

Análisis Comparativo de Índices de Cobertura Vegetal en el Bosque Seco de Guánica y Bosque Susúa, Puerto Rico

Paola N. Kalil-Rivera, UPRM-Dep. de Biología, paola.kalil@upr.edu

Introducción

Según Halliday (2013), los reptiles se encuentran en todos los continentes del mundo, a excepción de la Antártida, debido a su dependencia a las fuentes de calor externas, las cuales son predominantes en los trópicos y los desiertos. Esta aseveración lleva a la siguiente interrogante, ¿se cuenta con la presencia de reptiles en Puerto Rico? La respuesta es que si, actualmente se cuenta con la presencia de seis familias pertenecientes al orden Squamata, el cual, según Pyron et al. (2013), es considerado el grupo más grande y diverso en el cual se incluyen vertebrados terrestres, pero específicamente los reptiles escamosos como lagartos, serpientes y anfisbenios. Entre estas familias se encuentra Teiidae, la cual incluye a las lagartijas de cola de látigo, lagartijas corredoras y tegus, quienes se originaron en Sudamérica y se esparcieron a lo largo de Centroamérica, el Caribe y Norteamérica. Por lo general, sus integrantes tienden a mantener un régimen estricto con respecto a su conducta heliófila y su alimentación mayormente depredadora, acompañada por forrajeo activo y generalista dentro de un entorno terrestre (Nappo and Colli, 2024). Por otro lado, un género representante de esta familia es *Pholidoscelis*, dentro del cual se encuentran las lagartijas teiidas, quienes son representadas en Puerto Rico por cuatro especies cuya ubicación geográfica contrasta y de las cuales tres son consideradas endémicas (Bernstein et al., 2024; Bochaton et al., 2019).

Pholidoscelis wetmorei, o la siguana de cola azul puertorriqueña, es una de las tres especies endémicas de Puerto Rico correspondiente a este género. Esta se distingue por su coloración dorsal negra, acompañada de siete a nueve líneas longitudinales que se extienden desde la cabeza y el cuello hasta la cola, así como por un patrón de manchas circulares en cada extremidad, cuyo color varía de crema a blanco, mientras que su región ventral tiende a mantener tonalidades claras similares, y su cola, su rasgo más distintivo, puede variar de verde esmeralda a azul metálico (Stejneger, 2013). Sin embargo, la información más reciente con respecto a su distribución se encuentra en Distribution and geographic variation of the Ameivas of Puerto Rico and the Virgin Islands de Harold Heatwole y Frank Torres (1967), posteriormente corroborada por Albert Schwartz y Robert W. Henderson (1991). Esto indica que, para entonces, la especie se encontraba en el suroeste de Puerto Rico, desde Cabo Rojo hasta Guánica, junto con dos poblaciones adicionales en Isla Magueyes y Caja de Muertos. Nuevamente, esta información provee base para nuevas interrogantes, ¿sigue la especie habitando esos municipios? ¿ha cambiado algo en sus hábitats? ¿en qué se asemejan estos lugares para permitirle prosperar?

Tales preguntas llevan al objetivo principal detrás de este proyecto, el cuál pretende proveer una visualización preliminar con respecto a las diferencias y similitudes de la cobertura vegetal en el Bosque Estatal de Guánica y el Bosque Estatal de Susúa, ambos reconocidos por brindarle hábitat a este lagarto endémico.

Con respecto a qué caracteriza a estas localidades, Susúa, considerado como un bosque secundario por el hecho de haber sido alterado y luego haberse recuperado. Además de ser húmedo y subtropical, este se encuentra ubicado entre los municipios de Yauco y Sabana Grande, y está constituido por, aproximadamente, 3,341 cuerdas de terreno (DRNA, 2007). Por otro lado, según Murphy et al. (1995), Bosque Seco, ubicado alrededor de los municipios de Guánica, Yauco y Guayanilla, se caracteriza por ser seco y subtropical, además de estar constituido por, aproximadamente, 10,180 cuerdas de terreno.

La visualización de ambas áreas de estudio será posible por medio de la implementación de imágenes satelitales captadas por Sentinel-2. Este trata acerca de una misión de observación de la Tierra, perteneciente al Programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), la cual está compuesta por satélites gemelos cuyo objetivo es orbitar el planeta para obtener imágenes multi espectrales de alta resolución. El instrumento principal que utilizan para lograr la obtención de estas imágenes es el MSI (Multispectral Imager), un sensor óptico, con 13 bandas espectrales, resolución espacial de hasta diez metros y cinco días de revisita que permiten el monitoreo de vegetación, suelos, cuerpos de agua, zonas costeras y áreas afectadas por desastres naturales. Tras su lanzamiento el 23 de junio del 2015, el objetivo central detrás de su creación se basa en proveer imágenes frecuentes, consistentes y gratuitas para la ciencia, gobiernos y el público general (European Space Agency, 2015).

El procesamiento de estas imágenes involucrará la implementación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) por medio del programa de ArcGIS Pro. El NDVI, desarrollado en el marco del programa ERTS-1/Landsat 1 y publicado por Rouse et al. por primera vez en el 1974, se distingue por ser un índice espectral de vegetación que compara la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) con la del rojo para estimar la presencia, salud y densidad de la vegetación verde a través de la siguiente fórmula: $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$. Este se utiliza, principalmente, para evaluar la salud de la vegetación, detectar sequías y estrés hídrico, apoyar la agricultura de precisión, analizar la cobertura terrestre, estudiar cambios climáticos y patrones fenológicos, además de mapear áreas verdes y estimar la productividad primaria. Por otro lado, el SAVI es un índice espectral de vegetación ajustado al suelo, creado para corregir la influencia del brillo del suelo en escenas con baja cobertura vegetal. Este funciona con la adición de un factor de corrección L a la fórmula de NDVI, modificándola de la siguiente manera: $(1+L) (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L)$. Tras haber sido propuesto y publicado por Huete en el 1988, se ha utilizado para analizar vegetación en áreas donde el suelo expuesto afecta fuertemente la reflectancia, zonas áridas y semiáridas, estudios de restauración ecológica, degradación y desertificación, y, en especial, cuando el NDVI no es suficiente debido a la influencia del fondo del suelo.

Pregunta científica

¿Existe similitud en los índices de vegetación entre bosques con características diferentes cuando una misma especie habita en ambos?

Objetivos

- Calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) en dos áreas contrastantes por medio de ArcGIS Pro.
- Observar y analizar la distribución espacial de la cobertura vegetal en las dos áreas.
- Comparar los valores obtenidos para ambos índices entre las dos áreas seleccionadas.

Metodología

Las localidades escogidas para este proyecto fueron el Bosque Estatal de Guánica y el Bosque Estatal de Susúa, ubicados en el suroeste de Puerto Rico y constituidos por los municipios de Guánica, Guayanilla, Yauco y Sabana Grande. Se utilizaron imágenes satelitales de nivel uno provenientes del Sentinel-2 MSI (Multispectral Imager), obtenidas de <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>. Se realizó una búsqueda de imágenes correspondientes al 2025 y se eligieron dos obtenidas el día 3 de octubre debido a la presencia mínima de nubes sobre las áreas de estudio. Estas fueron descargadas individualmente en un archivo comprimido y, posteriormente, extraídas a la carpeta de trabajo.

Se comenzó con la creación de un nuevo proyecto en ArcGIS Pro y con la remoción de la capa topográfica de Puerto Rico. A continuación, se incorporó el archivo .xml correspondiente a la región central de la isla y se le extrajeron las bandas B2, B3, B4 y B8 a través de la función de bandas de subconjuntos (Subset bands), lo cual se exportó a la carpeta del proyecto en forma de un archivo TIFF. Posteriormente, a esta selección se le aplicó la función de NDVI $((B8-B4)/(B8+B4))$ utilizando las bandas tres y cuatro, en relación con el orden de las cuatro previamente escogidas, y al índice resultante se le aplicó una paleta de colores apropiada. Luego, se buscó en el catálogo el archivo TIFF y se incorporaron las bandas B4 y B8 al proyecto para entonces utilizar la función de calculadora ráster, insertar la fórmula y calcular el SAVI $(L+1*((B8-B4)/(B8+B4+L)))$, aplicando una paleta de colores apropiada una vez obtenido el índice final. Una vez obtenidos el NDVI y el SAVI para la región de Susúa se repitieron estos pasos con la imagen correspondiente a la región sur de la isla, es decir, la de Guánica.

Se utilizó ArcGIS Online para buscar una capa que tuviese relación con Puerto Rico y, preferiblemente, sus bosques. Tras la búsqueda se incorporó la capa de áreas terrestres protegidas en Puerto Rico durante el 18 y a esta se le agregó la capa de municipios, previamente utilizada en clase.

Una vez se realizaron los índices para las dos localidades, se procedió a la creación de los mapas, los cuales se construyeron de la siguiente manera en ambos

casos: un recorte de los municipios involucrados con el NDVI y otro con el SAVI con y sin la capa de las áreas terrestres protegidas, resultando en un total de cuatro mapas por localidad, en adición a un mapa dedicado exclusivamente a esta última y a la capa de municipios de Puerto Rico. Se culminó con la construcción de nueve mapas a los cuales se les incorporaron los elementos cartográficos básicos, es decir, título, leyenda, escala, flecha del norte y la cuadrícula, y se exportaron en formato JPEG a la carpeta del proyecto para ser analizados.

Resultados y discusión

Como parte del análisis correspondiente a las áreas de estudio, se comenzó con el Bosque Estatal de Guánica. Para este, primero se implementó el NDVI, en el cual se observó una abundancia en tonos pálidos de amarillo y verde, ubicados entre los valores de 0.2 y 0.4 (Figura 2). Adicionalmente, no se observó una cantidad significativa de áreas, más allá de parchos relativamente pequeños, cuyos valores fuesen cercanos a 0.5 y 0.6, pero tampoco zonas mayormente rojizas o negativas. Esto es consistente con lo esperado para un bosque seco subtropical, el cual siempre devengará valores naturalmente más bajos a si se compara con un bosque húmedo. Al no tener interferencia por nubes, los valores observados no indicaron estrés severo más allá de una condición típica de la localidad, en especial si se tiene en consideración que el efecto de la época seca no se ha disipado por completo. Consecuentemente, el SAVI mostró principalmente tonos marrones dentro del bosque, lo cual es representativo del área por ser indicativo de suelo expuesto, vegetación dispersa y dosel bajo (Figura 4). Sin embargo, se observaron zonas verdes más intensas al norte y noroeste, junto con parches al suroeste y en cercanías a cuerpos de agua, lo que pudiese asociarse con sectores agrícolas y áreas urbanas que reciben irrigación con más frecuencia, resultando en vegetación más densa. Al igual que lo observado para el índice anterior, los valores no indicaron decadencia más allá de lo esperado para un sistema seco subtropical en el cual la vegetación es dispersa, pero saludable, y moderadamente activa.

Con respecto al análisis de la imagen correspondiente al Bosque Estatal de Susúa, se tomó en consideración que los resultados que devengara se verían ligeramente influenciados por la presencia de nubes dispersas, las cuales adoptaron una tonalidad amarillenta tras la implementación del NDVI. En las áreas más cercanas a los bordes del bosque se observaron zonas en tonalidades pálidas de amarillo, correspondientes a valores cercanos a 0.2 y 0.3, mientras que, en las secciones centrales, tanto norte como suroeste, había predominancia alrededor de 0.5 y 0.6 (Figura 6). Adicionalmente, no se apreciaron zonas en tonalidades intensamente rojizas, indicando que los valores observados son una representación de vegetación activa, aunque no completamente densa, lo cual es consistente con lo esperado para un bosque secundario que posee espacios abiertos entre los árboles y arbustos, así como áreas sin dosel, además de estar influenciado por la precipitación estacional. Por otro lado, el SAVI mostró gran parte del terreno a través de tonalidades marrones, apuntando a una mayor exposición de suelo o una

combinación de este con la vegetación. En las áreas centrales, al igual que hacia el sur y noroeste, se distinguen zonas donde las tonalidades de verde son más intensas, lo cual aporta como indicativo de vegetación mucho más saludable y densa (Figura 8). Por ende, la proporción de tonalidades marrones sobre las verdes no necesariamente señala a una degradación severa, sino que apunta a la predominancia de sustrato expuesto o seco, áreas de vegetación baja y dispersa, y el efecto de las nubes o sombras al momento de procesar la imagen.

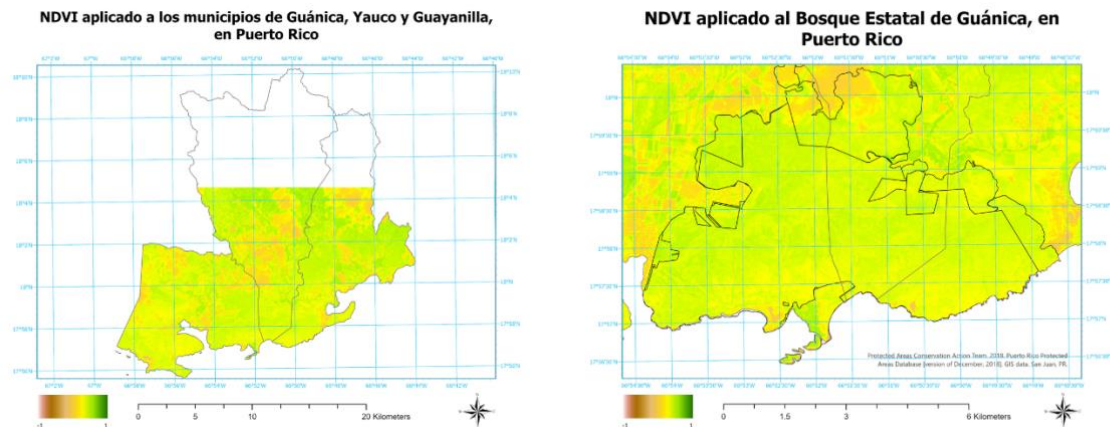


Figura 1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) aplicado a los municipios de Guánica, Yauco y Guayanilla, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025. **Figura 2.** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) aplicado al Bosque Estatal de Guánica, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025.

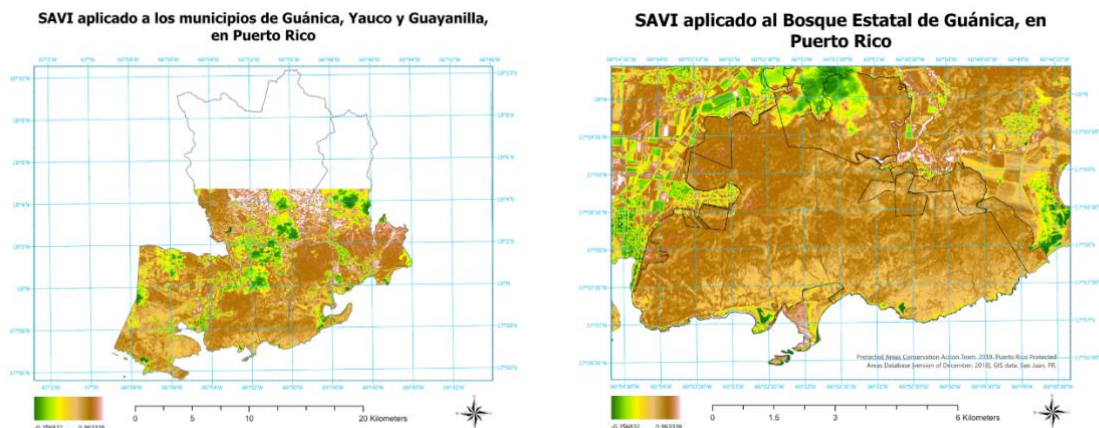


Figura 3. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) aplicado a los municipios de Guánica, Yauco y Guayanilla, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025. **Figura 4.** Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) aplicado al Bosque Estatal de Guánica, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025.

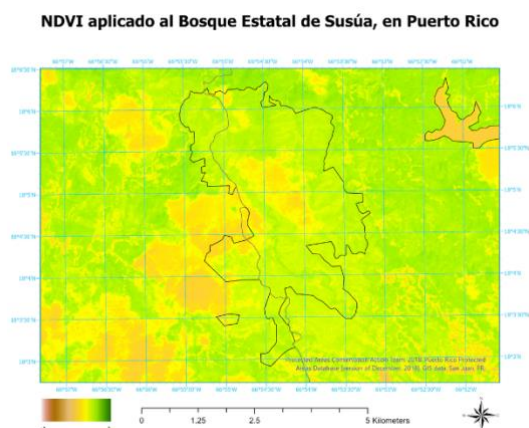
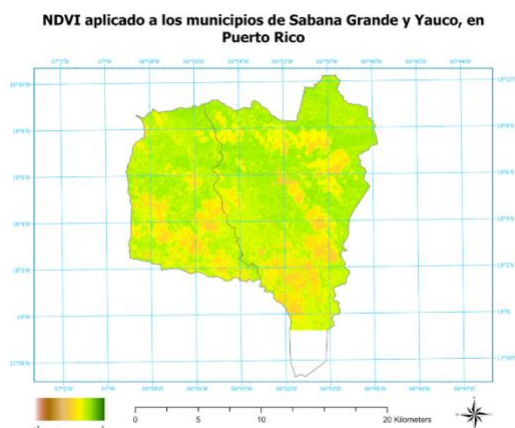


Figura 5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) aplicado a los municipios de Sabana Grande y Yauco, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025. **Figura 6.** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) aplicado al Bosque Estatal de Susúa, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025.

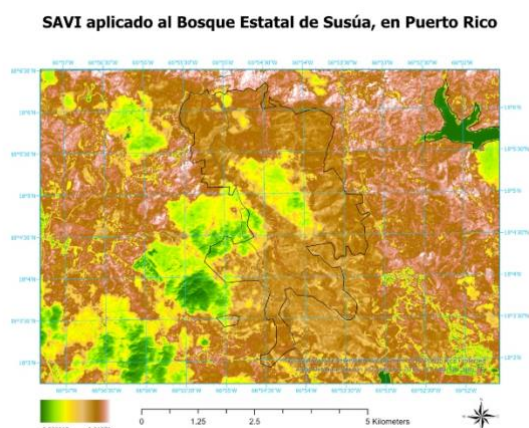


Figura 7. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) aplicado a los municipios de Sabana Grande y Yauco, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025. **Figura 8.** Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) aplicado al Bosque Estatal de Susúa, en Puerto Rico, durante el 3 de octubre del 2025.

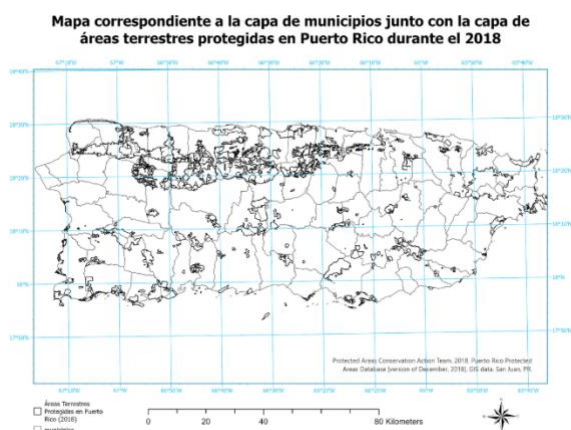


Figura 9. Capa de las áreas terrestres protegidas de Puerto Rico durante el 2018 colocada sobre la capa de los municipios.

Limitaciones del proyecto

Entre las limitaciones para este proyecto se encuentra la influencia de las nubes sobre el área de Susúa debido a su ubicación geográfica, puesto que, durante la búsqueda de las imágenes, los meses y días posteriores al 3 de octubre contaban con una presencia significativa de estas, obstaculizando el área y dificultando su procesamiento. En adición a esto, se pretendía utilizar ArcGIS online para incorporar una capa relacionada a la precipitación en Puerto Rico que pudiese aportar a la visualización de los recursos disponibles en ambos bosques, ya fuese en forma de una distribución anual o, preferiblemente, del año 2025, pero la información disponible únicamente abordaba distribuciones atribuidas a eventos atmosféricos específicos como tormentas o huracanes.

Conclusiones

Con respecto a los resultados obtenidos para Susúa, ambos índices indicaron patrones relativamente normales en su cobertura vegetal, ausencia de deterioro severo y, considerando su variabilidad interna, una actividad fotosintética saludable. Similarmente, para Guánica se observó consistencia en cuanto a los patrones estacionales del área, es decir, vegetación con actividad fotosintética moderada, sectores de mayor verdor, posiblemente, asociados la disponibilidad de agua y ausencia de degradación masiva o reciente.

Al comparar ambos bosques se puede inferir que los valores altos observados para Susúa corresponden a su condición de bosque húmedo subtropical, mientras que para Guánica los valores bajos lo son para bosque seco subtropical. En términos generales, para el 3 de octubre del 2025, ambos bosques mostraron vegetación saludable y acorde a sus dinámicas naturales, sin aparente influencia de deforestación u otra forma de degradación ambiental. Adicionalmente, se pudo determinar que, aunque difieren en condiciones climáticas y tipo de vegetación, ambos bosques comparten características ecológicas esenciales para la supervivencia y subsistencia de lagartos, como *P. wetmorei*. Esto quiere decir que son capaces de proveer espacios con disponibilidad de sol y sombra para efectos de termorregulación, estructuras de vegetación y microhábitats para ofrecer refugios y áreas de puesta de huevos, abundancia de insectos y arácnidos, y un ambiente térmico apropiado para sostener poblaciones de estos organismos.

Recomendaciones

A modo de aportar a la visualización, se puede hacer una búsqueda mucho más exhaustiva que posibilite la implementación de datos de precipitación. Esto con el objetivo de corroborar las condiciones indicadas por los índices al crear una línea de tiempo acorde con las lluvias estacionales que los bosques reciben. Adicionalmente, al estudio se le pudiesen incorporar imágenes correspondientes a

Isla Magueyes y Caja de Muertos, con el fin de generar una comparación mucho más amplia que permita determinar si, en el caso de no ser habitados por la especie actualmente, se encuentran lo suficientemente saludables como para reintroducirla y que esta prospere. Finalmente, la incorporación de coordenadas en las cuales se haya documentado la presencia de la especie en las localidades pudiese relacionarse con el estado de la vegetación en puntos específicos, lo cual permitiría reforzar las conclusiones actuales al evidenciar que las características de algunas zonas son cruciales para que la actividad se lleve a cabo.

Referencias

- Liepa, A., Thiel, M., Taubenböck, H., Steffan-Dewenter, I., Abu, I.-O., Dhillon, M. S., Otte, I., Otim, M. H., Lutaakome, M., Meinhof, D., Martin, E. A., & Ullmann, T. (2024). Harmonized NDVI time-series from Landsat and Sentinel-2 reveal phenological patterns of diverse, small-scale cropping systems in East Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101230. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101230>
- Qin, Q., Xu, D., Hou, L., Shen, B., & Xin, X. (2021). Comparación de índices de vegetación de Sentinel-2 y Landsat 8 bajo diferentes gradientes de vegetación basados en un experimento de pastoreo controlado. *Ecological Indicators*, 130, 108363. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108363>
- Hu, T., & Smith, R. B. (2018). The impact of Hurricane Maria on the vegetation of Dominica and Puerto Rico using multispectral remote sensing. *Remote Sensing*, 10(6), 827. <https://doi.org/10.3390/rs10060827>
- European Space Agency. (2015). Sentinel-2 user handbook. ESA Standard Document. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Halliday, T. (2013). Endangered Reptiles. En S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity* (2.^a ed., pp. 216-218). Academic Press.
- Pyron, R. A., Burbrink, F. T., & Wiens, J. J. (2013). A phylogeny and revised classification of Squamata, including 4161 species of lizards and snakes. *BMC Evolutionary Biology*, 13(1), 93. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-13-93>
- Martinuzzi, S., Gould, W. A., Ramos González, O. M., Martínez Robles, A., Calle Maldonado, P., Pérez-Buitrago, N., & Fumero Caban, J. J. (2008). Mapping tropical dry forest habitats integrating Landsat NDVI, Ikonos imagery, and topographic information in the Caribbean Island of Mona. *Revista de Biología Tropical*, 56(2), 625–639. <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i2.5613>
- Huete, A.R., 1988: A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Grest Plains with ERTS. NASA. Third ERTS Symposium, 309-317.

Heatwole, H., & Torres, F. (1967). Distribution and geographic variation of the Ameivas of Puerto Rico and the Virgin Islands. Studies on the Fauna of Curaçao and Other Caribbean Islands, 92, 63–111.

Stejneger, L. (1913). Proceedings of the Biological Society of Washington, 26, 69–71. <https://www.biodiversitylibrary.org/page/3337912>