

Monitoreo remoto de cambios en el **vigor de la vegetación** y su relación con variables ambientales

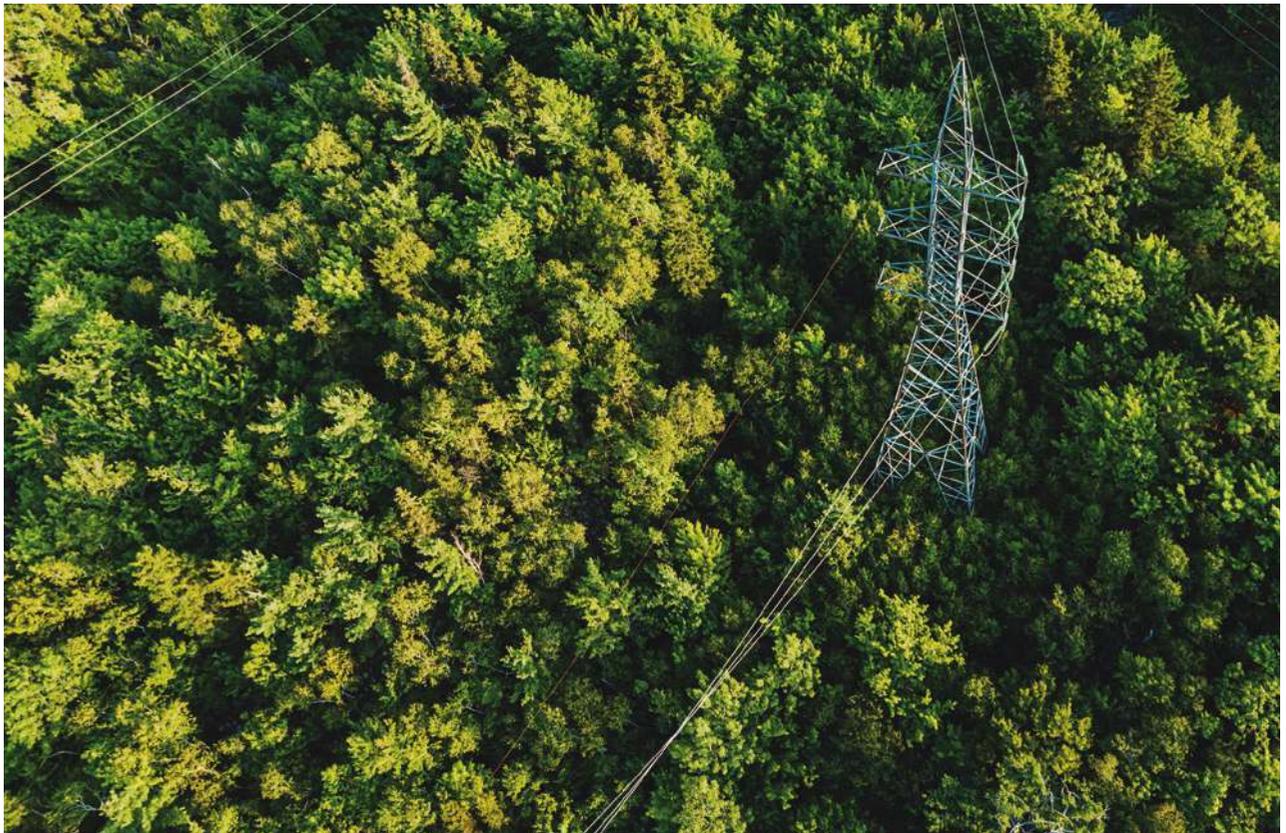
*Remote Monitoring of **Vegetation Vigor** Change and its Relationship with Environmental Variable*

Raúl Octavio Martínez-Rincón,* César Augusto Salinas-Zavala,
María Verónica Morales-Zárate** y Federico Salinas-Zavala****

* CONACYT-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), SC, rrincon@cibnor.mx

** CIBNOR, SC; csalinas@cibnor.mx, mzarate04@cibnor.mx y fsalinas04@cibnor.mx, respectivamente.

Nota: este trabajo fue financiado por el fondo sectorial CONACYT-INEGI (proyecto: 278789).



Aerial Drone View: Power Pylon/Shami/iStock

El monitoreo de los cambios en la flora se realiza de manera tradicional con visitas a campo de forma periódica o en tiempos específicos; sin embargo, este método requiere de un gran esfuerzo de muestreo y usualmente se limita en tiempo y espacio. Como alternativa, los sensores remotos han permitido inferir modificaciones en la misma de manera sistemática en diferentes resoluciones tanto temporales como espaciales; no obstante, a pesar de que es una herramienta muy utilizada para ello, presenta ciertas limitaciones, ya que solo se pueden describir algunos aspectos generales, como el vigor de la vegetación, su variación estacional y cambios espacio-temporales. En el presente trabajo se describen las modificaciones en el vigor de la vegetación y su relación con las variables ambientales de manera remota. Para esto, se implementó una estación de monitoreo de bajo costo que integra la medición de algunas de las variables con un sensor radiométrico dentro de la reserva ecológica Laura Arriaga Cabrera.

Palabras clave: estación de monitoreo remoto; índice de vegetación; correlación cruzada.

Recibido: 3 de diciembre de 2019.
Aceptado: 24 de junio de 2020.

Introducción

El monitoreo del vigor de la vegetación (estado de salud) se ha realizado en las últimas décadas de forma tradicional por medio de la observación *in situ* o de la percepción remota (imágenes satelitales o aéreas). La primera permite evaluar de manera detallada los cambios estacionales de las plantas (fenología), como floración, reproducción y pérdida de área foliar, entre otros; sin embargo, este método es costoso y tiene una cobertura espacio-temporal muy limitada, impidiendo, así, evaluar los efectos climáticos de eventos de largo plazo en la fenología de la vegetación de un área en particu-

Monitoring vegetation changes is traditionally done by periodic field survey on specific times. However, this method requires a great deal of sampling effort and is usually time-space limited. Alternatively, remote sensing has allowed to infer vegetation changes systematically at different time and space resolutions. Although it is a widely used tool for this purpose, it presents certain limitations, since only some general aspects can be described, such as vegetation's health, its seasonal variability and spatiotemporal changes. In this work, modifications in vegetation's health variability and its relationship with environmental factors are described remotely. For this, a low-cost monitoring station was implemented, which integrates the measurement of some of the variables with a radiometric sensor within the Laura Arriaga Cabrera Ecological Reserve.

Key words: Remote Monitoring Station; Vegetation Index; Cross Correlation.

lar. La segunda los evalúa en una escala espacial y temporal mucho mayor y a menor costo debido a que existen imágenes satelitales disponibles para el público en general de manera gratuita; no obstante, en la escala fina, este método no permite distinguir las modificaciones estructurales o fisiológicas de las plantas, además de tener poca capacidad para identificar patrones contrastantes entre diferentes especies de ecosistemas silvestres; otra limitación radica en que los índices de vegetación que se infieren a partir de las imágenes de satélite necesitan un proceso de supervisión, ya que pueden carecer de interpretabilidad si no se conocen las características de los tipos de vegetación del área que se está analizando.

NDVI

En ecosistemas terrestres, un método indirecto utilizado para describir la fenología de las plantas es a través de la percepción remota mediante el uso de índices de vegetación (Chen *et al.*, 2000), los cuales se emplean para medir la densidad relativa y la salud de la flora; en la actualidad, existen varios: uno de los más utilizados alrededor del mundo es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), que se calcula a partir de la reflectancia de la luz en las longitudes de onda del color rojo y el infrarrojo cercano.

$$NDVI = \frac{IRC - Rojo}{IRC + Rojo} \quad (1)$$

donde:

IRC = reflectancia en la longitud de onda del infrarrojo cercano (750-900 nm).

Rojo = reflectancia de la luz en la longitud de onda del rojo (620-750 nm).

Mediante el uso de datos del Índice es posible describir la fenología de la vegetación. A partir de sus valores, se pueden obtener parámetros biométricos que reflejan cambios fenológicos de ella; por ejemplo, el valor máximo del NDVI indica la época del año de mayor desarrollo foliar de las plantas y viceversa. Con la amplitud del Índice (diferencia entre los mínimos y máximos) se puede inferir el inicio de la estación de crecimiento —que es la época del año donde el NDVI se incrementa de manera sostenida— y el fin de la misma —cuando se manifiesta un decremento de forma sostenida del Índice— (Vázquez, Adema y Fernández, 2013).

Por otra parte, el NDVI ha sido muy utilizado para evaluar cambios espacio-temporales en la cobertura vegetal de diferentes ecosistemas alrededor del mundo (Jiang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015; Vandendorj, Gantsetseg y Boldgiv, 2015). En investigaciones recientes, algunos autores (Meng, Ni y Zong, 2011; Revadekar, Tiwari y Kumar, 2012; Wang

et al., 2015) han relacionado las modificaciones espacio-temporales del Índice al efecto del cambio climático y/o al de las actividades humanas; sin embargo, otros investigadores (Sohoulande Djebou, Singh y Frauenfeld, 2015; Wang *et al.*, 2014) mencionan que modificaciones en la precipitación y la temperatura atmosférica tienen una relación más estrecha con los valores registrados del NDVI. El vínculo entre la lluvia y la cobertura vegetal es más estrecho aún en ecosistemas áridos debido a que las precipitaciones estacionales son la principal fuente de agua en estos (Zhu *et al.*, 2015).

Jiang *et al.* (2014) utilizaron los valores del NDVI para caracterizar la cobertura vegetal en una región de China; en adición, usaron herramientas estadísticas (como modelos de regresión) para describir la tendencia espacial de este índice y, con ello, describir cuáles son los tipos de vegetación que experimentaron cambios negativos o positivos en la última década. De manera similar, Salinas-Zavala *et al.* (2017) emplearon el Índice para describir la tendencia de la cobertura vegetal en Baja California Sur, sugiriendo que en la parte sur de esa entidad se presentan valores negativos de tendencia del NDVI debido al efecto negativo causado por el crecimiento urbano en esta región.

Efecto de la variabilidad ambiental

El que impacta en las plantas ha sido muy estudiado y descrito en diferentes ecosistemas terrestres (Yepes y Silveira Buckeridge, 2011); las investigaciones abordan el uso de percepción remota para describir la respuesta del vigor de la vegetación y variables ambientales y han demostrado que la precipitación y la temperatura tienen un fuerte efecto en la producción de flora durante su fase de crecimiento (Wang, Rich y Price, 2003); sin embargo, de acuerdo con Zhao *et al.* (2015), en ecosistemas semiáridos, la temperatura parece no tener una relación tan determinante como la tiene la precipitación o la circulación atmosférica asociada a dicha producción (Salinas-Zavala, Douglas y Diaz, 2002). Por el contrario, otros autores (Deng, Su y Liu, 2007) sugieren que, en bosques subtropi-

cales, la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) y la temperatura tienen un mayor efecto en la producción vegetal en este tipo de ecosistemas debido a que la precipitación no es una limitante.

Por todo lo anterior, se considera que el monitoreo de la vegetación debe realizarse en conjunto con el ambiental para poder explicar algunos de los factores más importantes que promueven cambios en el vigor de esta de algún sitio de interés. Así, el objetivo principal de este trabajo es evaluar el desempeño de una estación de monitoreo remota para valorar modificaciones en el estado de salud de las plantas y el efecto que tienen algunas variables ambientales sobre estas.

Metodología

Área de estudio

La zona de interés se localiza en la reserva ecológica Laura Arriaga Cabrera del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), SC. En esta, la vegetación es de tipo matorral sarcocaulé, la cual se caracteriza por la dominancia de plantas con troncos grandes y carnosos, como el ciruelo (*Cyrtocarpa edulis* Brandegees), el lomboy (*Jatropha cinérea* Ortega), la matacora (*J. cuneata* Wiggins &

Rollins), el mezquite (*Prosopis articulata* S. Watson), el palo adán (*Fouquieria diguetii* Tiegh) y el torote (*Bursera microphylla* A. Gray), además de cactáceas, como el cardón (*Pachycereus pringlei* S. Watson) y la pitaya agria (*Stenocereus gummosus* Engelm) y la dulce (*S. thurberi* Engelm).

Equipos y recolecta de datos

El registrador electrónico es el aparato que se encarga de anotar las lecturas de los sensores montados en la estación de monitoreo remoto y fue programado para recolectar datos con una frecuencia de 15 minutos; con esta configuración, puede almacenar hasta un año de registros de cada variable (ver cuadro 1). Cuenta con panel solar para carga de las baterías y con tarjeta SIM para el envío de información. Las variables que capta este equipo son: dirección del viento (en grados), velocidad del viento ($m s^{-1}$), precipitación (mm), temperatura del aire ($^{\circ}C$), humedad relativa (proporción) y PAR ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$), así como reflectancias en las bandas del rojo (630 nm) y del infrarrojo cercano (800 nm); a partir de los datos de estas dos últimas se calcula el NDVI con la ecuación 1.

Los sensores fueron colocados en una estructura tipo antena a diferentes alturas de la superficie del suelo: los de temperatura, humedad, viento y PAR,

Cuadro 1

Continúa

Equipos montados en la estación de monitoreo remoto ubicado en la reserva Laura Arriaga Cabrera

Nombre	Marca/modelo	Parámetro/unidades	Precio aproximado (dólares estadounidenses)
Registrador electrónico	Decagon/EM50G	No aplica	1 980.00
Sensor de reflectancia espectral	Decagon/SRS-Nr	<ul style="list-style-type: none"> Reflectancia en la banda del rojo (630 nm)/Watts por metro cuadrado ($W m^{-2}$). Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (800 nm)/Watts por metro cuadrado ($W m^{-2}$). NDVI/sin unidades. 	535.00
Sensor de presión de vapor, humedad y temperatura	Decagon/VP3	<ul style="list-style-type: none"> Humedad relativa/porcentaje (%). Temperatura/grados centígrados ($^{\circ}C$). 	470.00

Equipos montados en la estación de monitoreo remoto ubicado en la reserva Laura Arriaga Cabrera

Nombre	Marca/modelo	Parámetro/unidades	Precio aproximado (dólares estadounidenses)
Anemómetro	Decagon/Copas David	· Dirección del viento/grados (°). · Velocidad de viento/metros por segundo ($m s^{-1}$). · Rachas de viento/metros por segundo ($m s^{-1}$).	300.00
Sensor PAR	Decagon/QSO-S	· PAR/micromoles por metro cuadrado por segundo ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$).	420.00
Pluviómetro	Decagon/ECRN-50	· Precipitación/milímetros.	300.00

a 5 m; el pluviómetro y el registrador de datos, a 1 m y el de reflectancia espectral, a 7 m con una inclinación de 75° con respecto a la superficie de la zona de estudio. Este sensor tiene un diámetro de muestreo de 52.2 m, equivalente a un área de 2 141 metros cuadrados.

Todos los datos pueden ser recolectados manualmente en cualquier momento mediante el uso de un puerto de comunicación y un *software* especializado (ECH₂O *utility*); sin embargo, el registrador EM50G cuenta con una antena para el envío de información por medio de telefonía celular, lo que permite acceder a ella de manera remota.

Para este trabajo, se programaron cinco horarios diferentes (6:00, 9:00, 12:00, 15:00 y 18:00 horas) para el envío remoto de datos diarios a un servidor (https://zentracloud.com/#/dashboard_map), en el cual se puede visualizar y descargar la información de los últimos 15 días. Gracias a que se puede registrar más de una estación de monitoreo, el sistema permite la posibilidad de crear una red de monitoreo en la que todos los usuarios acceden a los datos de todas las estaciones en el momento que lo deseen, si cuentan con conexión a internet.

Si bien para la presente investigación se utilizó la información de 18 meses, la estación de monitoreo

ha funcionado ininterrumpidamente desde su colocación en diciembre del 2017, censando de forma eficiente durante todo el periodo. En este sentido, es importante mencionar que registró datos a la intemperie de manera continua sin sufrir ningún desperfecto o desgaste evidente; los equipos se revisaron de manera periódica y se les dio mantenimiento en seis ocasiones durante el periodo de estudio, el cual consistió en el reemplazo de los sujetadores plásticos de algunos sensores (debido a que se vuelven frágiles por el efecto de la radiación solar). Cabe hacer mención que el costo asociado a este procedimiento de mantenimiento está directamente relacionado con la distancia a la cual se encuentren los sensores y el observador, y que el precio total de la estación es de alrededor de 4 mil dólares estadounidenses.

Análisis de información

Los datos ambientales y del Índice analizados en este trabajo corresponden al periodo de diciembre del 2017 a junio del 2019; son valores promedio por hora de cada día, con excepción de la precipitación, a la cual se le calculó la suma por hora y fecha. Los de humedad relativa fueron transformados a porcentajes, multiplicando el valor original (en proporción) por 100. Debido a la gran variabilidad de la información y para describir los patrones

temporales de las variables analizadas, se aplicaron promedios móviles con una ventana de 15 días, es decir, se utilizaron todos los promedios por hora registrados en esos días.

A partir de los valores promedio por hora, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson mediante la ecuación 2 con la finalidad de describir la relación lineal entre las variables ambientales y el Índice:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

donde:

r_{xy} = coeficiente de correlación de Pearson.

x_i, y_i = observaciones de las variables.

\bar{x}, \bar{y} = promedios de las variables.

Se aplicaron análisis de componentes principales para reducir dimensiones (capturar la señal común en solo dos ejes) y para describir las correlaciones de todas las variables ambientales mediante el uso de los *eigen*-vectores de los componentes 1 y 2.

Resultados y discusión

Variabilidad temporal

En el cuadro 2 se muestra el resumen estadístico (mínimo, promedio y máximo) de los valores registrados de cada uno de los parámetros en el periodo de estudio. Como se aprecia, los datos presentan una alta variabilidad, con excepción de la precipitación, cuyos valores se mantienen en cero en la mayoría de los registros.

En las figuras 1 y 2 se muestran los valores promedio por hora y día de cada una de las variables ambientales captadas durante el periodo de estudio, con excepción de la precipitación, a la cual se le calculó la suma por hora y fecha. Como se aprecia en la figura 1A, el sensor de esta registró valores de 0 mm la mayor parte del periodo; sin embargo, se observa que en septiembre captó los más altos y que entre diciembre del 2018 y enero del 2019 se registraron eventos de lluvia. Este comportamiento coincide con lo reportado por Ayala Niño (2018), quien describe que la precipitación registrada en el sitio durante 2006-2007 es mayor en septiembre y, de manera ocasional, se registran lluvias en diciembre y enero; también reporta que, de febrero a junio, la precipitación en la zona es casi nula. Estos resultados con-

Cuadro 2

Resumen estadístico de las variables ambientales registradas con la estación de monitoreo remoto ubicado en la reserva Laura Arriaga Cabrera

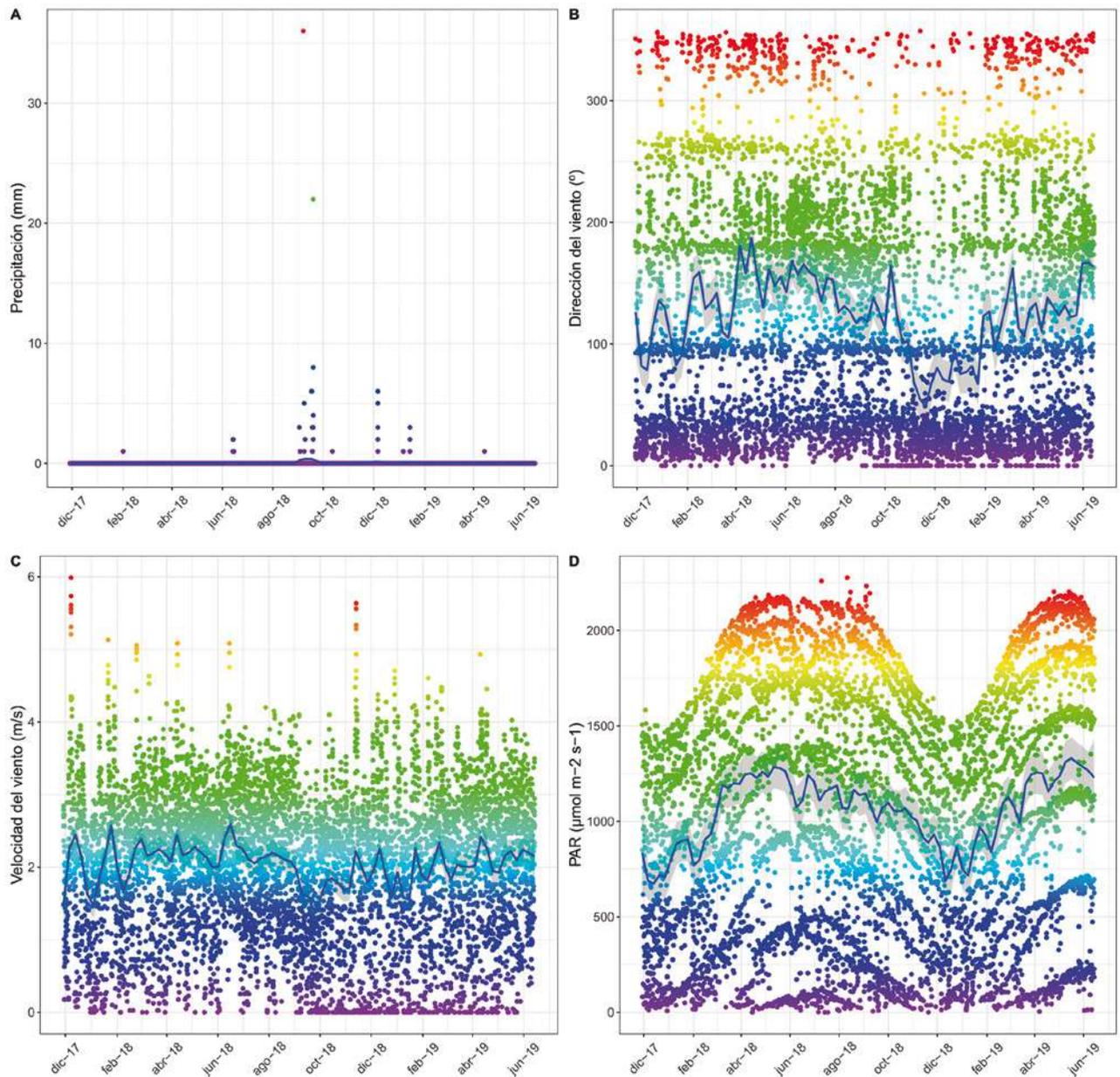
Variable ambiental	Mínimo	Promedio	Máximo	Fecha mín.	Fecha máx.
Humedad relativa (%)	18.4	52.5	88.2	12/04/19	20/09/18
Temperatura (°C)	7.8	26.8	41.2	31/12/18	23/07/18
Precipitación (mm)	0.0	0.0	36.0	*	07/09/18
Dirección del viento (°)	0.0	125.3	357.3	*	13/11/18
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	0.0	2.0	6.0	*	08/12/17
PAR (μmol m ⁻² s ⁻¹)	0.0	1 068.1	2 276.0	*	11/08/18
NDVI	0.1	0.5	0.8	18/07/18	22/12/18

Fecha mín. = fecha con la observación mínima.

Fecha máx. = fecha con la observación máxima.

* Varias fechas presentan valores cero, por lo tanto, no se especificó ninguna como la mínima.

Valores promedio por hora de las variables



Nota: la línea azul representa un promedio móvil de aproximadamente 15 días; el área en gris, su intervalo de confianza a 95 por ciento.

firman la importancia de las lluvias estacionales en el área, que se registran sobre todo en septiembre.

La dirección del viento (ver figura 1B) muestra que los valores dominantes de octubre a mayo son de 0 a 50 °, es decir, vientos del norte y noroeste, mientras que, de junio a septiembre, los valores dominantes son de 150 a 250 °, correspondientes a las direcciones suroeste, sur y sureste. Su velocidad

(ver figura 1C) es mayor ($> 5 \text{ m s}^{-1}$) en diciembre y febrero, mientras que en septiembre se registran los menores valores. Al respecto, Herrera-Cervantes (2019) demostró que los vientos más fuertes de la región se presentan en el invierno y que provienen del noroeste.

PAR es una variable ambiental que se utiliza para estimar la cantidad de radiación disponible para fo-

tosíntesis; sin embargo, también ha sido utilizada para la creación de índices de aridez en conjunto con la precipitación y la temperatura. Los valores de la PAR (ver figura 1D) sugieren una mayor radiación de abril a octubre; por el contrario, de noviembre a enero es cuando se registran los valores más bajos de esta variable. Estos resultados coinciden con los reportados por Troyo-Diéguez *et al.* (1990), quienes mencionan que los valores más altos de radiación en La Paz se presentan de abril a agosto. Al respecto, se ha demostrado que la poca lluvia de la región y los altos valores de radiación causan la aridez de la zona (Ayala Niño, 2018; Troyo-Diéguez *et al.*, 1990).

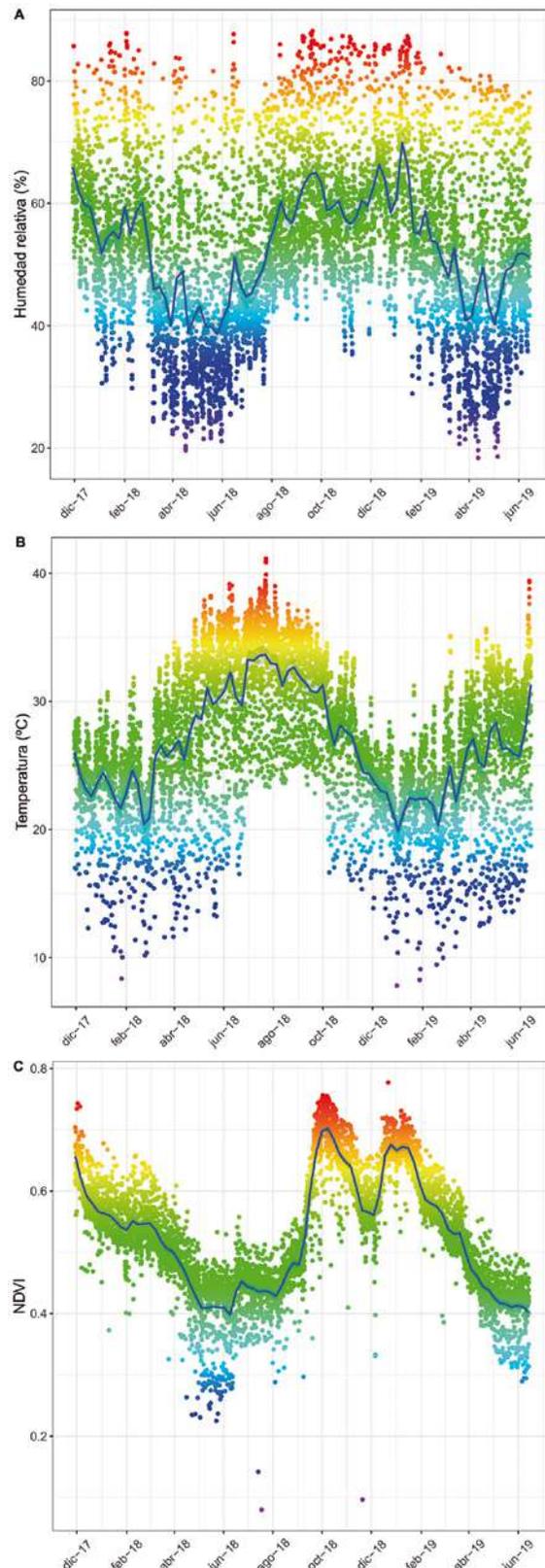
Como se aprecia en la figura 2A, los valores más bajos de humedad relativa se presentan en abril y mayo, mientras que los más altos, en diciembre y enero. Según Bell *et al.* (2012), la cantidad de humedad en el suelo en este sitio está relacionada de forma directa con la precipitación y humedad relativa debido a que la del suelo se mantiene relativamente alta en meses sin lluvias.

Las temperaturas (ver figura 2B) mínimas se presentan en febrero y marzo, mientras que las más altas, en junio y julio. Estos resultados difieren con respecto a los presentados por Ayala (2018), quien menciona que las menores son de diciembre a marzo. Al respecto, dichas diferencias podrían estar relacionadas con la variación interanual de las variables ambientales, dado que algunos años pueden ser más frescos/cálidos que otros y que las lluvias invernales inciden de manera directa en la temperatura de la región (Rodríguez-Moreno *et al.*, 2014).

Los valores del NDVI (ver figura 2C) muestran que el vigor de la vegetación es mayor en septiembre, mientras que de abril a junio es cuando se registran los más bajos. A pesar de este componente estacional marcado, en diciembre del 2018 y enero del 2019 se presentaron valores altos, reflejo de las lluvias que hubo en estos meses. Esto sugiere que el estado de salud de las plantas responde muy rápido a la presencia de la precipitación fuera de la temporada de verano. Salinas-Zavala *et al.* (2017) demostraron, mediante el uso del Índice, que el vi-

Figuras 2

Valores promedio por hora de las variables



Nota: la línea azul representa un promedio móvil de aproximadamente 15 días; el área en gris, su intervalo de confianza a 95 por ciento.

gor máximo de la vegetación en la parte sur de la península de Baja California se presenta de agosto a octubre; sin embargo, en algunos años se pueden presentar valores altos del NDVI en los meses de invierno debido a la presencia de lluvias de esa temporada. Esta variabilidad interanual ha sido relacionada de manera directa con eventos de gran escala como El Niño, mismos que generan una mayor precipitación en la región debido a las anomalías positivas de temperatura en el mar (Hawinkel *et al.*, 2016).

Relación entre el NDVI y las variables ambientales

Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson y el valor de probabilidad asociado a estos de todas las variables medidas con la estación de monitoreo para describir la relación lineal que existe entre estas y el Índice. Los primeros muestran que la humedad relativa se correlaciona de forma negativa con la temperatura, la velocidad del viento y la PAR; además, observan una correlación lineal casi nula entre la precipitación y las otras variables ambientales (ver cuadro 3).

Como se aprecia en el cuadro 3, el NDVI se correlaciona de forma positiva con la humedad relativa y de manera negativa con la temperatura. La que hay entre la precipitación y el Índice fue la más baja de todas, sugiriendo una correlación lineal casi

nula entre estas variables. Al respecto, en ecosistemas áridos o semiáridos, Agam y Berliner (2006) muestran que la formación de rocío puede exceder la cantidad de agua que aportan las lluvias; por lo tanto, la temperatura y la humedad relativa juegan un papel más importante que la precipitación en el desarrollo de la vegetación en este tipo de ecosistemas. Debido a esto, se sugiere que el crecimiento de especies que se encuentran en la vegetación de matorral sarcocaula tiene una estrecha dependencia con la humedad relativa y la temperatura.

El análisis de componentes principales aplicado a la información registrada con la estación de monitoreo sugiere que en el 1 y el 2 se explica 56 % de la variación de los datos (ver figura 3A). Además, que las variables temperatura y humedad relativa están correlacionadas de manera negativa en el primero, que la humedad y el NDVI guardan una positiva y que entre la temperatura y el Índice es inversa. La PAR y la velocidad del viento están muy relacionadas y la precipitación tiene una variación muy baja (ver figura 3B). Las variables que más aportan en el primer componente principal son la humedad relativa, temperatura, PAR y velocidad del viento (ver figura 3C), mientras que, en el segundo componente, las más importantes son la dirección del viento y el NDVI (ver figura 3D). Estos resultados resumen y confirman los valores de correlación descritos con anterioridad, de tal manera que se enfatiza que el vigor de la vegetación está muy relacionado con la humedad y la temperatura.

Cuadro 3

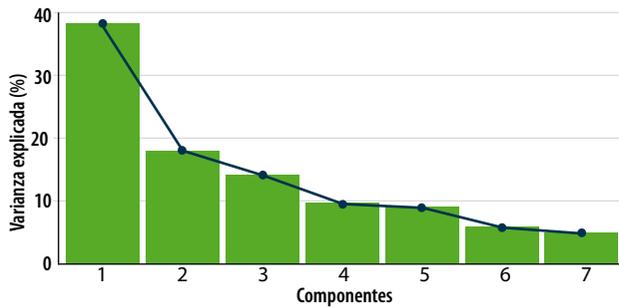
Coefficientes de correlación de Pearson (diagonal inferior) y su probabilidad (diagonal superior) categorizada en $p < 0.05^*$ (significativos) o $p > 0.05$ (no significativos)

	Humedad	Temperatura	Precipitación	Dir. viento	Vel. viento	PAR	NDVI
Humedad	---	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$
Temperatura	-0.638	---	$p < 0.05$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$
Precipitación	0.078	-0.014	---	$p < 0.05$	$p < 0.05$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$
Dir. viento	-0.048	0.081	0.018	---	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$
Vel. viento	-0.406	0.355	-0.007	-0.102	---	$p < 0.05^*$	$p < 0.05^*$
PAR	-0.549	0.5	-0.053	-0.176	0.422	---	$p < 0.05^*$
NDVI	0.444	-0.407	-0.026	-0.214	-0.199	-0.177	---

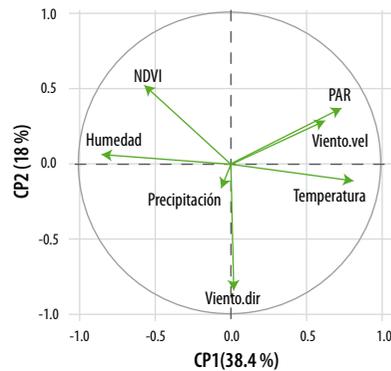
Nota: en negritas están los valores de correlación más altos entre el NDVI y las variables ambientales

Análisis de componentes principales aplicados a las variables

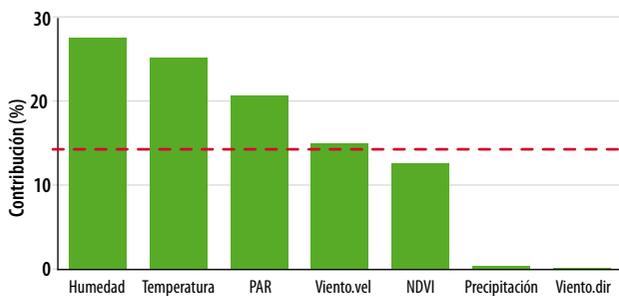
A) Porcentaje de contribución de los componentes principales



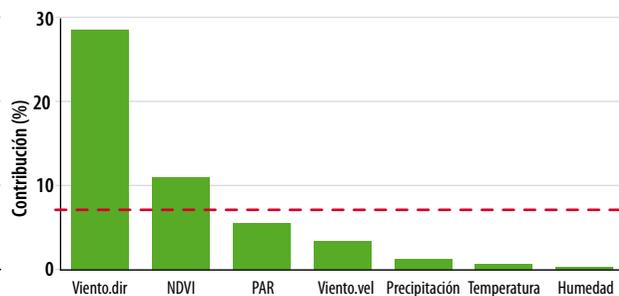
B) Eigen-vectores de los componentes 1 y 2



C) Contribución de las variables en el componente principal 1



D) Contribución de las variables en el componente principal 2



Nota: las líneas rojas representan valores de referencia a partir de los cuales se consideran significativos o no los porcentajes de contribución de cada variable.

Conclusiones

Los resultados muestran que este tipo de estaciones de bajo costo permite la recolecta de datos ambientales y del vigor de la vegetación en escalas de alta frecuencia, en tiempo casi real y de manera remota; por lo tanto, tiene un gran potencial para su implementación en casi cualquier parte del territorio nacional que tenga cobertura de telefonía celular.

Si bien la cobertura espacial no es muy amplia (≈ 0.22 ha), el bajo costo de la implementación y fácil manejo de la estación lo subsana en el análisis costo-beneficio. Debido a que se pueden incluir varias de estas en el servidor de datos, es posible concluir que estos equipos pueden trabajar en conjunto, a manera de una red de monitoreo remoto. Gracias al sensor de vegetación, esta red puede ser utilizada para evaluar cambios estacionales en el estado de salud de las plantas, en conjunto con la variabilidad ambiental de los sitios de interés.

Los resultados del análisis muestran que el vigor de la vegetación en un ecosistema terrestre con matorral sarcocaulé está influenciado sobre todo por la humedad relativa y la temperatura del aire. Esto se debe a la escasa precipitación que se presenta en este tipo de ecosistema. En particular, se observó que el mayor vigor de la vegetación se presenta cuando la humedad relativa es más alta y cuando la temperatura ambiental disminuye a finales del verano.

Fuentes

Agam, N. and P. R. Berliner. "Dew Formation and Water Vapor Adsorption in Semi-Arid Environments-A Review", en: *Journal of Arid Environments*. 65(4), 2006, pp. 572-590.

Ayala Niño, Fernando. *Flujos y almacenes de carbono edáfico en un ecosistema árido del noroeste de México: un enfoque multiscalar*. Tesis de doctorado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC. La Paz, Baja California Sur, 2018.

- Bell, Tom W., Olaf Menzer, Enrique Troyo-Diéquez and Walter C. Oechel. "Carbon Dioxide Exchange over Multiple Temporal Scales in an Arid Shrub Ecosystem near La Paz, Baja California Sur, Mexico", en: *Global Change Biology*. 18(8), 2012, pp. 2570-2582.
- C. A. Salinas-Zavala, R. O. Martínez-Rincón y M. V. Morales-Zárte. "Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California", en: *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*. 94, 2017, pp. 82-90.
- Chen, X., Zhongjun Tan, D. Mark Schwartz and Chengxin Xu. "Determining the Growing Season of Land Vegetation on the Basis of Plant Phenology and Satellite Data in Northern China", en: *International Journal of Biometeorology*. 44(2), 2000, pp. 97-101.
- Deng, F., G. Su and C. Liu. "Seasonal Variation of MODIS Vegetation Indexes and Their Statistical Relationship With Climate Over the Subtropic Evergreen Forest in Zhejiang, China", en: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 4(2), 200, pp. 236-240.
- Hawinkel, P., W. Thiery, S. Lhermitte, E. Swinnen, B. Verbist, J. Van Orshoven and B. Muys. "Vegetation response to precipitation variability in East Africa controlled by biogeographical factors", en: *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 121, 2016, pp. 2422-2444.
- Herrera-Cervantes, Hugo. "Sea Surface Temperature, Ocean Color and Wind Forcing Patterns in the Bay of La Paz, Gulf of California: Seasonal Variability", en: *Atmósfera*. 32, 2019, pp. 25-38.
- Jiang, Weiguo, Lihua Yuan, Wenjie Wang, Ran Cao, Yunfei Zhang and Wenming Shen. "Spatio-Temporal Analysis of Vegetation Variation in the Yellow River Basin", en: *Ecological Indicators*. 51, 2014, pp. 117-126.
- _____ "Spatio-Temporal Analysis of Vegetation Variation in the Yellow River Basin", en: *Ecological Indicators*. 51, 2015, pp. 117-126.
- Li, Shuangshuang, Saini Yang, Xianfeng Liu, Yanxu Liu and Mimi Shi. "NDVI-Based Analysis on the Influence of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China", en: *Remote Sensing*. 7(9), 2015, pp. 11163-11182.
- Meng, Meng, Jian Ni and Meijuan Zong. "Impacts of Changes in Climate Variability on Regional Vegetation in China: NDVI-Based Analysis from 1982 to 2000", en: *Ecological Research*. 26(2), 2011, pp. 421-428.
- Revadekar, J. V. Yogesh K. Tiwari and K. Ravi Kumar. "Impact of Climate Variability on NDVI over the Indian Region during 1981-2010", en: *International Journal of Remote Sensing*. 33(22), 2012, pp. 7132-7150.
- Rodríguez-Moreno, Víctor Manuel, José Ariel Ruíz-Corral, Guillermo Medina-García, José Saúl Padilla-Ramírez y Thomas Gunter Kretzschmar. "Efecto de la condición ENSO en la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia en la península de Baja California (1998-2012)", en: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(spe10), 2014, pp. 1923-1937.
- Salinas-Zavala, C. A., A. V. Douglas and H. F. Diaz. "Interannual Variability of NDVI in Northwest Mexico. Associated Climatic Mechanisms and Ecological Implications", en: *Remote Sensing of Environment*. 82(2), 2002, pp. 417-430.
- Sohoulande Djebou, Dagbegnon C., Vijay P. Singh and Oliver W. Frauenfeld. "Vegetation Response to Precipitation Across the Aridity Gradient of the Southwestern United States", en: *Journal of Arid Environments*. 115, 2015, pp. 35-43.
- Troyo-Diéquez, Enrique, Francisco de Lachica-Bonilla and José L. Fernández-Zayas. "A Simple Aridity Equation for Agricultural Purposes in Marginal Zones", en: *Journal of Arid Environments*. 19(3), 1990, pp. 353-362.
- Vandandorj, Sumiya, Batdelger Gantsetseg and Bazartseren Boldgiv. "Spatial and Temporal Variability in Vegetation Cover of Mongolia and Its Implications", en: *Journal of Arid Land*. 7(4), 2015, pp. 450-461.
- Vázquez, Pablo, Eduardo Adema y Beatriz Fernández. "Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa", en: *Ecología Austral*. 23(2), 2013, pp. 77-86.
- Wang, Fei, Xuan Wang, Ying Zhao and Zhifeng Yang. "Temporal Variations of NDVI and Correlations between NDVI and Hydro-Climatological Variables at Lake Baiyangdian, China", en: *International Journal of Biometeorology*. 58(7), 2014, pp. 1531-1543.
- Wang, J., P. M. Rich and K. P. Price. "Temporal Responses of NDVI to Precipitation and Temperature in the Central Great Plains, USA", en: *International Journal of Remote Sensing*. 24(11), 2003, pp. 2345-2364.
- Wang, Jing, Kelin Wang, Mingyang Zhang and Chunhua Zhang. "Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Cover in Hilly Southern China", en: *Ecological Engineering*. 81, 2015, pp. 451-461.
- Yepes, Adriana y Marcos Silveira Buckeridge. "Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (revisión)" en: *Colombia Forestal*. 14(2), 2011, pp. 213-232.
- Zhao, Zhiqiang, Jiangbo Gao, Yanglin Wang, Jianguo Liu and Shuangcheng Li. "Exploring Spatially Variable Relationships between NDVI and Climatic Factors in a Transition Zone Using Geographically Weighted Regression", en: *Theoretical and Applied Climatology*. 120(3), 2015, pp. 507-519.
- Zhu, Lin, Huili Gong, Zhenxue Dai, Tingbao Xu and Xiaosi Su. "An Integrated Assessment of the Impact of Precipitation and Groundwater on Vegetation Growth in Arid and Semiarid Areas", en: *Environmental Earth Sciences*. 74(6), 2015, pp. 5009-5021.