



Artículo Original

Variaciones estacionales en la vegetación riparia de la subcuenca “La Mula”, Norte de Costa Rica

Seasonal variations in the riparian vegetation of the sub-basin “La Mula”, North of Costa Rica

Yefrin Valladares^{a,b,1} , Laura Benegas^b , William Jefferson Watler Reyes^b , Claudia Sepulveda^b, Néstor Valladares^c 

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Politécnica de Honduras, Danlí, Honduras

^bEscuela de Posgrado, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica

^cEscuela de Biología, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, UNAH, Tegucigalpa, Honduras

Historia del artículo:

Recibido: 22 junio 2023

Revisado: 29 junio 2023

Aceptado: 8 agosto 2023

Publicado: 30 agosto 2023

Palabras clave

Clima

Cultivos

Medio ambiente

Uso de la tierra

Keywords

Climate

Crops

Environment

Land use

RESUMEN. Introducción. Las actividades agropecuarias y las anomalías atmosféricas representan un alto porcentaje de alteraciones en ecosistemas riparios, modificando rápidamente servicios ecosistémicos, como la pérdida de la calidad del entorno. Esta investigación midió el efecto de variaciones climáticas sobre el uso del suelo agropecuario asociados a la zona riparia. **Métodos.** Con imágenes Landsat 8 y el preprocesamiento de estas en SAGA GIS, se realizó la extracción de datos del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) por mes durante el 2022. Se procedió a realizar análisis estadísticos en RStudio para test Kruskal Wallis (KW). Dentro del método se analizaron los tipos de correlaciones existentes entre los datos atmosféricos y los NDVI. **Resultados.** La dispersión de los datos en usos de suelo y vegetación adyacente (Va) presentaron valores similares a lo largo del año, considerando que esta última (Va) mostraron valores asociados a vegetación media. Datos del test KW indicaron un $p = 0.0016$ refutando la existencia de diferencias entre los usos del suelo y la Va. Posteriormente el test post hoc indicó que estadísticamente las diferencias únicamente fueron Vegetación adyacente a Ganadería (Va-G)/ Caña (C), Va-G/Sandía (S) y Ganadería (G) /C. Por otra parte, el NDVI en G fue inversamente proporcional a la temperatura ($\rho = -0.62$, valor de la correlación negativa entre el uso del suelo y la temperatura). **Conclusión.** En muchos de los casos, la Va a usos de suelo como Pastizales (P), S y C no presentó diferencias significativas. Un análisis comparativo entre el conjunto de datos indicó que G y Va-G fueron suelos con mejor estado de la vegetación en la subcuenca La Mula.

ABSTRACT. Introduction. Agricultural activities and atmospheric anomalies represent a high percentage of alterations in riparian ecosystems, rapidly modifying ecosystem services, such as the loss of environmental quality. This research measured the effect of climatic variations on the use of agricultural land use associated with the riparian zone. **Methods:** With the use of Landsat 8 images and their preprocessing in SAGA GIS, data extraction from the Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) per month was performed in 2022. Statistical analyses were done in RStudio for Kruskal Wallis (KW) test. Within the method, the types of correlations between atmospheric data and NDVI were analyzed. **Results.** The dispersion of the data in land uses and adjacent vegetation (Va) presented similar values throughout the year, considering that the latter (Va) showed values associated with average vegetation. Data from the KW test indicated a $p = 0.0016$ refuting the existence of differences between land uses and Va. A Post hoc test indicated statistically differences were only Vegetation adjacent to Livestock (Va-G) / Cane (C), Va-G / Watermelon (S) and Livestock (G) / C. On the other hand, NDVI in G was inversely proportional to temperature ($\rho = -0.62$, value of the negative correlation between land use and temperature). **Conclusion:** In many cases, the Va to land uses such as Grasslands (P), S and C did not present significant differences. A comparative analysis between the dataset indicated that G and Va-G were soils with better vegetation status in the La Mula sub-basin.

1. Introducción

La cuenca hidrográfica es una unidad de planificación y gestión, con múltiples microecosistemas (Pinedo-Álvarez et al., 2011). Las regiones de transición entre el medio edáfico e hídrico son conocidas como zona riparia

y son las primeras en ser afectadas por cambios alóctonos. Dichas zonas son caracterizadas por su bosque, cuya composición está influenciada directamente por el uso del suelo y de la cual poco se ha estudiado (Fu & Burgher, 2015). Tut Si (2016) menciona que, el deterioro de esta zona se da por sustitución del bosque de galería, agricultura, ganadería y los asentamientos urbanos.

¹ Autor correspondiente: yefrin.cruz@uph.edu.hn, Universidad Politécnica de Honduras, Danlí, Honduras

Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5377/innovare.v12i2.16605>

© 2023 Autores. Este es un artículo de acceso abierto publicado por UNITEC bajo la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Desde finales del siglo XX, se ha buscado una forma de monitoreo que permita establecer mecanismos de protección en zonas riparias. Gamon et al. (1995) describe que las herramientas de sensoramiento remotos permitirán a corto y largo plazo la comprensión del medio terrestre. En la actualidad, se ha vuelto una herramienta en el análisis de la vegetación a partir de imágenes satelitales del entorno biofísico (Woodcock et al., 2001).

Estas imágenes satelitales miden la degradación del uso de los suelos y el crecimiento de la vegetación, entre otros (Jiang et al., 2021). La sistematización de información espacial puede medirse a partir de índices (Vega-Araya & Alvarado-Barrantes, 2019) como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) que estima el ascenso/descenso cíclico de la vegetación (Lemenkova, 2021) mediante la reflectancia del dosel usando R-Band 4 y NIR-Band 5 del satélite *Lansat 8* (Olivares & López-Beltrán, 2019).

La región Norte de Costa Rica es una de las áreas en donde la vegetación nativa ha sufrido cambios (Vargas Ulate, 2011). Sitios como el cantón de Bagaces ha tenido el 70% de su superficie a la disposición del uso del suelo en actividades agropecuarias desde los años setenta. Esto ha representado cambios en el paisaje (Spielmann, 1972). Por ejemplo, el Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT), en la cual se encuentra parte de la subcuenca La Mula, tiene un uso del suelo agropecuario, pues casi la mitad del territorio está ocupado por agricultura, pastizales naturales y ganadería (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, 2020).

Según Alfaro (2014) la subcuenca La Mula se encuentra dentro de la zona de vida del bosque húmedo premontano de transición a basal (bh-P6) de clima seco. Entre los meses de diciembre a abril, se presentan precipitaciones de 50mm y entre los meses de mayo a noviembre de hasta 315mm. Todo esto bajo el régimen de precipitaciones del Pacífico Norte costarricense donde las temperaturas son entre $27^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica [IMN], 2011).

Autores como Soria Bances & Quevedo (2019) han estudiado las zonas aledañas y consideran importantes los análisis temporales basados en los servicios ecosistémicos que provee la vegetación. El objetivo de esta investigación fue medir el efecto de los usos del suelo agropecuarios en la vegetación riparia y como las variables atmosféricas influyen sobre los mismos.

2. Métodos

2.1. Área de estudio

La subcuenca La Mula se ubica a $10.40^{\circ}39'40''\text{N}$ y $85.30^{\circ}83'05''\text{O}$, al sur del cantón Bagaces, Guanacaste (Figura 1a). Esta se extiende a lo largo de 5,443.95 ha donde su cauce principal cubre 13.51 km de largo, y se origina a 60 m.s.n.m. al Norte de la subcuenca, dentro de

los límites de la Reserva Biológica (RB) Lomas Barbudal y finaliza al Sur de esta, a 5 m. s.n.m. en el Parque Nacional (PN) Palo Verde (Valladares, 2022).

2.2. Recolección de datos

2.2.1. Sitios de muestreo

Se seleccionaron cuatro usos del suelo agropecuarios a lo largo del cauce principal de la subcuenca como: ganadería (G), cultivos de caña (C), sandía (S) y pastizales (P). También se consideraron, como sitios de muestreo, la vegetación adyacente (Va) al uso del suelo agropecuario.

Dicha vegetación se encuentra opuesta a la zona riparia donde predomina los cuatro usos del suelo mencionados inicialmente. Posteriormente, se realizó la verificación de campo en la subcuenca La Mula con el objetivo de georreferenciar un área de 120 m de largo y 30 m de anchos (Figura 1b). Desde la interfaz agua/suelo de la zona riparia, se extrajeron los píxeles y su información mediante los puntos en SAGA GIS v7.8.2.

Se descargaron 8 imágenes satelitales por meses durante todo 2022, con la información de las bandas 4 y 5 provistas por el satélite *Lansat 8*. Con las imágenes obtenidas, se realizó el preprocesamiento y corte por máscara en SAGA GIS de las imágenes. Durante este proceso, se realizó la homogenización que según Watler (2018) es importante para evitar errores posteriores.

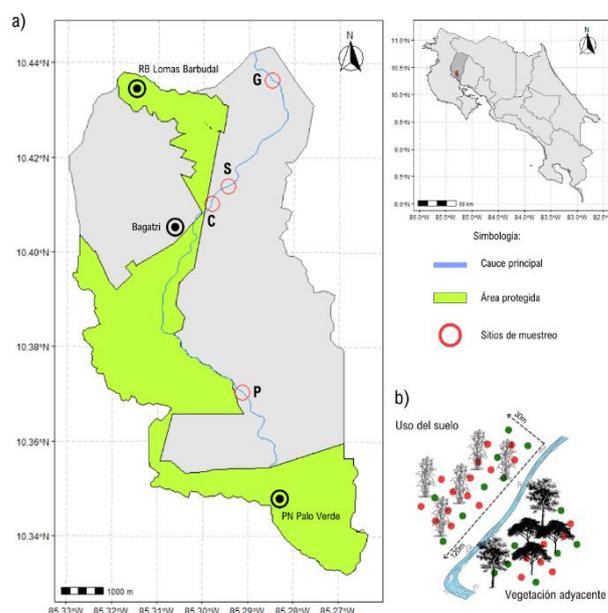


Figura 1. a) Mapa de ubicación de la subcuenca La Mula y b) esquema de toma de datos de NDVI en los sitios de muestreo.

2.2.2. Extracción de información espacial

En este apartado, se procedió a la utilización de RStudio v4.2.3 y los paquetes raster, sf, ggplot2 y gridExtra que permite la visualización y a posteriori calcular el NDVI el cual fue: $ndvi <- (nir-red) / (nir+red)$. Esto se realizó en cada paquete de imágenes por mes. Luego, se procedió a la superposición de la malla de 32 puntos aleatorios sobre el área establecida en la georreferenciación de los usos del suelo (Figura 1b), con la finalidad de extraer los valores de NDVI. Se destacó la selección únicamente de 8 puntos por imagen, donde los que presentan interferencia por nubes fueron eliminados para considerar otro punto en la malla (Vicente Serrano et al., 2013).

Además, se utilizaron los datos de los últimos 10 años (2012-2022) de precipitación, temperatura y humedad relativa de la subcuenca La Mula, obtenidos a través de Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER v2.0.8) que es manejado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés) y que proporciona datos atmosféricos mundiales que serán evaluados en conjunto con los NDVI mediante correlaciones Spearman.

2.3. Análisis estadístico

Con los datos de anomalías atmosféricas (Figuras 2a, 2b y 2c) y NDVI (Figuras 3a, 3b y 3c) se realizó un

análisis descriptivo usando promedios para los datos mensuales. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis que permitió establecer las diferencias significativas entre las varianzas de los usos de suelo y los valores de NDVI. Dicho análisis fue complementado con test post hoc de la prueba de Dunn usando el método de Bonferroni que mostró donde se encontraron las diferencias entre los usos del suelo y la vegetación adyacente (Serrano et al., 2022). Ambos análisis estuvieron bajo un nivel de significancia de $p\ value < 0.05$ (Cuadro 1).

Por último, se aplicó el análisis de correlación de Spearman para observar el tipo de relaciones positivas (+1) o negativas (-1) que existieron entre los valores promedios atmosféricos y el mes para cada uso del suelo según su NDVI (Figura 4).

3. Resultados

En la subcuenca La Mula, los acumulados mensuales en precipitaciones o lluvias mostraron un marcado aumento de las lluvias entre los primeros días de mayo con 264.23mm hasta los 330.47mm de precipitación a finales de junio, seguido de una disminución temporal entre julio, agosto y septiembre de 174.42mm±49.92mm (Figura 2a). Sin embargo, un segundo período de ascenso en las precipitaciones apareció de octubre a noviembre de hasta 501.28mm. Durante el último mes del año, el descenso marcó 18mm, pasando un punto crítico en enero con 0.77mm.

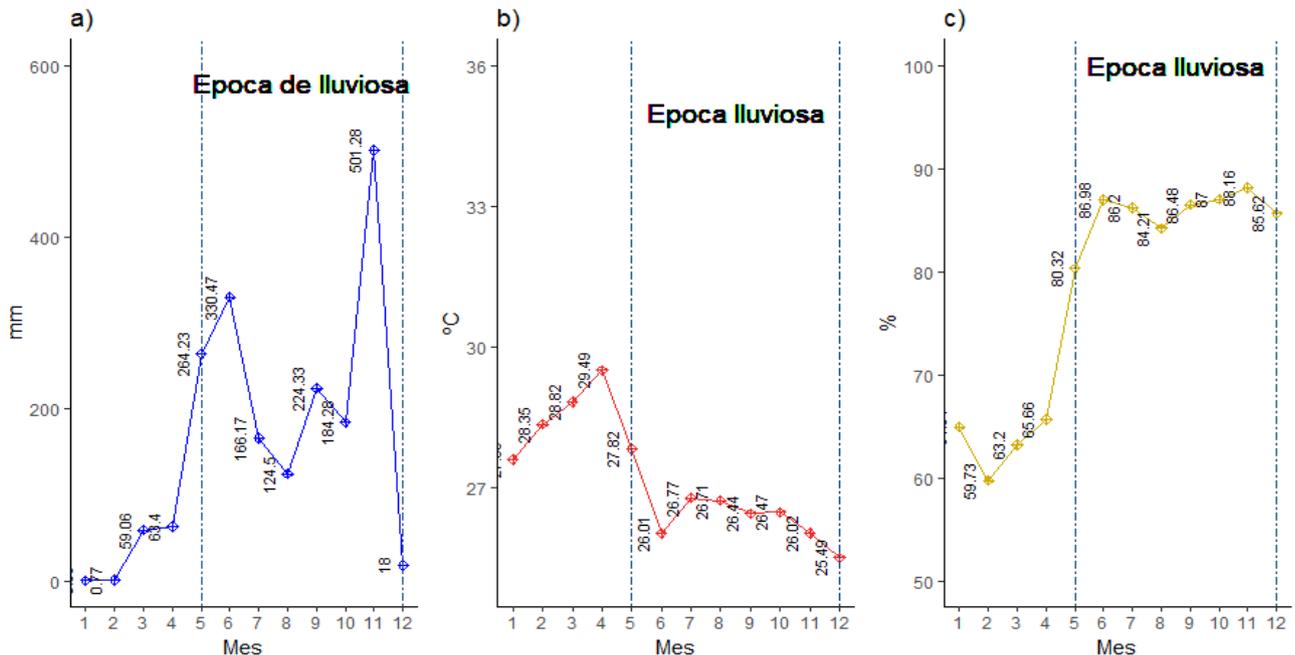


Figura 2. Promedios atmosféricos donde: a) acumulado de precipitación, b) temperatura y c) humedad relativa durante los años de 2012 a 2022 de la subcuenca La Mula.

La Figura 2b muestra la variación mensual de temperaturas (°C). Su incremento se observó claramente en los primeros meses del año, siendo abril el mes más cálido con una temperatura promedio de 29.49°C. Sin embargo, al final de este mismo mes, inició el descenso abrupto hasta junio de 26.01°C; con leves variaciones entre los meses julio a noviembre entre los 0.01±0.76 grados. La humedad relativa se acrecentó en los primeros días del mes de febrero hasta junio llegando a un porcentaje de 86.98% y manteniéndose con variaciones de ±2% hasta noviembre donde a mediados del mismo llegó al 88.16% y disminuyó a finales de este mes (Figura 2c). En contraste, el promedio más bajo de humedad relativa fue de 59.77% obtenidos a finales del mes de enero.

La Figura 3a indica que el uso de suelo G mantuvo valores máximos del NDVI del 0.45 para junio y una mínima en abril de 0.27; mientras que los P, durante el mes de octubre incrementaron hasta el 0.42, y su valor más bajo se ubicó en 0.25 en los meses de abril y agosto. Además, el uso de suelo S se encontró más cercano al valor máximo que presentaron G y P con 0.40; llegando a su punto máximo en septiembre y teniendo una mínima de 0.20 durante dos meses del año (abril y noviembre). Asimismo, el cultivo de caña mantuvo un valor máximo de 0.38 en junio, y presentó un descenso de 0.13 durante el inicio de octubre.

En contraste, la Figura 3b muestra los datos de NDVI de la vegetación adyacente al uso del suelo agropecuario.

La Va-G tuvo el NDVI más alto de todos para estos sitios muestreados con 0.47 durante el mes de junio y su registro mínima fue de 0.31 en agosto. Mientras que Va-S mantuvieron máximos NDVI entre 0.41±0.01 durante octubre y junio. Para el caso de Va-P, el valor mayor de NDVI se presentó en junio y octubre con 0.40 y múltiples registros bajos entre 0.24±0.02 para el primer cuatrimestre del año y septiembre. Por último, Va-C mantuvo una tendencia similar a Va-P y Va-S en cuanto a sus valores máximo de NDVI con 0.39 en mayo, junio y julio, mientras su valor más bajo para este índice fue de 0.13 en agosto.

La Figura 3c muestra que G y Va-G presentaron medianas muy similares de NDVI con 0.39 y 0.40, pero diferencias en la dispersión de estos para G, donde 50% estuvo debajo de la mínima de Va-G que fue de 0.35. Caso similar, se encontró entre S y Va-S, ya que las medianas en NDVI fueron similares con 0.29 y 0.30, manteniendo diferencias en la distribución de sus datos. En el caso de P y Va-P, la mediana de sus datos presentaron diferencias con 0.37 y 0.30, pero con similitud en la distribución de los datos ya que, ambas se encontraron en el rango NDVI de 0.40-0.24. C y Va-C no tuvieron diferencias marcadas en sus medianas, pero se marcó una dispersión de sus datos donde más del 60% del NDVI de C se encontraron por debajo de la mínima de Va-C de 0.27.

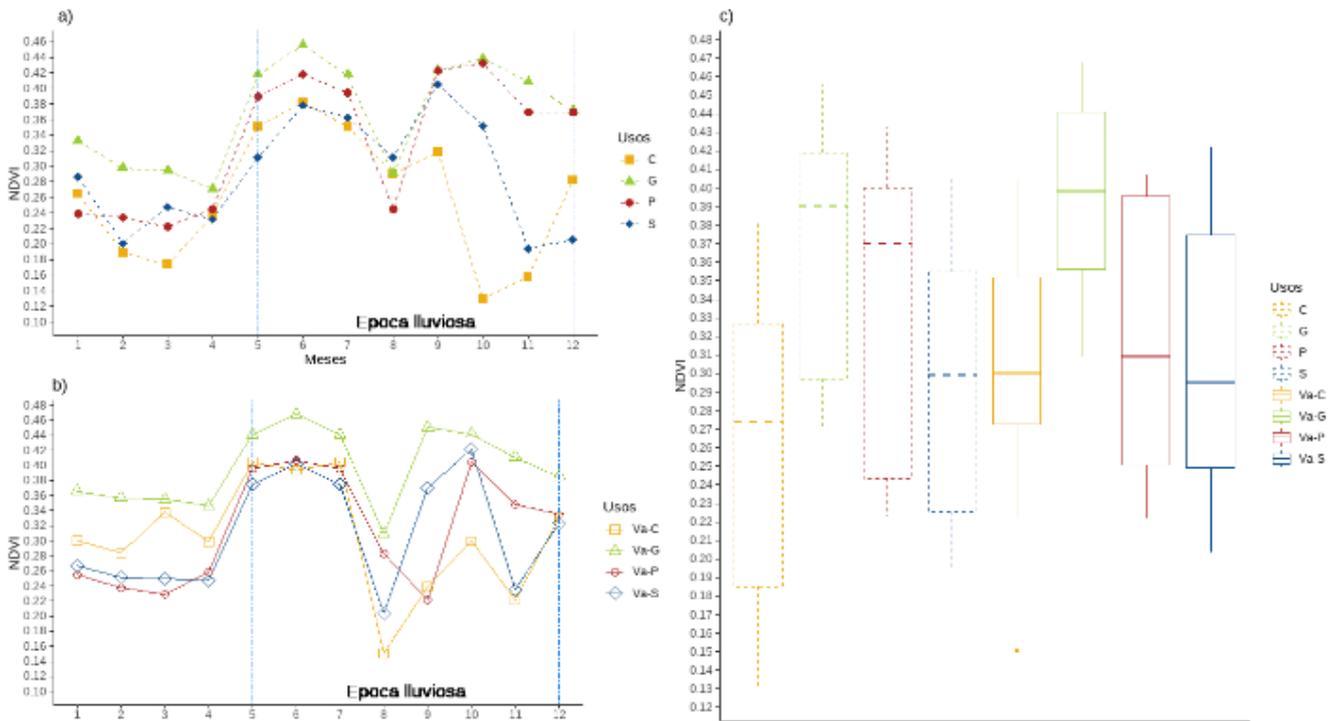


Figura 3. NDVI de la zona riparia donde: a) usos de suelo, b) vegetación adyacente y c) la tendencia de los datos para cada uso del suelo.

Cuadro 1
Test *Kruskal-Wallis* y *post hoc Dunn* mediante método de *Bonferroni*.

Kruskal-Wallis							
	Chi ² =23.085		df=7		p-value=0.001647		
Usos	Va-C	Va-G	Va-P	Va-S	C	G	P
	-2.73322	-	-	-	-	-	-
Va-G	0.0784	-	-	-	-	-	-
	-0.16121	2.572006	-	-	-	-	-
Va-P	1.00000	0.11.63	-	-	-	-	-
	-0.11724	2.615972	0.043965	-	-	-	-
Va-S	0.9067	0.1068	0.4825	-	-	-	-
	1.201735	3.93495	1.362943	1.318977	-	-	-
C	1.00000	0.0012*	1.00000	1.00000	-	-	-
	-1.94183	0.791386	-1.78062	-1.82459	-3.14356	-	-
G	0.5216	1.00000	0.6373	0.6126	0.0217*	-	-
	-0.74009	1.993122	-0.57888	-0.62285	-1.94183	1.20174	-
P	1.00000	0.4856	1.00000	1.00000	0.4955	1.00000	-
	0.505608	3.238823	0.666816	0.62285	-0.69613	2.44744	1.245701
S	1.00000	0.0162*	1.00000	1.00000	1.00000	0.1583	1.00000

*Valores con significancia para la prueba *post hoc* bajo el método de *Bonferroni* ($p\ value > 0.05/2$).

Luego del análisis descriptivo de los datos atmosféricos y NDVI se realizó una prueba de hipótesis, la cual fue verificada mediante análisis no paramétrico, resultando del análisis un $p\ value = 0.001647$, lo que validó la hipótesis de investigación para las diferencias entre NDVI y el uso del suelo. Además, la prueba *Dunn test* mediante el método de *Bonferroni*, indicó diferencias significativas entre Va-G y C, Va-G y S, así como diferencias entre usos del suelo G y C. Datos que se pueden observar en el Cuadro 1.

Según correlaciones de *Spearman*, la Figura 4 muestra que los promedios de temperatura para G, P y Va-G mantuvieron una correlación negativa ya que, sus valores se encontraron más cercanos a -1 siendo estos entre -0.57 y -0.62. Adicionalmente, se observó un valor de significancia de 0.0328 en G y 0.474 Va-G. Por el contrario, las precipitaciones tuvieron influencia positiva que indicó su cercanía a 1. Estos valores estuvieron en el rango de 0.56 a 0.72 para G, P, Va-G y Va-P. Sin embargo, la significancia únicamente se estableció en G y Va-G.

También se observó un comportamiento positivo para la variable de humedad relativa en usos de suelo como G, P, Va-G y Va-P entre 0.61 y 0.83 donde P presentó la relación positiva más elevada, esto sumado a la existencia de significancia para cada uno de los usos de suelo antes mencionados. La evolución temporal del NDVI de manera positiva se observó en P con un 0.60 y una significancia 0.0461 lo que mostró las variaciones que tuvo este uso de suelo a lo largo de los 12 meses del año.

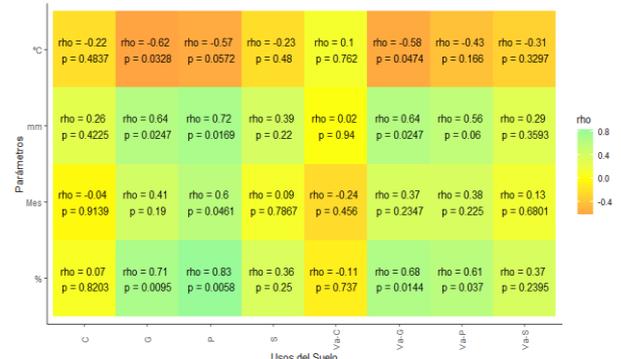


Figura 4. Mapa de correlación de *Spearman* entre los usos del suelo y parámetros asociados a la evolución del NDVI.

4. Discusión

Hubo diferencias en las variables atmosféricas y sus tendencias sinérgicas debido al aumento temporal de la precipitación y humedad relativa, comparado con la disminución de la temperatura. Dicho patrón es característico de la época lluviosa que define Vega-Araya & Alvarado-Barrantes (2019), como eventos cíclicos en la región de Guanacaste, Costa Rica. Por otro lado, a pesar de que el NDVI se vio claramente influenciado por factores atmosféricos, Olivares et al. (2015) menciona que los valores de estos están asociados al clima cálido que predomina en estas zonas, donde la vegetación es arbustiva cercana a los cauces. Claramente, los usos del suelo destinados al desarrollo humano tienen efectos

directos sobre este índice. Además, entre julio, agosto y septiembre se observa una anomalía atmosférica llamada veranillo o canícula según Alfaro (2014). Para la región donde se ubica la subcuenca La Mula, este fenómeno tiende a ser severo durante El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

Por el contrario, la disminución en la lluvia y las altas temperaturas son indicadores del inicio de la temporada seca, la cual estimula la eliminación de partículas de agua troposférica, provocando la disminución de punto de rocío, humedad relativa y aire más seco (Tejeda-Martínez et al., 2018). El riguroso análisis de las correlaciones de Spearman mostró que los usos de suelos como G, P y Va-G fueron inversamente proporcionales a la temperatura ya que, al aumento de la misma, el NDVI descendió. Sin embargo, las precipitaciones y la humedad relativa mostraron un comportamiento directamente proporcional. Análogicamente Saiz Rodríguez et al. (2017) han indicado que la temperatura es un factor clave en la disminución del NDVI y que tiene efectos directos sobre la disminución del dosel.

Un análisis íntegro de los valores de NDVI en usos del suelo como C presentó valores de 0.19 hasta 0.32 que son similares a los obtenidos por Aguilar et al. (2010) durante estrés hídrico producidos por períodos de sequía. Mientras que el Sugar Research and Development Organization (2007) indica que un buen dosel de cultivo de caña tiene un NDVI entre 0.7 y 0.8, lo que claramente fue diferente a lo obtenido durante el mayor punto de desarrollo de los cultivos en la subcuenca La Mula. En cambio, S presentó valores promedio superior que C; llegando a valores máximos de hasta 0.41 muy similares a los promedios obtenidos por Rodríguez et al. (2011) para este cultivo durante los meses de septiembre a noviembre. Durante esta época es cuando se puede observar un incremento en el NDVI de la subcuenca para este uso.

Del mismo modo, P es un ecosistema natural con gramíneas y matorrales que no exceden los 1.50m de altura. Este presentó valores de NDVI superiores a los usos de suelo anteriores. Claramente, este suelo no tiene actualmente un sistema agroeconómico asociado ya que, visitas de campo al área de estudio confirman que se encuentra dentro de la clasificación de usos de la tierra establecida por United States Department of Agriculture [USDA] (2014) como suelos susceptibles a inundaciones. Además, se encuentra dentro de los límites de un estero donde la subcuenca se infiltra, lo que la define como cuenca arreica. Los usos de suelo destinado a la crianza de ganado (G) en la subcuenca La Mula mostró valores de NDVI mayores que C, S y P, únicamente igualado durante la segunda época lluviosa por P. Esta diferencia es gracias a sistemas silvopastoriles donde se incorporan arboles dentro de los potreros de crianza, con beneficios para los ganaderos y el ambiente (Moukrim et al., 2021).

Un análisis comparativo usando la clasificación hecha por Chuvieco et al. (1999), donde categoriza los valores

NDVI, se pudo definir que S y C tienen suelo con poca vegetación ($NDVI < 0.4$), mientras que P y G son suelos con vegetación media ($NDVI$ entre 0.4-0.6). Sumado a esto, todos los valores de NDVI de la vegetación adyacente mantuvieron valores de vegetación media. Es conveniente verificar si la hipótesis de la investigación, al tener la incertidumbre de los datos de manera descriptiva, las diferencias significativas únicamente se ven claras entre G/C, Va-G/S y Va-G/C, ya que presentaron una significancia menor de 0.05. Millano-Tudare et al. (2017) asume la presencia de diferencias entre usos de suelo y su vegetación adyacente podría ser por los fenológicos de la eco-región donde el bosque es disperso y muchos arbustos caducifolios (Hidalgo & Rodríguez Quirós, 2010).

5. Conclusión

Considerando el análisis descriptivo de los datos atmosféricos y sus correlaciones, se mostró la influencia que tiene las anomalías atmosféricas para la evolución del NDVI. En la época seca y lluviosa, las diferencias fueron sustanciales. Si bien factores como la temperatura redujeron este índice de vegetación, las precipitaciones y la humedad relativas generaron un efecto contrario provocando mayor NDVI en sitios donde se midió la vegetación adyacente y el uso del suelo. Además, la región agroclimática de la zona donde se ubica la subcuenca La Mula debe considerarse entre las limitaciones para los valores, ya que estos se encuentran en la parte baja del rango de clasificación de suelo con vegetación media.

Existen algunas variaciones entre los usos de suelo y su vegetación adyacente. Sin embargo, el análisis estadístico mostró que la vegetación adyacente asociado particularmente al uso del suelo comparativos, presentó valores muy similares donde la significancia no se hizo presente, pero si mostró diferencias en la dispersión de los datos por la vegetación adyacente asociada a la categoría de suelo con vegetación media. Dichas diferencias influenciadas claramente por el desarrollo agrícola de la zona. Además, el uso del suelo ganadero (G) con sistema agroecológico de manejo o también conocidos como sistemas silvopastoril presentó NDVI superiores a la media de estudios basados en muestreo de la vegetación de estos agroecosistemas. Para este estudio, fueron mayores que los obtenidos en pastizales naturales (P) donde la influencia agropecuaria fue casi nula.

6. Contribución de los Autores

YV, LB, WW y CS conceptualizaron el estudio, mientras que YV, WW y NV contribuyeron a su metodología. YV, LB, WW y NV realizaron los análisis de la investigación. YV, LB, WW y CS escribieron el manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron la última versión del mismo.

7. Financiamiento

Gobierno de la República de Honduras.

8. Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

9. Referencias Bibliográficas

- Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 14(2), 49-65. <http://ww.ucol.mx/revaia/antiores.php?id=60>
- Alfaro, E. J. (2014). Characterization of the mid summer drought in two Pacific slope river basins of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 62(S4), 1-15. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v62i4.20010>
- Chuvieco, E., Deshayes, M., Stach, N., Cocero, D., & Riaño, D. (1999). Short-term fire risk: foliage moisture content estimation from satellite data. En *Remote sensing of large wildfires* (pp. 17-38). Springer.
- Fu, B., & Burgher, I. (2015). Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of Arid Environments*, 113, 59-68. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.010>
- Gamon, J. A., Field, C. B., Goulden, M. L., Griffin, K. L., Hartley, E., Joel, G., Penuelas, J., & Valentini, R. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, 5(1), 28-41. <https://dx.doi.org/10.2307/1942049>
- Hidalgo, D. M., & Rodríguez Quirós, R. (2010). *Caracterización biofísica de las zonas definidas para la implementación de las opciones de cosecha de agua*. Cemed-SRCH.
- Instituto Nacional Meteorológico de Costa Rica [IMN]. (2011). *Cuenca del río Tempisque*. <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EstudioCuencas/EstudioCuencas-cuencaRioTempisque.pdf>
- Jiang, L., Liu, Y., Wu, S., & Yang, C. (2021). Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data. *Ecological Indicators*, 129. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107933>
- Lemenkova, P. (2021). SAGA GIS for computing multispectral vegetation indices by Landsat TM for mapping vegetation greenness. *Contemporary Agriculture*, 70(1-2), 67-75. <https://dx.doi.org/10.2478/contagri-2021-0011>
- Millano-Tudare, J. L., Paredes-Trejo, F. J., Jaimés, E., Pineda, N., Mendoza, J. G., Garcés, Y., & Pineda, I. (2017). Patrones fenológicos de cinco tipos de cobertura en bosque seco tropical, Sur-Cojedes, Venezuela. *Revista Agrollania*, 14, 106-112. <http://revistas.unelz.edu.ve/index.php/agrollania/article/view/558>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. (2020). *Caracterización del área de influencia de la agencia de extensión agropecuaria de San Isidro de El General*.
- Moukrim, S., Lahssini, S., Naggar, M., Menzou, K., Mharzi-Alaoui, H., Labbaci, A., & Rhazi, L. (2021). Assessing the impacts of different initiatives on the rehabilitation of pastoral and silvopastoral ecosystems: big data oriented approach. *UKnowledge*, 6. <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4371&context=igc>
- Olivares, B. O., & López-Beltrán, M. A. (2019). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) applied to the agricultural indigenous territory of Kashaama, Venezuela. *UNED Research Journal*, 11(2), 112-121. <https://dx.doi.org/10.22458/urj.v11i2.2299>
- Olivares, B. O., Rodríguez, M. F., Cortez, A., Lobo, D., & Rey, J. C. (2015). Caracterización físico natural de la Comunidad Indígena de Kashaama con fines de manejo sostenible de la Tierra. *Acta Nova*, 7(2), 143-164.
- Pinedo-Álvarez, C., Salas-Aguilar, V. M., Viramontes-Olivas, O. A., Báez-González, A. D., & Quintana-Martínez, R. M. (2011). Morfometría de la cuenca del río Nazas-Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial. *Tecnociencia Chihuahua*, 5(1), 34-42. <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/705>
- Saiz Rodríguez, R., Aguirre López, G. L., Rodríguez, J. C., Watts Thorp, C. J., Saiz Rodríguez, J. A., Ochoa Granillo, A., & Saiz Hernández, J. A. (2017). Estimates of evapotranspiration with PROBA-V images in a crop field on the coast of Hermosillo, Sonora, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 35(4), 301-308. <https://dx.doi.org/10.28940/terra.v35i4.307>
- Serrano, J., Shahidian, S., Paixão, L., Marques da Silva, J., & Moral, F. (2022). Management zones in pastures based on soil apparent electrical conductivity and altitude: NDVI, soil and biomass sampling validation. *Agronomy*, 12(4). <https://dx.doi.org/10.3390/agronomy12040778>
- Soria Bances, M. G., & Quevedo, J. (2019). Estado ecológico de franjas ribereñas e indicadores biológicos de calidad de agua en la subcuenca del río Hato. *Revista Yu'am*, 3(5), 4-20. <https://www.revistayuam.com/estado-ecologico-de-franjas-riberenas-e-indicadores-biologicos-de-calidad-de-agua-en-la-subcuenca-del-rio-hato/>
- Spielmann, H. O. (1972). La expansión ganadera en Costa Rica: problemas de desarrollo agropecuario. *Revista Geográfica*, 77, 57-84.
- Sugar Research and Development Corporation. (2007). *Precision agriculture options for the Australian sugarcane industry*. Australian Government.
- Tejada-Martínez, A., Méndez Pérez, I. R., Rodríguez, N. C., & Tejada-Zacarías, E. (2018). *La humedad en la atmósfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima. http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf
- Tut Si, M. O. (2016). *Influencia de la franja ribereña en la calidad del agua y percepción local sobre su estado y manejo en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago Aitlán, Guatemala*. CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8607?locale-attribute=fr>
- United States Department of Agriculture [USDA]. (2014). *Keys to soil taxonomy* (12^o ed.). http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Valladares, Y. (2022). *Análisis del ambiente físico (agua y suelos) en función de los usos del suelo asociados a franjas ribereñas bajo el enfoque de Una salud (One Health), en la subcuenca de la quebrada La Mula, distrito de riego Arrenal-Tempisque (DRAT), Costa Rica*. CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/249/BCO22118379e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas Ulate, G. (2011). Estudio cartográfico de los cambios de la vegetación de sabana en el parque nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica, 1985 - 2009. *Geográfica de América Central*, 2(47), 71-96. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/4110>
- Vega-Araya, M., & Alvarado-Barrantes, R. (2019). Análisis de las series de tiempo de variables biofísicas para cuatro ecorregiones de

- Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 60-96. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.53-2.4>
- Vicente Serrano, S. M., Lasanta, T., & Romo, A. (2013). Spatial differences in the evolution of NDVI in the high river basin of the Aragón: effect of the changes of land uses. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 29, 51-66. <https://dx.doi.org/10.18172/cig.1058>
- Watler, W. (2018). *Descarga y procesamiento de datos de suelos (mapa de textura), usando la plataforma SoilGrid y el lenguaje de programación R*.
- Woodcock, C. E., Macomber, S. A., Pax-Lenney, M., & Cohen, W. B. (2001). Monitoring large areas for forest change using Landsat: generalization across space, time and Landsat sensors. *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2), 194-203. [https://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00259-0](https://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00259-0)