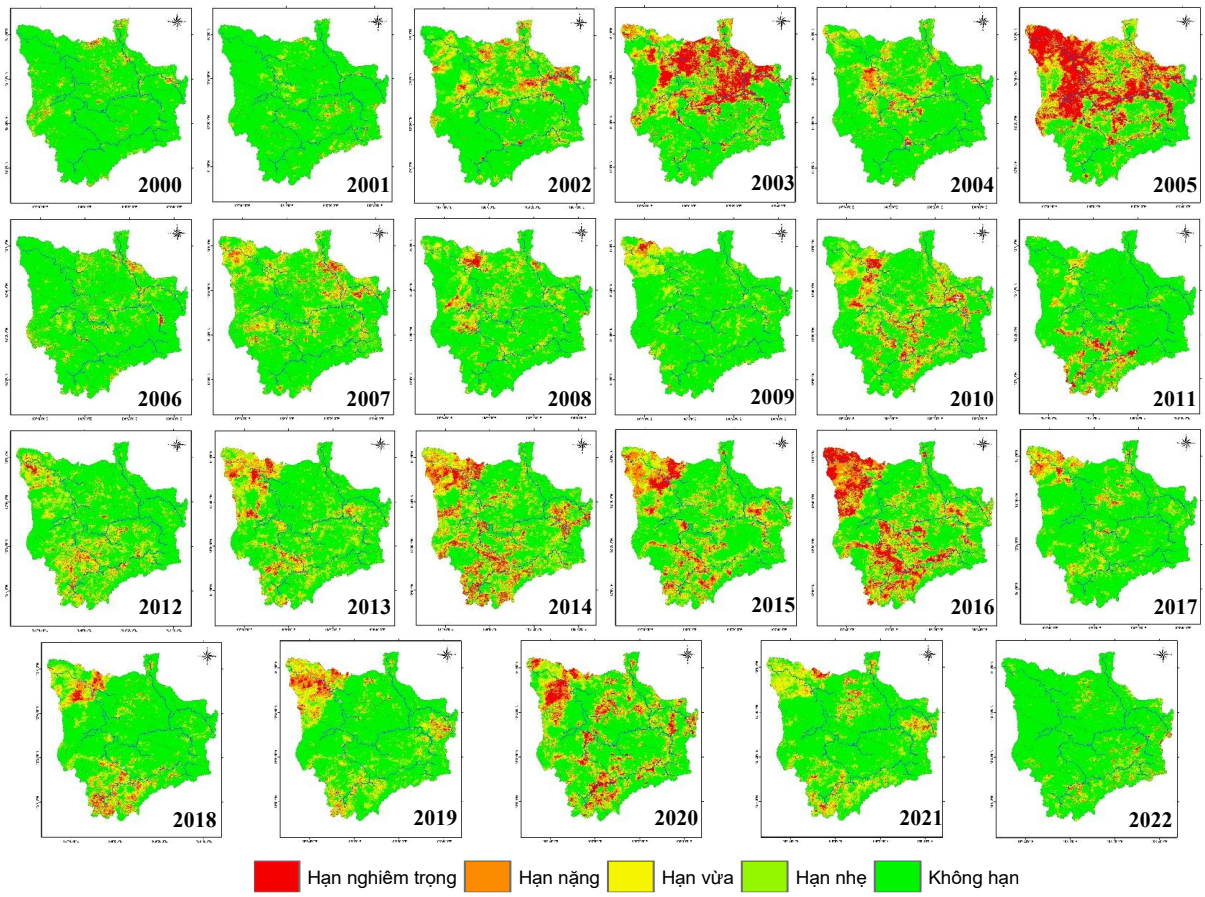
Diễn biến của các cấp độ hạn hán theo VHI được thể hiện trong Hình 4, từ kết quả này tỷ lệ diện tích bị tác động bởi các mức độ hạn khác nhau được thống kê và trình bày trong Hình 5. Dựa trên phân tích không gian và thời gian của chỉ số VHI, tình trạng hạn hán có xu hướng xuất hiện khoảng 5 lần trong 23 năm qua. Đặc biệt, hạn nghiêm trọng và hạn nặng ảnh hưởng nặng nề nhất đến lưu vực sông Srêpốk vào các 2005, 2016.

Theo Hình 4, khi phân tích mức độ hạn hán theo không gian thì lưu vực có sự phân hóa rõ rệt. Khu vực tây bắc của lưu vực bị ảnh hưởng bởi hạn hán nhiều hơn (mức độ hạn nghiêm trọng và hạn nặng chiếm tỉ lệ lớn) so với các khu vực còn lại. Theo địa giới hành chính thì các huyện Lạc Dương, Đam Rông (Lâm Đồng), Krông Nô (Đắk Nông) ít khắc nghiệt hơn so với các huyện Buôn Đôn (Đắk Lắk), Cư Jut, Đắk Mil (Đắk Nông). Các khu vực trung tâm như Thành phố Buôn Ma Thuột, Thị xã Buôn Hồ thì mức khắc nghiệt ở mức trung bình.

Theo Hình 5, trong 2 năm El Nino mạnh là 2005 và 2016 thì diện tích chịu ảnh hưởng bởi hạn vừa đến hạn nghiêm trọng đạt mức cao nhất, lần lượt là khoảng 42% và 41% tổng diện tích lưu vực. Các năm 2003, 2010 và 2020 cũng ghi nhận tỉ lệ diện tích bị hạn nặng ở mức cao (28%, 11% và 18%), phản ánh tính chu kỳ của hiện tượng El Niño đến khu vực nghiên cứu.

Số liệu SPI6 trung bình toàn lưu vực được thể hiện trên Hình 6a. Theo hình này, các đợt hạn và ẩm ướt xảy ra trong tháng 4 gồm các năm 2003, 2005, 2010, 2016, 2020 và 2000, 2006,

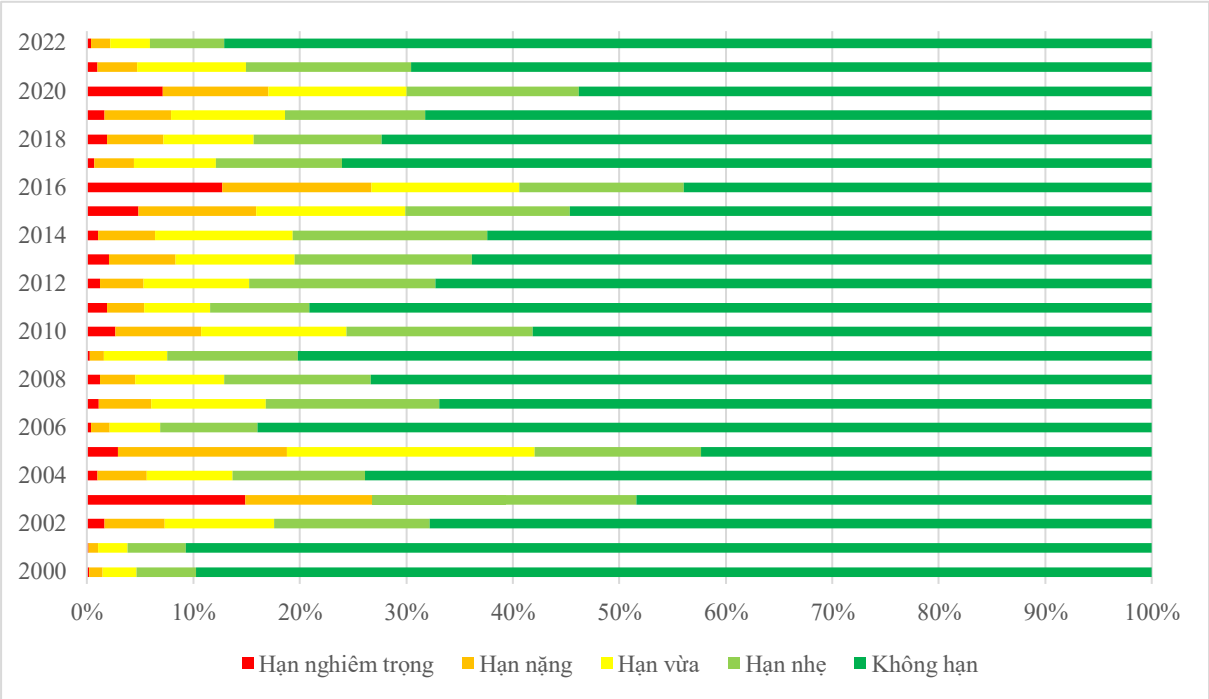
2009, 2012, 2017, 2022 tương ứng. Các năm khô hạn thường ghi nhận chỉ số SPI6 giảm sâu dưới ngưỡng -1.0, cho thấy lượng mưa tích lũy trong 6 tháng mùa khô thiếu hụt nghiêm trọng. Đây là giai đoạn quan trọng đối với các hệ thống canh tác mùa khô, đặc biệt đối với các cây trồng chủ lực như cà phê, hồ tiêu và cao su – vốn nhạy cảm với tình trạng thiếu nước kéo dài.



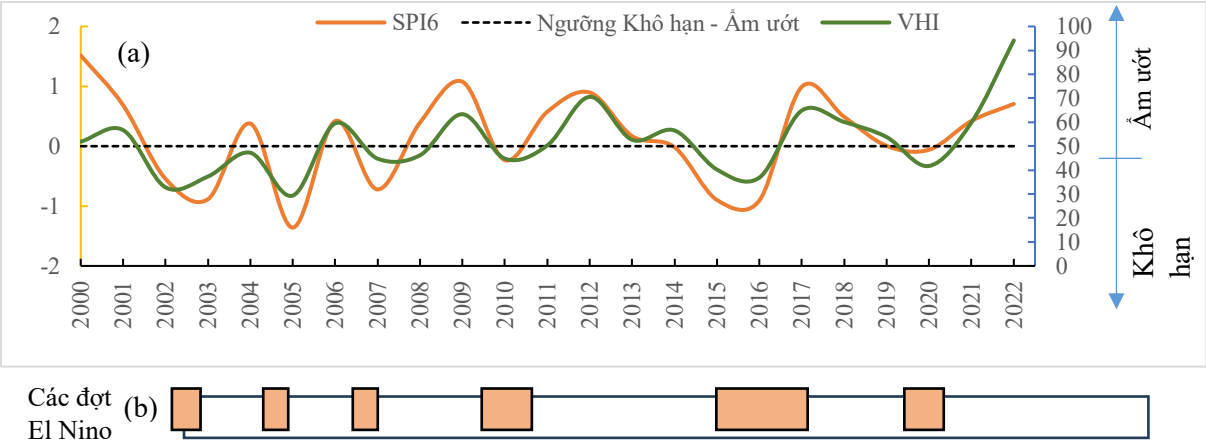
Hình 4. Kết quả tính và phân loại hạn hán theo chỉ số VHI giai đoạn 2000 – 2022.

Thống kê VHI trong tháng 4 theo các pha ẩm ướt, khô hạn cùng mức chênh lệch của chỉ số này được thể hiện trong Hình 6a. Kết quả cho thấy rằng trong các năm diễn ra hạn khí tượng, chỉ số VHI có xu hướng giảm sâu, thường thấp hơn 40, phản ánh rõ tình trạng suy giảm sức khỏe thực vật. Cụ thể, trong các năm 2005 và 2016, VHI trung bình toàn lưu vực đạt mức thấp nhất trong chuỗi nghiên cứu và được xem là năm khô hạn điển hình.

Sự tương ứng cao giữa biến động SPI6 và VHI, thể hiện qua hình dạng đường cong và các đỉnh/đáy tương đồng, khẳng định tính hiệu quả của việc kết hợp hai chỉ số này trong giám sát hạn hán nông nghiệp. Mức độ nhạy cảm cao của thảm thực vật với điều kiện khí tượng được thể hiện rõ qua sự chênh lệch đáng kể giữa các giai đoạn ẩm ướt và khô hạn. Xu hướng biến động này trùng khớp với các đợt El Niño hoạt động mạnh, như được minh họa trong Hình 6b. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về tác động của ENSO đến Tây Nguyên và vùng Đông Nam Á [20, 22], tuy nhiên cần có các nghiên cứu chuyên sâu hơn để phân tích chi tiết các cơ chế tác động của ENSO.



Hình 5. Tỉ lệ diện tích (%) theo các cấp độ hạn giai đoạn 2000 – 2022.

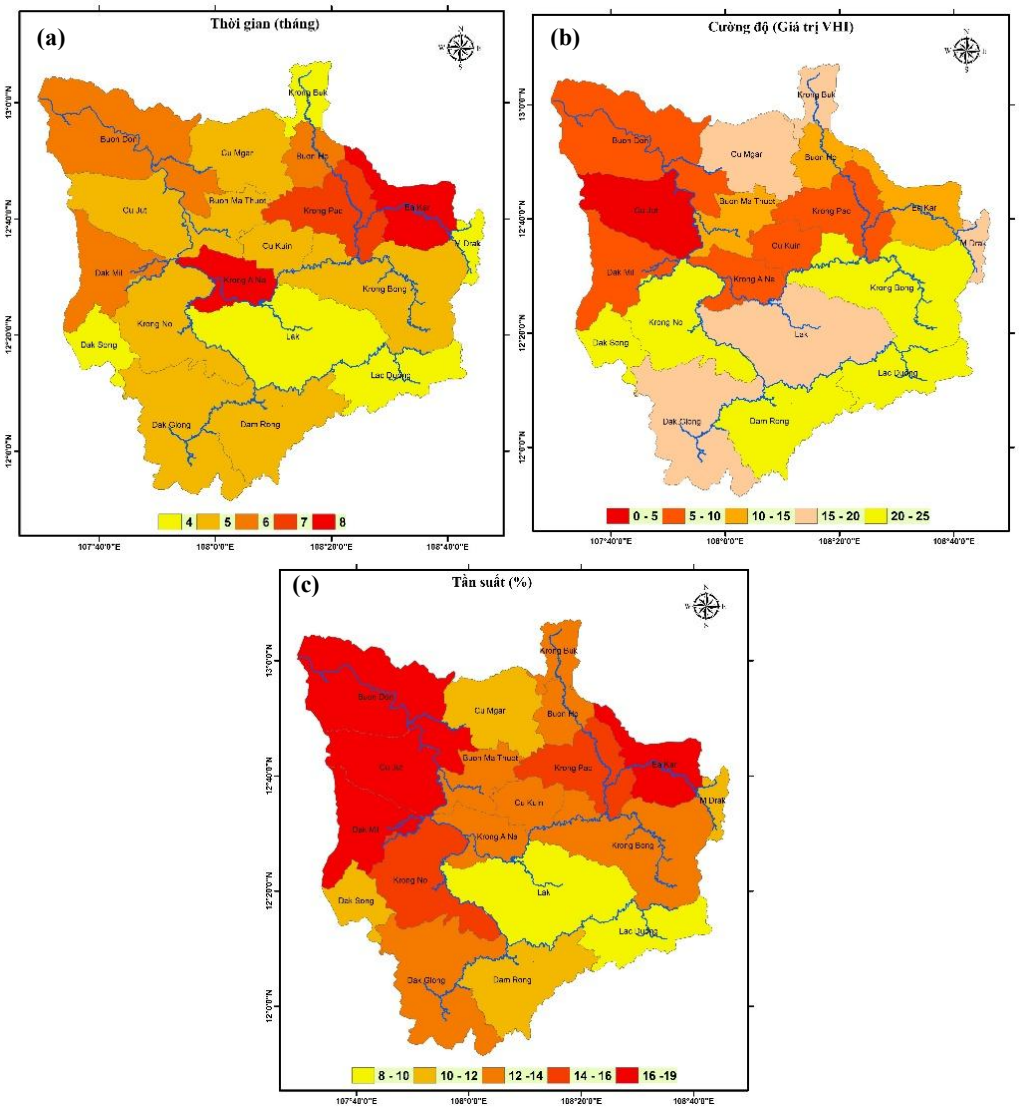


Hình 6. (a) Diễn biến chỉ số SPI6 và VHI giai đoạn 2000 – 2022; (b) Các đợt El Nino xảy ra được tham khảo từ các nghiên cứu khác [20, 51].

3.3. Phân bố các đặc trưng hạn theo không gian

Trong nghiên cứu này, các đặc trưng hạn hán được phân tích dựa trên chuỗi dữ liệu VHI trung bình theo đơn vị hành chính cấp huyện, với số liệu hàng tháng trong giai đoạn 2000–2022. Một đợt hạn hán được xác định khi giá trị VHI nhỏ hơn 40 và duy trì liên tiếp trong thời gian tối thiểu 3 tháng [45, 52]. Dựa trên điều kiện này, ba đặc trưng chính được tính toán gồm: i) Thời gian kéo dài đợt hạn được xác định là số tháng liên tiếp có VHI < 40 và lấy giá trị lớn nhất trong toàn chuỗi nghiên cứu làm đại diện; ii) Cường độ hạn được xác định bằng giá trị VHI thấp nhất ghi

nhận được trong các đợt hạn đã phát hiện, phản ánh mức độ khô hạn nghiêm trọng nhất tại mỗi khu vực; và iii) Tần suất hạn được tính bằng tỷ lệ phần trăm số tháng xảy ra hạn so với tổng số tháng quan sát. Các tham số này được tính toán và xây dựng bản đồ phân bố theo cấp huyện, kết quả được minh họa trong Hình 7.



Hình 7. Bản đồ phân bố thời gian (a), cường độ (b) và tần suất (c) hạn hán được tính từ giá trị VHI < 40, kéo dài ≥ 3 tháng, trong giai đoạn 2000–2022.

Về thời gian (Hình 7a), kết quả cho thấy xu hướng phân bố không gian rõ rệt của thời gian hạn hán theo hướng Bắc-Nam. Các khu vực phía Bắc lưu vực ghi nhận thời gian hạn kéo dài từ 6-8 tháng, trong khi các khu vực phía Nam có thời gian hạn ngắn hơn, từ 4-5 tháng. Đáng chú ý, một số huyện như Ea Kar, Krông Pac và Krông Ana chịu hạn hán kéo dài 7-8 tháng, khiến hoạt động sản xuất nông nghiệp và sinh hoạt của người dân bị ảnh hưởng nghiêm trọng.

Cường độ hạn hán trên Hình 7b cho thấy sự khác biệt về mức độ chịu ảnh hưởng của hạn theo

không gian. Chỉ số VHI trong khoảng 0 -10 thể hiện khu vực bị ảnh hưởng hạn nghiêm trọng thuộc các huyện nằm ở Tây Bắc như Buôn Đôn, Cư Jút, Đắk Mil và một số huyện ở trung tâm lưu vực như Krông Ana, Cư Kuin, Krông Pắc. Các khu vực bị ảnh hưởng hạn trung bình (giá trị VHI từ 20 – 25) thuộc các huyện phía Đông Nam, nơi diện tích rừng chiếm đa số như Đam Rông, Lạc Dương, Krông Bông, Đắk Song, Krông Nô. Còn các huyện còn lại là nơi cường độ hạn được xác định là hạn nặng.

Về tần suất xuất hiện hạn hán tại lưu vực được thể hiện trong Hình 7c. Biểu đồ cho thấy tần suất xảy ra hạn hán một số nơi là khá cao, tập trung ở khu vực hạ lưu phía tây bắc của lưu vực (14 đến 19%) thuộc các huyện Buôn Đôn, Cư Jut, Đắk Mil, Krông Nô và Ea Kar, Krông Pac. Hai huyện ở phía Đông nam của lưu vực khả năng xảy ra hạn hán thấp (8 đến 10%) là Lạc Dương và huyện Lắk. Tần suất xảy ra hạn hán ở mức trung bình (10 đến 14%) được phân bố ở các khu vực ở trung tâm lưu vực.

Tổng hợp phân tích không gian của ba tham số trên cho thấy hạn hán không chỉ có sự phân bố không đồng đều theo không gian mà còn có xu hướng nghiêm trọng hơn tại các khu vực trung và hạ lưu của lưu vực. Các khu vực này thường xuyên trải qua hạn kéo dài trên 6 tháng với cường độ cao và tần suất xảy ra hạn hán chiếm từ 14% đến 19% trong thời gian nghiên cứu. Trong khi đó, khu vực phía Đông nam có mức ảnh hưởng thấp hơn nhưng vẫn ghi nhận hạn hán xảy ra từ 8% đến 10% thời gian nghiên cứu. Sự phân bố này phản ánh ảnh hưởng của các yếu tố khí hậu, chế độ thủy văn, loại hình sử dụng đất và thổ nhưỡng đặc thù của từng vùng. Ở các khu vực có cường độ hạn hán cao, sự suy giảm độ ẩm đất có thể tác động tiêu cực đến hệ sinh thái và nông nghiệp, đặc biệt là các cây trồng dài ngày như cà phê, hồ tiêu và cao su. Điều này đặt ra yêu cầu cấp bách về các giải pháp thích ứng, bao gồm điều chỉnh hệ thống canh tác, sử dụng giống cây trồng chịu hạn và cải thiện các biện pháp quản lý tài nguyên nước.

3.4. Đánh giá ảnh hưởng hạn hán đến một số loại đất nông nghiệp

Để đánh giá tác động của hạn hán đến diện tích đất nông nghiệp cho một số loại cây trồng, nghiên cứu sử dụng bản đồ hiện trạng sử dụng đất kết hợp với bản đồ phân hạng mức độ hạn hán trong 2 năm hạn nghiêm trọng là 2005 và 2016. Sử dụng công cụ phân tích không gian trên Arcgis để trích lọc các thông tin về diện tích các mức độ khô hạn cho các loại đất trồng cây lâu năm, đất trồng cây hàng năm và đất trồng lúa. Kết quả diện tích khô hạn trung bình của năm 2005 và 2016 được thể hiện trong Bảng 1 và Hình 7.

Bảng 1. Diện tích ở các mức độ khô hạn nhóm đất nông nghiệp trong 2 đợt hạn nặng

Các nhóm đất nông nghiệp		Hạn nghiêm trọng	Hạn nặng	Hạn vừa	Hạn nhẹ	Không hạn	Tổng diện tích
Đất trồng cây lâu năm (CLN)	Diện tích (ha)	60409	46615	48186	45412	139379	340000
	Tỷ lệ (%)	17,77	13,71	14,17	13,36	40,99	
Đất trồng cây hàng năm (CHN)	Diện tích (ha)	21625	17152	13922	11854	26546	91100
	Tỷ lệ (%)	23,74	18,83	15,28	13,01	29,14	
Đất trồng lúa (LUC)	Diện tích (ha)	11704	10162	9327	8406	11201	50800
	Tỷ lệ (%)	23,04	20,00	18,36	16,55	22,05	

Đối với đất trồng cây hàng năm (CHN): đây là nhóm đất chịu tác động mạnh nhất, với tổng cộng gần 43% diện tích bị hạn nghiêm trọng và hạn nặng. Đặc điểm sinh học của cây hàng năm với thời gian sinh trưởng ngắn, nhu cầu nước cao tập trung trong giai đoạn phát triển làm nhóm này dễ tổn thương khi thiếu nước kéo dài. Theo UNDP, trong đợt hạn lịch sử 2015–2016 có hơn 42.400 ha cây hàng năm bị ảnh hưởng[17], thiệt hại kinh tế ước tính lên tới 60 triệu USD [14].

Việc không có hệ thống tưới ổn định cũng góp phần làm gia tăng mức độ nhạy cảm với hạn ở nhóm cây trồng này.

Đối với đất trồng lúa (LUC): nhóm đất này cũng bị tác động rõ rệt, với tổng diện tích bị hạn nghiêm trọng và hạn nặng lên tới 43,04% (lần lượt là 23,04% và 20,00%). Mặc dù lúa thường được canh tác ở các vùng có hệ thống thủy lợi, tuy nhiên trong các năm hạn khốc liệt, lượng nước tích trữ tại hồ chứa và dòng chảy trên sông đều suy giảm, dẫn đến tình trạng thiếu nước phục vụ sản xuất. Theo Tran và các cộng sự, năm 2016 gần 7.100 ha lúa ở Tây Nguyên phải bỏ hoang vì không đủ nước tưới, hơn 95.000 ha cây trồng khác thiếu nước kéo dài[18]. Khả năng điều tiết nước bị hạn chế làm cho cây lúa – vốn phụ thuộc hoàn toàn vào nguồn nước – trở nên dễ tổn thương trong giai đoạn từ gieo sạ đến trổ bông, ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất.

Nhóm đất trồng cây lâu năm (CLN): có khả năng chống chịu tốt hơn, tỷ lệ diện tích bị hạn nghiêm trọng và hạn nặng thấp hơn, lần lượt là 17,77% và 13,71%, tổng cộng 31,48%. Điều này phần nào cho thấy khả năng chống chịu tốt hơn của nhóm cây này trước điều kiện khô hạn nhờ hệ thống rễ phát triển sâu và sinh lý tích nước tốt hơn. Tuy nhiên, với quy mô đất trồng cây lâu năm lớn (340.000 ha) cao hơn nhiều so với đất cây hàng năm (91.100 ha) và đất lúa (50.800 ha) nên diện tích bị hạn (60.000 ha) vẫn rất đáng kể. Các đợt hạn nằm trong những năm có El Niño mạnh (2005, 2010, 2016) đã gây giảm năng suất cà phê 15–30% so với trung bình [16]. Một nghiên cứu điều tra 180 hộ cà phê tại Đăk Lắk cũng cho thấy 39% hộ báo cáo giảm sản lượng dưới 10%, 48% hộ giảm 10–15% [14]. Theo báo cáo của Thường trực Ban Chỉ đạo Tây Nguyên, trong mùa khô 2015 -2016 toàn vùng Tây Nguyên đã có khoảng 115.065 ha câycà phê bị thiếu nước tưới, khô hạn nghiêm trọng, gây giảm năng suất từ 30% đến 70% hoặc dẫn đến tình trạng cây chết khô, mất trắng hoàn toàn.[53].

Từ phân tích trên, có thể thấy hạn hán tại lưu vực sông Srêpốk phân hóa mạnh theo loại hình canh tác. Nhóm cây hàng năm và cây lúa là những đối tượng dễ bị tổn thương nhất, trong khi cây lâu năm có khả năng chống chịu cao hơn nhưng vẫn tiềm ẩn rủi ro thiệt hại lớn. Những kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong việc đề xuất các giải pháp thích ứng theo từng nhóm cây trồng, bao gồm điều chỉnh thời vụ, lựa chọn giống chịu hạn, áp dụng kỹ thuật tưới tiết kiệm và xây dựng hệ thống cảnh báo sớm, nhằm giảm nhẹ thiệt hại và tăng khả năng chống chịu trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng tại lưu vực sông Srêpốk.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá đặc điểm diễn biến hạn hán theo không gian – thời gian và tác động của hạn hán đến sản xuất nông nghiệp tại lưu vực sông Srêpốk trong giai đoạn 2000–2022 thông qua việc tích hợp chỉ số Sức khỏe Thực vật (VHI) và chỉ số Lượng mưa Chuẩn hóa (SPI). Kết quả nghiên cứu đưa ra một số kết luận quan trọng như sau:

Thứ nhất, phân tích tương quan giữa VHI và SPI cho thấy VHI phản ánh rất nhạy cảm với hạn khí tượng, đặc biệt trong mùa khô. Trong đó, tháng 4, tháng cuối mùa khô, được xác định là thời điểm thể hiện rõ nhất ảnh hưởng của hạn lên thảm thực vật. Chỉ số SPI6 được xác định là quy mô thời gian phù hợp nhất để giám sát hạn khí tượng, giúp phát hiện sớm các tác động đến nông nghiệp.

Thứ hai, hạn hán tại lưu vực Srêpốk thể hiện xu hướng rõ rệt về không gian và thời gian, với năm hạn nghiêm trọng xuất hiện theo chu kỳ khoảng 3–5 năm thường trùng khớp với các đợt El Niño hoạt động mạnh. Phân tích không gian cho thấy các đặc trưng hạn như thời gian kéo dài, cường độ và tần suất tập trung cao ở khu vực trung và hạ lưu phía tây bắc lưu vực.

Thứ ba, đánh giá tác động đến sử dụng đất nông nghiệp cho thấy nhóm cây trồng hàng năm và cây lúa là hai nhóm có độ nhạy cảm cao nhất với hạn hán, với hơn 43% diện tích bị ảnh hưởng ở mức hạn nặng và nghiêm trọng trong các năm hạn điển hình. Mặc dù cây lâu năm có hệ thống rễ sâu và tỷ lệ bị hạn thấp hơn (31,48%), nhưng với tổng quy mô diện tích lớn, đây lại là nhóm có tổng diện tích bị ảnh hưởng lớn nhất về giá trị tuyệt đối. Điều này cho thấy ngay cả nhóm cây

có khả năng chịu hạn tốt vẫn dễ bị tổn thương khi hạn kéo dài và trùng với giai đoạn sinh trưởng quan trọng.

Tổng thể, các kết quả nghiên cứu đã cung cấp bằng chứng rõ ràng cho thấy rủi ro hạn hán tại lưu vực sông Srêpốk đang có xu hướng gia tăng cả về cường độ lẫn phạm vi ảnh hưởng dưới tác động của biến đổi khí hậu và áp lực sử dụng đất. Việc kết hợp sử dụng chỉ số VHI và SPI6 cho thấy hiệu quả cao trong giám sát và cảnh báo sớm hạn hán nông nghiệp. Từ đó, các giải pháp thích ứng cần được thúc đẩy, bao gồm: đa dạng hóa cây trồng, sử dụng giống chịu hạn, áp dụng kỹ thuật tưới tiết kiệm, quản lý nước theo vùng sinh thái và xây dựng hệ thống cảnh báo hạn hán theo thời gian thực nhằm nâng cao khả năng chống chịu cho hệ thống nông nghiệp trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả bày tỏ lòng tri ân và tưởng nhớ đến PGS.TS. Đào Nguyên Khôi, người đã có những góp ý quý báu về ý tưởng và nội dung để xây dựng bản thảo này.

Tài liệu tham khảo

[1] S. Park, J. Im, E. Jang, J. Rhee, Drought Assessment and Monitoring Through Blending of Multi-sensor Indices Using Machine Learning Approaches for Different Climate Regions, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 216, 2016, pp. 157-169, https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011.

[2] C. Parmesan, M. D. Morecroft, Y. Trisurat, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, GIEC, 2022, https://hal.science/hal-03774939v1.

[3] M. L. Parry, Climate Change 2007-Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Vol. 4, 2007.

[4] U. Nations, The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security, Food and Agriculture Organization, 2017.

[5] A. F. V. Loon, Hydrological Drought Explained, Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, Vol. 2, No. 4, 2015, pp. 359-392, https://doi.org/10.1002/wat2.1085.

[6] D. A. Wilhite, M. H. Glantz, Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions, Water International, Vol. 10, No. 3, 1985, pp. 111-120, https://doi.org/10.1080/02508068508686328.

[7] A. K. Mishra, V. P. Singh, A Review of Drought Concepts, Journal of Hydrology, Vol. 391, No. 1-2, 2010, pp. 202-216, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.

[8] D. Manatsa, G. Mukwada, E. Siziba, T. Chinyanganya, Analysis of Multidimensional Aspects of Agricultural Droughts in Zimbabwe Using The Standardized Precipitation Index (SPI), Theoretical and Applied Climatology, Vol. 102, 2010, pp. 287-305, https://doi.org/10.1007/s00704-010-0262-2.

[9] S. M. V. Serrano, S. M. Quiring, M. P. Gallardo, S. Yuan, F. D. Castro, A Review of Environmental Droughts: Increased Risk under Global Warming?, Earth-Science Reviews, Vol. 201, 2020, pp. 102953, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953.

[10] J. Sheffield, E. F. Wood, M. L. Roderick, Little Change in Global Drought Over the Past 60 Years, Nature, Vol. 491, No. 7424, 2012, pp. 435-438, https://doi.org/10.1038/nature11575.

[11] A. Dai, K. E. Trenberth, T. Qian, A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming, Journal of Hydrometeorology, Vol. 5, No. 6, 2004, pp. 1117-1130, https://doi.org/10.1175/JHM-386.1.

[12] T. Chen, G. Xia, T. Liu, W. Chen, D. Chi, Assessment of Drought Impact on Main Cereal Crops Using A Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Liaoning Province, China, Sustainability, Vol. 8, No. 10, 2016, pp. 1069, https://doi.org/10.3390/su8101069.

[13] M. A. Miyan, Droughts in Asian Least Developed Countries: Vulnerability and Sustainability, Weather and Climate Extremes, Vol. 7, 2015, pp. 8-23, https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.06.003.

[14] P. Le Nguyen, M. D. Nguyen, Drought Adaptation and Coping Strategies among Coffee Farmers in the Central Highlands of Vietnam, Journal of Agriculture and Environmental Sciences, Vol. 8, No. 1, 2019, pp. 52-66, https://doi.org/10.15640/jaes.v8n1a6.

[15] P. S. Baker, Coffee and Climate Change in the Central Highlands of Vietnam, Coffee&Climate, Hanns R. Neumann Stiftung, Germany, 2016.

[16] T. Tiemann et al., Crop Nutrition for Vietnamese Robusta Coffee, Better Crops with Plant Food, Vol. 102, No. 3, 2018, pp. 20-23, https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193173063 (accessed on: March 10th, 2025).

[17] UNDP, Vietnam Drought and Saltwater Intrusion: Transitioning from Emergency to Recovery, Vietnam: UNDP (United Nations Development Programme), 2016.

[18] T. V. Tran, D. X. Tran, D. B. Nguyen, Agricultural Drought in the Vietnamese Central Highlands at 1-km Resolution: Monthly and Annual Datasets, Data in Brief, Vol. 48, 2023, pp. 109194, https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109194.

[19] T. A. Räsänen, M. Kummu, Spatiotemporal Influences of ENSO on Precipitation and Flood Pulse in the Mekong River Basin, Journal of Hydrology, Vol. 476, 2013, pp. 154-168, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.028.

[20] W. R. Sutton, J. P. Srivastava, M. Rosegrant, J. Thurlow, L. Sebastian, Striking a Balance: Managing El Niño and La Niña in Vietnam's Agriculture, World Bank, 2019, 103 pp, https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20203183816 (accessed on: March 10th, 2025).

[21] T. N. Thi et al., Climate Analogue and Future Appearance of Novel Climate in Southeast Asia, International Journal of Climatology, Vol. 41, 2021, pp. E392-E409, https://doi.org/10.1002/joc.6693.

[22] L. V. Viet, Development of A New Enso Index to Assess the Effects of Enso on Temperature over Southern Vietnam, Theoretical and Applied Climatology, Vol. 144, 2021, pp. 1119-1129, https://doi.org/10.1007/s00704-021-03591-3.

[23] W. C. Palmer, Meteorological Drought, US, Weather Bureau Res. Paper, Vol. 45, 1965, pp. 1-58, https://cir.nii.ac.jp/crid/1570291225545846528.

[24] T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist, The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales, Proceedings of The 8th Conference on Applied Climatology, Vol. 17, No. 22, 1993, pp. 179-183, https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf (accessed on: March 10th, 2025).

[25] S. M. V. Serrano, S. Beguería, J. I. L. Moreno, A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Journal of Climate, Vol. 23, No. 7, 2010, pp. 1696-1718, https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1.

[26] Z. Hao, X. Yuan, Y. Xia, F. Hao, V. P. Singh, An Overview of Drought Monitoring and Prediction Systems at Regional and Global Scales, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 98, No. 9, 2017, pp. 1879-1896, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00149.1.

[27] A. A. Kouchak et al., Remote Sensing of Drought: Progress, Challenges and Opportunities, Reviews of Geophysics, Vol. 53, No. 2, 2015, pp. 452-480, https://doi.org/10.1002/2014RG000456.

[28] M. C. Anderson, C. A. Zolin, C. R. Hain, K. Semmens, M. T. Yilmaz, F. Gao, Comparison of Satellite-Derived LAI and Precipitation Anomalies over Brazil with A Thermal Infrared-Based Evaporative Stress Index for 2003–2013, Journal of Hydrology, Vol. 526, 2015, pp. 287-302, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.005.

[29] F. N. Kogan, Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 76, No. 5, 1995, pp. 655-668, https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076%3C0655:DOTLIT%3E2.0.CO;2.

[30] F. N. Kogan, Global Drought Watch from Space, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 78, No. 4, 1997, pp. 621-636, https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C0621:GDWFS%3E2.0.CO;2.

[31] L. Zhang, W. Jiao, H. Zhang, C. Huang, Q. Tong, Studying Drought Phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 Using Various Drought Indices, Remote Sensing of Environment, Vol. 190, 2017, pp. 96-106, https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.010.

[32] F. Zambrano, M. L. Saavedra, K. Verbist, O. Lagos, Sixteen Years of Agricultural Drought Assessment of the Biobío Region in Chile Using A 250m Resolution Vegetation Condition Index (VCI), Remote Sensing, Vol. 8, No. 6, 2016, pp. 530, https://doi.org/10.3390/rs8060530.

[33] F. Kogan, W. Guo, W. Yang, Drought and Food Security Prediction from NOAA New Generation of Operational Satellites, Geomatics, Natural Hazards and Risk, Vol. 10, No. 1, 2019, pp. 651-666, https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1541257.

[34] H. Imran et al., Impact of Land Cover Changes on Land Surface Temperature and Human Thermal Comfort in Dhaka City of Bangladesh, Earth Systems and Environment, Vol. 5, 2021, pp. 667-693, https://doi.org/10.1007/s41748-021-00243-4.

[35] O. Rojas, A. Vrieling, F. Rembold, Assessing Drought Probability for Agricultural Areas in Africa with Coarse Resolution Remote Sensing Imagery, Remote Sensing of Environment, Vol. 115, No. 2, 2011, pp. 343-352, https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.006.

[36] L. V. Viet, T. T. T. Thuy, Improving the Quality of Coffee Yield Forecasting in Dak Lak Province, Vietnam, through the Utilization of Remote Sensing Data, Environmental Research Communications, Vol. 5, No. 9, 2023, pp. 095011, https://doi.org/10.1088/2515-7620/acf6fd.

[37] N. V. Hiep, N. T. T. Thao, L. V. Viet, H. C. Luc, L. H. Ba, Affecting of Nature and Human Activities on the Trend of Vegetation Health Indices in Dak Nong Province, Vietnam, Sustainability, Vol. 15, No. 7, 2023, pp. 5695, https://doi.org/10.3390/su15075695.

[38] V. V. Luong, D. H. Bui, Evaluation of Models and Drought-Wetness Factors Contributing to Predicting the Vegetation Health Index in Dak Nong Province, Vietnam, Environmental Research Communications, Vol. 6, No. 4, 2024, pp. 045005, https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad39a4.

[39] T. V. Thuong, C. T. Xuan, N. T. Hieu, P. V. Tuan, D. Mon, Examininging Drought Intensity in Central Highlands during the 2001–2020 period using Daily MODIS Time–Series Imagery, Journal of Hydro-Meteorology, Vol. 733, 2022, pp. 1-14, https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(733).1-14 (in Vietnamese)..

[40] Statistical Data, Statistical Yearbook of Vietnam 2018, https://www.nso.gov.vn/en/data-and-statistics/2019/10/statistical-yearbook-of-vietnam-2018/, 2019 (accessed on: March 10th, 2025).

[41] B. N. Holben, Characteristics of Maximum-Value Composite Images from Temporal AVHRR Data, International Journal of Remote Sensing, Vol. 7, No. 11, 1986, pp. 1417-1434, https://doi.org/10.1080/01431168608948945.

[42] J. Li, K. Fan, L. Zhou, Satellite Observations of El Niño Impacts on Eurasian Spring Vegetation Greenness during The Period 1982–2015, Remote Sensing, Vol. 9, No. 7, 2017, pp. 628, https://doi.org/10.3390/rs9070628.

[43] H. Li, Y. Li, Y. Gao, C. Zou, S. Yan, J. Gao, Human Impact on Vegetation Dynamics around Lhasa, Southern Tibetan Plateau, China, Sustainability, Vol. 8, No. 11, 2016, pp. 1146, https://doi.org/10.3390/su8111146.

[44] H. Chu, S. Venevsky, C. Wu, M. Wang, NDVI-Based Vegetation Dynamics and Its Response to Climate Changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015, Science of the Total Environment, Vol. 650, 2019, pp. 2051-2062, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.115.

[45] F. Kogan, L. Salazar, L. Roytman, Forecasting Crop Production Using Satellite-Based Vegetation Health Indices in Kansas, USA, International Journal of Remote Sensing, Vol. 33, No. 9, 2012, pp. 2798-2814, https://doi.org/10.1080/01431161.2011.621464.

[46] H. C. Luc, L. V. Viet, B. D. Hung, Determining Suitable Meteorological Drought and Vegetation Indices for Monitoring Drought and Crop Yield in Srepok River Basin, Vietnam, Agriculture and Natural Resources, Vol. 59, No. 1, 2025, https://doi.org/10.34044/j.anres.2025.59.2.09.

[47] N. V. Tuan et al., Spatio-Temporal Analysis of Drought in the North-Eastern Coastal Region of Vietnam Using the Standardized Precipitation Index (SPI), Atmospheric and Climate Science, Vol. 13, No. 2, 2023, pp. 175-200, https://doi.org/10.4236/acs.2023.132011.

[48] T. V. Ty et al., Assessment of Relationship Between Climate Change, Drought, and Land Use and Land Cover Changes in A Semi-Mountainous Area of the Vietnamese Mekong Delta, Land, Vol. 11, No. 12, 2022, pp. 2175, https://doi.org/10.3390/land11122175.

[49] M. Vu, V. Raghavan, S. Y. Liong, Ensemble Climate Projection for Hydro-Meteorological Drought over A River Basin in Central Highland, Vietnam, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 19, No. 2, 2015, pp. 427-433, https://doi.org/10.1007/s12205-015-0506-x.

[50] N. Q. Thi, A. Govind, T. V. Ha, Spatial and Temporal Variability of Soil Moisture Active and Passive (SMAP) Droughts and Their Impacts on Vegetation in the Central Highlands of Vietnam, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 197, No. 2, 2025, pp. 203, https://doi.org/10.1007/s10661-025-13622-5.

[51] N. L. Trang, L. L. Anh, L. A. Trung, and C. T. T. Huong, Research on Relationship between ENSO and The Intensity of the Aleutian Low, Journal of Hydro-Meteorology, Vol. 750, No. 1, 2023, pp. 78-88, https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023(750(1)).78-88 (in Vietnamese).

[52] E. Gidey, O. Dikinya, R. Sebego, E. Segosebe, A. Zenebe, Analysis of the Long-term Agricultural Drought Onset, Cessation, Duration, Frequency, Severity and Spatial Extent Using Vegetation Health Index (VHI) in Raya and Its Environs, Northern Ethiopia, Environmental Systems Research, Vol. 7, 2018, pp. 1-18, https://doi.org/10.1186/s40068-018-0115-z.

[53] Agriculture and Environment, The Central Highlands Faces a Severely Poor Coffee Harvest, Available at: https://nongnghiepmoitruong.vn/tay-nguyen-doi-dien-vu-ca-phe-that-bat-nang-d173609.html (accessed on: March 10th, 2025).