

EVALUACIÓN DE FACTORES BIOFÍSICOS QUE INFLUYEN EN LA
MOVILIDAD DEL FÓSFORO EN LA PARTE SUPERIOR DE LA FINCA
ALZAMORA (RUM) A PARTIR DEL ANÁLISIS DE TEMPERATURA
DEL SUELO E INDICE DE VEGETACIÓN MEDIANTE ARCGIS PRO

Remote sensing and geographic information systems applied to biology

BIOL5038-080

Por: Juan Pablo Quintero García

Docente: Dr. Fernando Gilbes Santaella

Diciembre 2025, Mayagüez Puerto Rico



Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| INTRODUCCION | 3 |
| PREGUNTA CIENTIFICA | 5 |
| OBJETIVO | 6 |
| METODOLOGIA | 7 |
| Area de estudio..... | 9 |
| Características de cámaras de drones | 10 |
| Procesamiento de imágenes en WebODM | 12 |
| Procesamiento de ortomosaico en ArcGIS pro | 13 |
| RESULTADOS Y DISCUSION..... | 15 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 19 |
| REFERENCIAS..... | 20 |

Tabla de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 <i>esquema metodológico</i> | 8 |
| Figure 2 <i>área de estudio delimitada, finca Alzamora RUM</i> | 9 |
| Figure 3 <i>Drone, DJI Mavic 3 T</i> | 10 |
| Figure 4 <i>Drone, DJI Mavic 3 M</i> | 11 |
| Figure 5 <i>finalización de proceso de ortomosaico en WebODM</i> | 12 |
| Figure 6 <i>finalización de proceso de ortomosaico en WebODM</i> | 12 |
| Figure 7 <i>Ortomosaico parte superior finca Alzamora</i> | 12 |
| Figure 8 <i>cálculo de índice de vegetación en ArcGIS pro</i> | 13 |
| Figure 9 <i>Procesamiento de mapas temáticos en ArcGIS pro</i> | 14 |
| Figure 10 <i>Mapa temático área de estudio, parte superior finca Alzamora RUM</i> | 15 |
| Figure 11 <i>Ortomosaico termal, parte superior de la finca Alzamora RUM</i> | 16 |
| Figure 12 <i>Ortomosaico NDVI, parte superior de la finca Alzamora RUM</i> | 17 |

Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Características principales de cámaras de drone DJI Mavic 3 T</i> | 10 |
| Tabla 2 <i>Características principales de cámaras de drone DJI Mavic 3 M</i> | 11 |



INTRODUCCION

El fósforo es uno de los macronutrientes esenciales para el desarrollo de los sistemas agrícolas, ya que participa directamente en procesos fisiológicos clave como la transferencia de energía, el crecimiento radicular y la formación de tejidos vegetales. Su presencia adecuada en el suelo contribuye de manera significativa a la productividad agrícola, al establecimiento de la vegetación y al rendimiento de los cultivos, especialmente en suelos tropicales donde este nutriente suele ser un factor limitante (Havlin et al., 2014; FAO, 2019). Gracias a su papel en el metabolismo vegetal, el fósforo ha sido ampliamente utilizado como fertilizante para mejorar la eficiencia productiva y garantizar la seguridad alimentaria.

Sin embargo, cuando el fósforo se encuentra en concentraciones excesivas, puede convertirse en un contaminante ambiental. Diversos estudios han demostrado que el fósforo puede movilizarse desde el suelo hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos mediante procesos de lixiviación e infiltración, afectando negativamente la calidad del agua y favoreciendo fenómenos como la eutrofización (Sharpley et al., 1994; Withers & Jarvie, 2008). Esta problemática adquiere especial relevancia si se considera que aproximadamente el 97 % del agua del planeta es salada, mientras que solo cerca del 3 % corresponde a agua dulce. De este pequeño porcentaje, alrededor del 69 % se encuentra en glaciares, cerca del 30 % en aguas subterráneas y menos del 1 % está disponible en ríos, lagos y otras fuentes superficiales accesibles para el consumo humano (USGS, 2023). Estos datos resaltan la importancia de proteger las reservas de agua subterránea, que representan una de las principales fuentes de agua dulce disponible a nivel mundial.

La movilidad del fósforo en el suelo no depende únicamente de su concentración, sino también de factores ambientales como la temperatura y las propiedades físicas y químicas del suelo. Investigaciones previas indican que el aumento de la temperatura del suelo puede acelerar los procesos biogeoquímicos y favorecer el transporte del fósforo, incrementando su movilidad y el riesgo de que alcance los acuíferos subterráneos (McDowell et al., 2003; Börling et al., 2004). Asimismo, el tipo de suelo juega un papel determinante, ya que características como la textura, el contenido de arcilla, la capacidad de adsorción y la materia orgánica influyen directamente en la retención o liberación del fósforo (Sims & Pierzynski, 2005).

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo identificar zonas críticas en la parte superior de la finca Alzamora, ubicada en el Recinto Universitario de Mayagüez (RUM), donde el transporte de fósforo hacia las aguas subterráneas podría verse intensificado debido a elevadas temperaturas del suelo. Para ello, se empleará tecnología de percepción remota mediante vuelos con drones: un dron DJI M para la obtención de imágenes multispectrales que permitan calcular el índice de vegetación normalizado (NDVI), y un dron DJI T equipado con sensores térmicos para medir la temperatura de la superficie del suelo. Las imágenes recolectadas serán procesadas en el software WebODM



para la generación de ortomosaicos y posteriormente exportadas a ArcGIS Pro, donde se elaborarán mapas temáticos de índice de vegetación y temperatura. Adicionalmente, se integrará información edáfica proveniente del Living Atlas de ArcGIS Pro, utilizando la capa *USA Soils Map Units*, con el fin de identificar los tipos de suelo presentes en el área de estudio y analizar su influencia en el transporte del fósforo.



PREGUNTA CIENTIFICA

¿Qué relación existe entre la temperatura superficial, el índice de vegetación y la morfología del suelo con la movilidad del fósforo según el análisis espacial en ArcGIS Pro?

La relación entre la temperatura superficial del suelo, el índice de vegetación normalizado (NDVI) y la morfología del suelo con la movilidad del fósforo se explica por la interacción de procesos físicos y biogeoquímicos que controlan la retención y el transporte de este nutriente en sistemas agrícolas. El fósforo, aunque esencial para el crecimiento vegetal, puede movilizarse fuera del sistema suelo-planta cuando las condiciones ambientales favorecen su liberación y desplazamiento vertical, especialmente hacia las aguas subterráneas (Sharpley et al., 1994; Sims & Pierzynski, 2005). La temperatura superficial influye en la actividad microbiana y en las reacciones de adsorción y desorción del fósforo, lo que puede aumentar su disponibilidad y potencial de transporte bajo ciertas condiciones (McDowell et al., 2003; Börling et al., 2004). El NDVI, como indicador de la cobertura vegetal, refleja la capacidad del sistema para absorber nutrientes y proteger el suelo frente a procesos que facilitan la pérdida de fósforo; por ello, valores bajos de NDVI suelen asociarse con una mayor vulnerabilidad al transporte de este nutriente (Withers & Jarvie, 2008). Asimismo, la morfología del suelo condiciona la movilidad del fósforo al influir en la permeabilidad y en la capacidad de retención del suelo, siendo los suelos más permeables potencialmente más susceptibles al transporte vertical (Sims & Pierzynski, 2005). El análisis espacial integrado de estas variables en ArcGIS Pro permite identificar zonas donde la combinación de altas temperaturas superficiales, baja cobertura vegetal y tipos de suelo susceptibles podría incrementar el riesgo de movilización del fósforo hacia los acuíferos, un aspecto relevante considerando la importancia de las aguas subterráneas como fuente limitada de agua dulce (USGS, 2023).



OBJETIVO

Esta investigación busca identificar y delimitar las zonas críticas en la parte alta de Finca Alzamora, que por sus condiciones biofísicas son más susceptibles a la rápida movilización de fósforo, en lugares con una temperatura elevada donde la combinación de factores ambientales favorece su transferencia a sectores sensibles. Para lograrlo, se analizará de forma integrada la distribución espacial de la temperatura superficial (obtenida con dron térmico), el índice de vegetación (NDVI) (derivado de información multiespectral), buscando establecer patrones de correspondencia que se contrastarán con la literatura científica sobre la relación vegetación-temperatura-suelo y su influencia en la movilidad del nutriente. Como producto aplicado, se elaborarán y presentarán tres mapas temáticos finales NDVI, temperatura y tipo de suelo con todos los elementos cartográficos necesarios, permitiendo la integración visual y analítica de la información para identificar áreas prioritarias y respaldar las decisiones de gestión y monitoreo de los sectores más vulnerables de la finca.



METODOLOGIA

La metodología que se implementó en este proyecto de investigación se dividió en varias etapas con el propósito de garantizar una correcta planificación, toma de datos y análisis de la información espacial, como primera fase, se realizó una visita de campo a la parte superior de la Finca Alzamora en el RUM con el objetivo de reconocer el área de estudio, y determinar las condiciones del terreno y poder establecer planes de vuelo independientes, utilizando un dron multiespectral (DJI Mavic 3 M) y un dron térmico (DJI Mavic 3 T), para lograr los objetivos del estudio.

Ya que la zona de estudio se encuentra en un área con tráfico aéreo, antes de la salida de campo se diligencio el permiso correspondiente a través de la plataforma Aloft Air Control, se obtuvo una altura máxima de vuelo de 200 pies, sin embargo, los vuelos se realizaron a una altura de 180 pies para poder tener alcance de toda la zona de estudio.

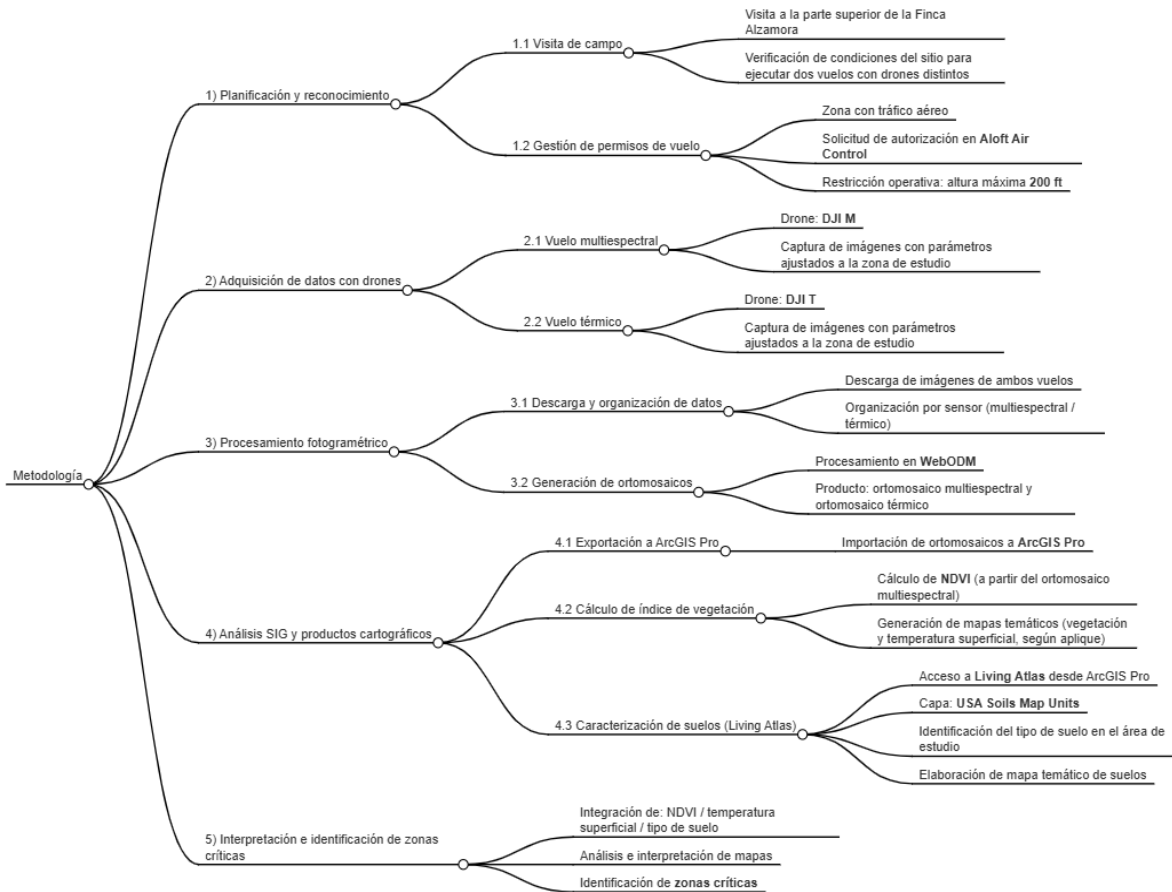
Una vez en el área de estudio, se llevaron a cabo ambos vuelos, configurando los parámetros de captura de imágenes de acuerdo con los requerimientos del análisis multiespectral y térmico, una vez se termino la toma de datos, las imágenes fueron descargadas, organizadas y procesadas mediante el software WebODM, con el fin de generar los ortomosaicos correspondientes a cada tipo de sensor.

Posteriormente, los ortomosaicos resultantes fueron exportados a ArcGIS Pro, donde se calculo se calculó el índice de vegetación normalizado (NDVI), y se elaboraron los mapas temáticos requeridos para la interpretación espacial de la cobertura vegetal y las condiciones del suelo, también el ortomosaico térmico permitió analizar la distribución de la temperatura superficial en el área de estudio.

Por otro lado tambien, se accedió al Living Atlas de ArcGIS Pro para incorporar la capa “USA Soils Map Units”, lo que permitió identificar el tipo de suelo presente en la zona de estudio y generar un mapa temático de suelos, por ultimo, se integraron y analizaron los resultados obtenidos de índice de vegetación (NDVI), información térmica y tipo de suelo con el propósito de identificar las zonas críticas dentro de la Finca Alzamora, con potencial impacto en el transporte de fósforo hacia las aguas subterráneas.



Figura 1 *esquema metodológico*



own font, made in markmap

El esquema metodológico permite ver con mas claridad como fue el proceso de todo el proyecto, es importante resaltar que el proyecto se realizo a lo largo de aproximadamente 20 días.



Area de studio

Figure 2 área de estudio delimitada, finca Alzamora RUM



Fuente propio, hecho en Google earth

En área de estudio cuenta con un área de 7.704 m² y un perímetro de 346,25 m aproximadamente, es importante resaltar que esta zona, es la parte con mas altitud de la finca Alzamora, en este lugar se encuentra mayormente vegetación alta, árboles y una vía que atraviesa toda la finca, se determino esta zona con el finde incentivar a los estudiantes para que hagan uso de este lugar para sus proyectos de investigación, y poder dar un mantenimiento constante.

Características de cámaras de drones

Figure 3 Drone, DJI Mavic 3 T



Fuente, DJI Enterprise

Tabla 1 Características principales de cámaras de drone DJI Mavic 3 T

| Cámara (DJI Mavic 3T) | Tipo / Sensor | Parámetros ópticos principales | Resolución / Zoom | Longitud de onda |
|----------------------------|---|---|---|------------------|
| Gran angular (RGB) | CMOS 1/2", 48 MP | FOV 84°, eq. 24 mm, f/2.8, enfoque 1 m–∞ | Imagen máx. 8000×6000 | N/A |
| Telecámara (Zoom) | CMOS 1/2", 12 MP | FOV 15°, eq. 162 mm, f/4.4, enfoque 3 m–∞ | Zoom digital 8×; zoom híbrido máx. 56× | N/a |
| Cámara térmica (IR) | Microbolómetro VOx no refrigerado; pixel pitch 12 μm; 30 Hz | DFOV 61°, eq. 40 mm, f/1.0, enfoque 5 m–∞ | Video térmico 640×512 a 30 fps; zoom digital térmico 28×; medición: –20 a 150 °C (alta ganancia) y 0 a 500 °C (baja ganancia) | 8–14 μm |

Fuente, DJI (2022). DJI Mavic 3E/3T Manual de usuario (v1.2, 2022.11).

Figure 4 Drone, DJI Mavic 3 M



Fuente, DJI Enterprise

Tabla 2 Características principales de cámaras de drone DJI Mavic 3 M

| Cámara / Banda (DJI Mavic 3M) | Tipo / sensor | Parámetros ópticos principales | Tamaño máx. de imagen | Longitud(es) de onda (banda estrecha) |
|--|-------------------|---|-----------------------|---------------------------------------|
| Cámara RGB | CMOS 4/3", 20 MP | FOV 84°, eq. 24 mm, f/2.8–f/11, enfoque 1 m–∞; obturador electrónico y mecánico | 5280×3956 | N/A |
| Multiespectral – Verde (G) | CMOS 1/2.8", 5 MP | FOV 73.91°, eq. 25 mm, f/2.0 | 2592×1944 | 560 ± 16 nm |
| Multiespectral – Rojo (R) | CMOS 1/2.8", 5 MP | FOV 73.91°, eq. 25 mm, f/2.0 | 2592×1944 | 650 ± 16 nm |
| Multiespectral – Borde rojo (RE) | CMOS 1/2.8", 5 MP | FOV 73.91°, eq. 25 mm, f/2.0 | 2592×1944 | 730 ± 16 nm |
| Multiespectral – Infrarrojo cercano (NIR) | CMOS 1/2.8", 5 MP | FOV 73.91°, eq. 25 mm, f/2.0 | 2592×1944 | 860 ± 26 nm |

Fuente, DJI (2022). DJI Mavic 3E/3T Manual de usuario (v1.2, 2022.11).



Procesamiento de imágenes en WebODM

Figure 5 finalización de proceso de ortomosaico en WebODM



Figure 6 finalización de proceso de ortomosaico en WebODM

Figure 7 Ortomosaico parte superior finca Alzamora

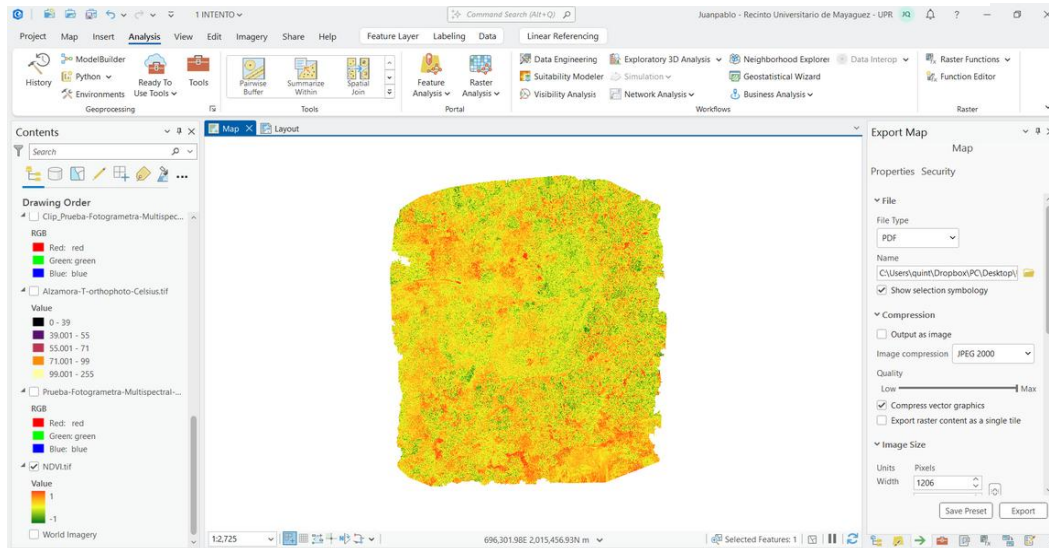


Fuentes propia, hecho en WebODM

En cuanto al procesamiento de imágenes en WebODM se obtuvo un aproximado de 545 imágenes las cuales tardaron alrededor de 10.17 horas.

Procesamiento de ortomosaico en ArcGIS pro

Figure 8 cálculo de índice de vegetación en ArcGIS pro

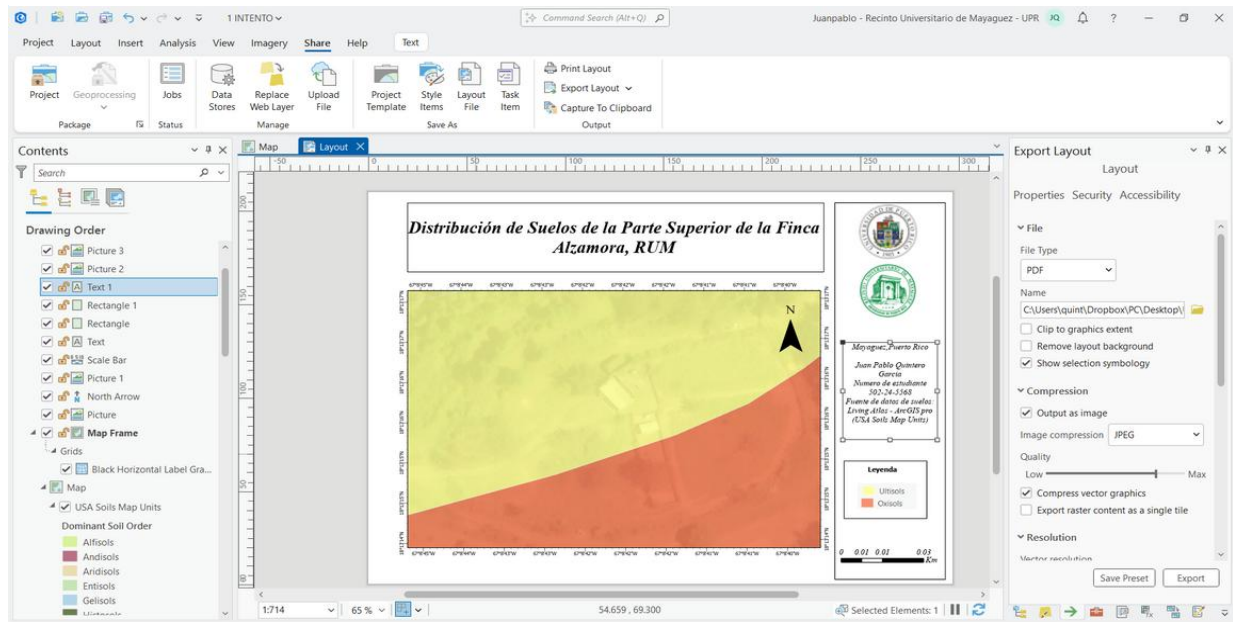


Fuente propia, hecho en ArcGIS pro

Una vez generado el ortomosaico a partir de las imágenes capturadas por el dron multiespectral y procesadas en el software WebODM, este producto fue exportado a ArcGIS Pro para su análisis espacial. En dicho entorno, se procedió al cálculo del índice de vegetación normalizado (NDVI), el cual permite evaluar el estado y la densidad de la cobertura vegetal a partir de la reflectancia registrada en las bandas espectrales del rojo y del infrarrojo cercano. El NDVI se calculó utilizando la expresión $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, donde NIR corresponde a la reflectancia del infrarrojo cercano y Red a la reflectancia del espectro rojo. Este índice genera valores que oscilan entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una vegetación densa y saludable, mientras que valores bajos o negativos se asocian con suelos desnudos, cuerpos de agua o vegetación escasa. El mapa de NDVI obtenido sirvió como base para la elaboración de mapas temáticos y para la posterior interpretación espacial de la cobertura vegetal dentro del área de estudio.



Figure 9 Procesamiento de mapas temáticos en ArcGIS pro

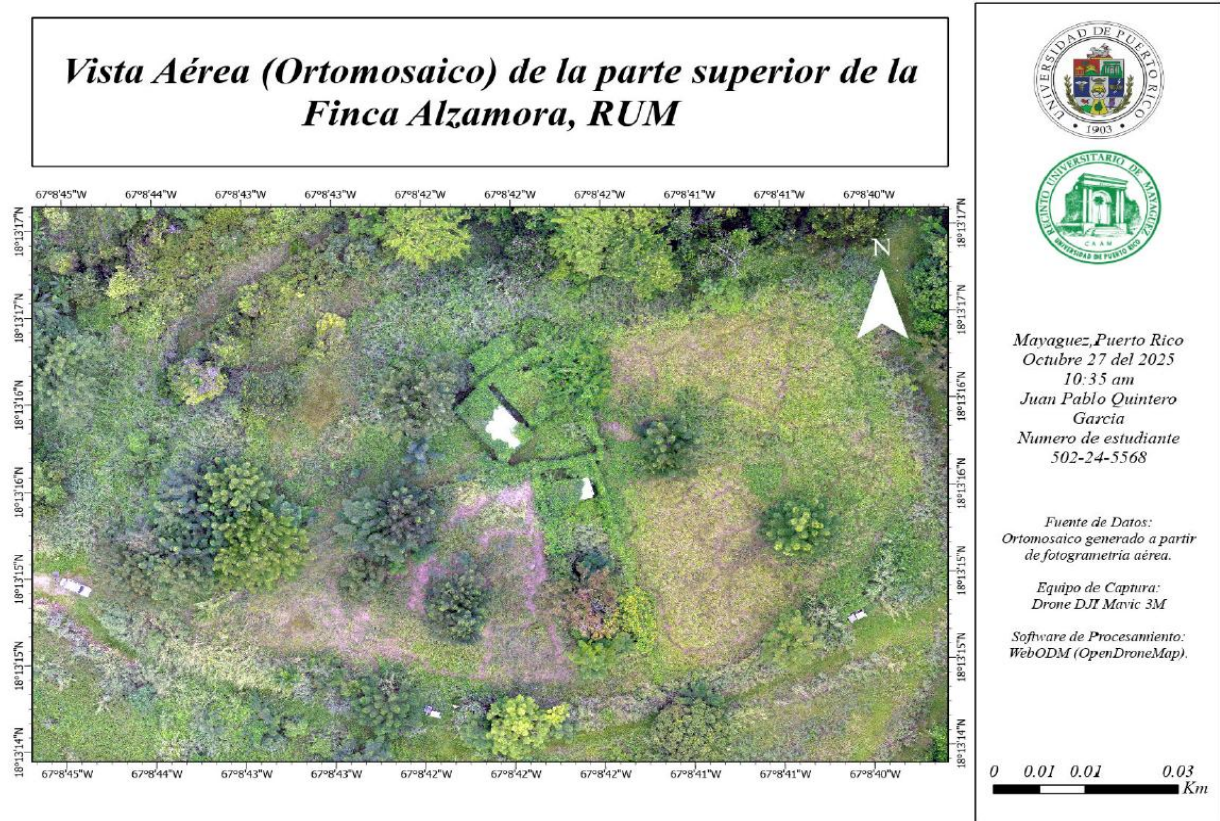


Fuente propia, hecho en ArcGIS pro

Una vez se tienen los ortomosaico se comienza a procesar todos los elementos del mapa temático como lo son un título, grilla de coordenadas, norte, leyenda y una escala, en este caso también se determinan la paleta de colores con las que se alcance a apreciar las zonas mas criticas que se quieren analizar.

RESULTADOS Y DISCUCION

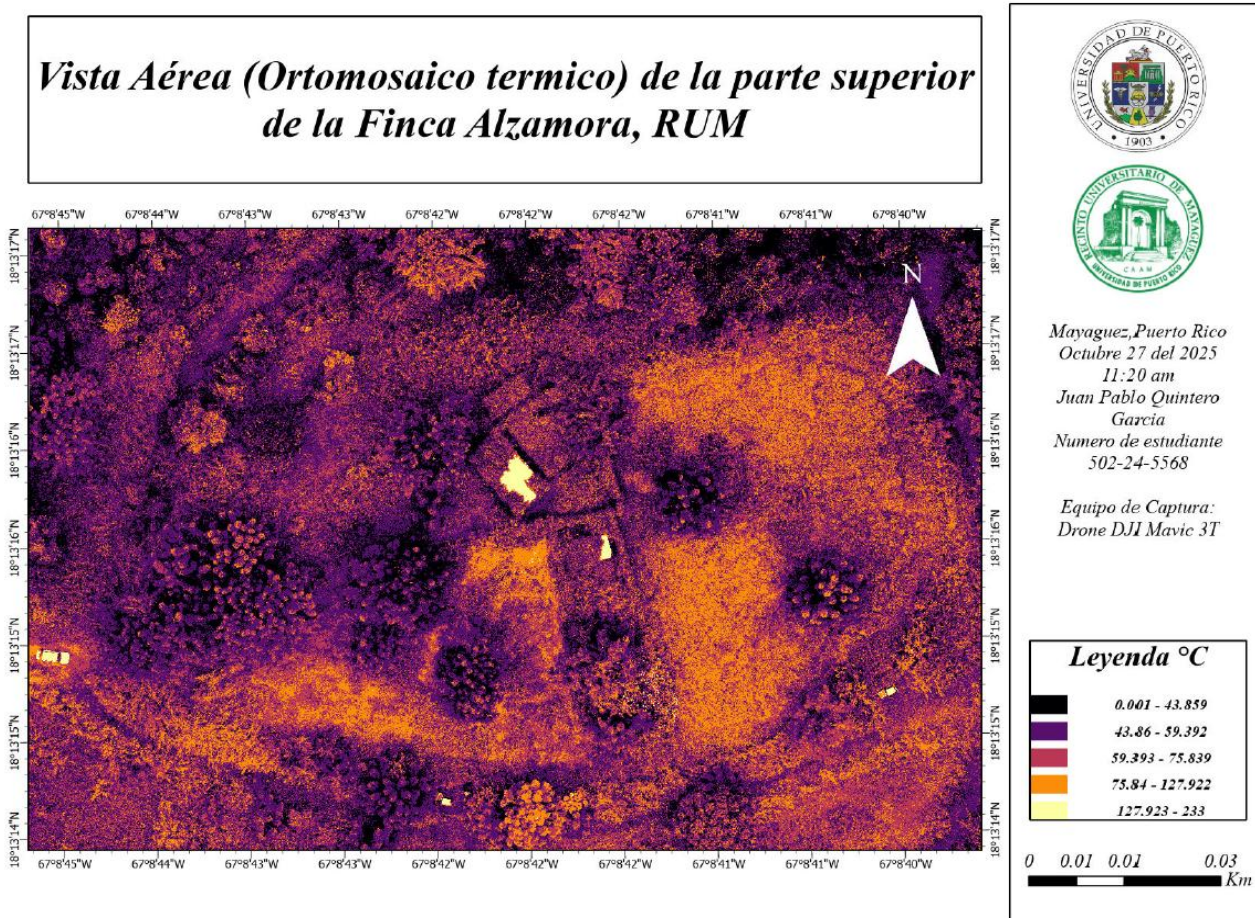
Figure 10 Mapa temático área de estudio, parte superior finca Alzamora RUM



Fuente propia, hecho en ArcGIS pro

Este mapa corresponde a una vista aérea del área de estudio, construida a partir de la captura de imágenes obtenidas con el dron DJI Mavic 3 M, las cuales fueron posteriormente procesadas en el software WebODM para la generación del ortomosaico. La imagen presentada corresponde a una composición de colores verdaderos, en la que se puede apreciar una cobertura vegetal predominante en la zona de estudio, con áreas que presentan mayor densidad de vegetación en comparación con otras, reflejando una distribución espacial heterogénea de la cobertura vegetal.

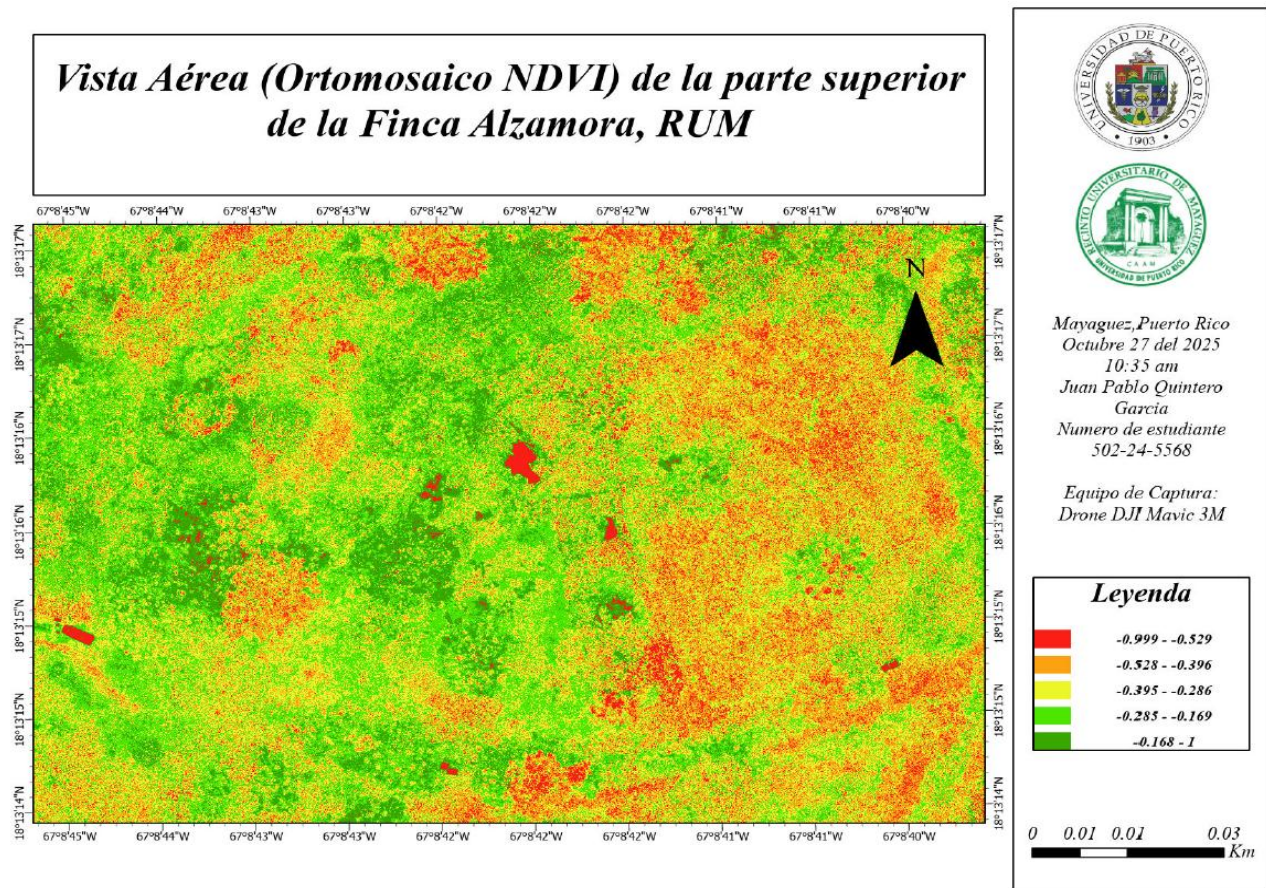
Figure 11 Ortomosaico termal, parte superior de la finca Alzamora RUM



Fuente propia, hecho en ArcGIS pro

En este caso, se observa que las zonas con menor cobertura vegetal presentan temperaturas superficiales más elevadas, así como las puntas de las hojas de los árboles, lo que permite identificar áreas potencialmente más críticas en relación con el transporte rápido del fósforo. Esta relación sugiere que la ausencia o escasez de vegetación favorece una mayor absorción de radiación y, por ende, un incremento de la temperatura superficial del suelo. No obstante, los rangos de temperatura mostrados en la leyenda, expresados en grados Celsius, presentan cierto desfase. Esta situación se debe a que los vuelos fueron planificados para cubrir un área mayor que la delimitada como área de estudio, y durante el procesamiento en WebODM el ortomosaico térmico no fue generado de manera completa para toda la extensión volada. Aunque la porción procesada corresponde efectivamente al área de estudio, se considera que esta limitación en el procesamiento influyó en la distribución de los valores de temperatura representados en la leyenda. En consecuencia, los datos parecen haberse agrupado únicamente en la zona procesada correctamente, lo que pudo generar valores extremos, tanto muy bajos como muy elevados, dentro del área analizada.

Figure 12 Ortomosaico NDVI, parte superior de la finca Alzamora RUM

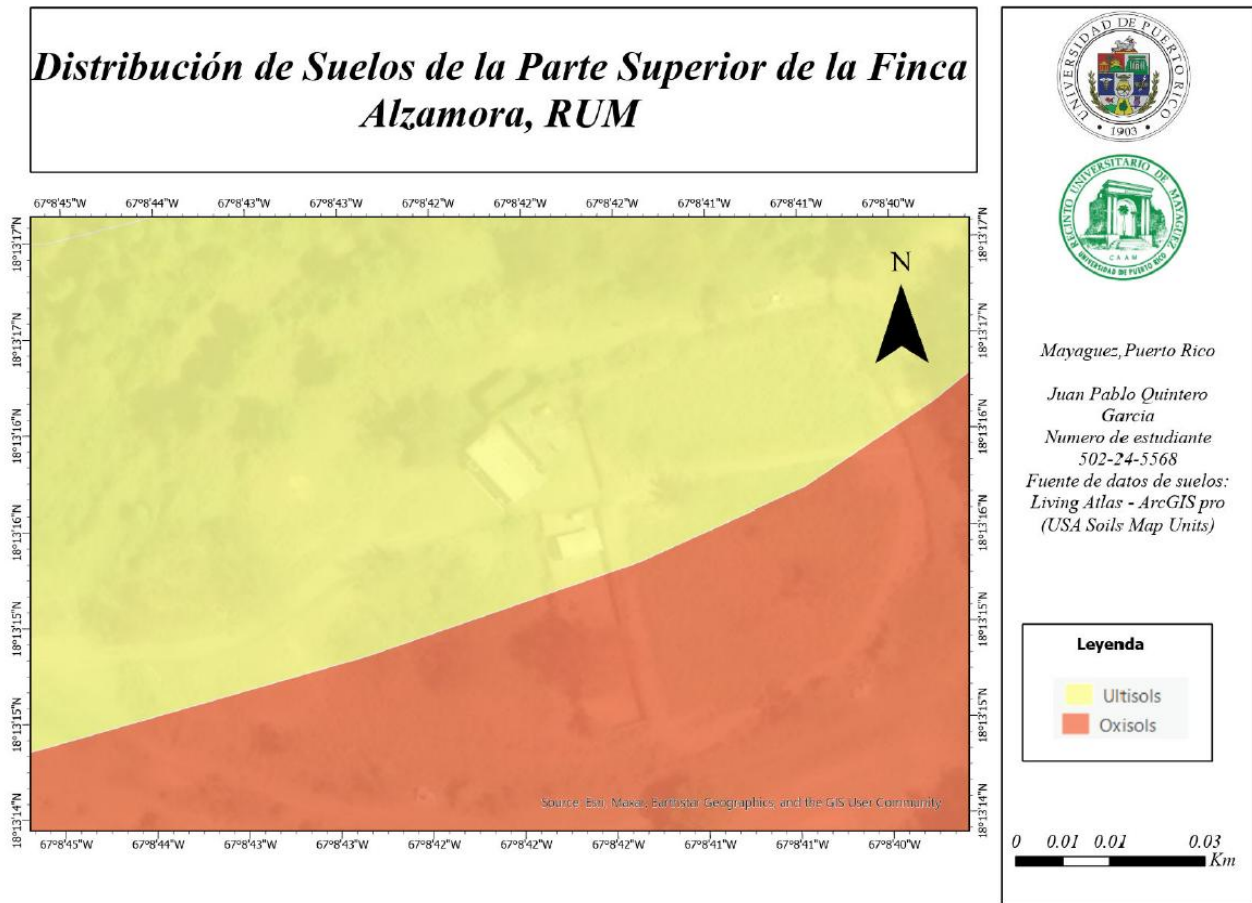


Fuente propia, hecho en ArcGIS pro

En cuanto al índice de vegetación, se observa que las zonas que presentan valores más bajos de NDVI, y que por lo tanto registran un mayor incremento en la temperatura superficial, corresponden a áreas con una cobertura vegetal menos densa o con vegetación en condiciones menos saludables. Esta relación evidencia que la reducción en el vigor de la vegetación influye directamente en el aumento de la temperatura, debido a una menor capacidad de la cobertura vegetal para regular el intercambio de energía con el ambiente.



Figure 13 Distribución de tipo de suelo parte superior finca Alzamora



Fuente propia, hecho en ArcGIS pro

Este mapa muestra la distribución de los tipos de suelo en la parte superior de la Finca Alzamora, donde se identifican principalmente suelos Ultisols y Oxisols, información obtenida del Living Atlas de ArcGIS.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En cuanto a la toma de datos en campo mediante el uso de drones térmicos, es fundamental considerar diversos parámetros ambientales que pueden influir directamente en la calidad y confiabilidad de la información obtenida. Entre los factores más relevantes se encuentran la temperatura del aire, la nubosidad y la humedad relativa, ya que estas variables afectan la radiación térmica registrada por el sensor y, por ende, la estimación de la temperatura superficial del suelo. Asimismo, se recomienda contar en campo con un dispositivo independiente para medir la temperatura superficial del suelo, lo que permite validar y contrastar los datos obtenidos por el dron, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados.

Para la adquisición de imágenes con drones, se sugiere realizar los vuelos durante las horas de la mañana, cuando el ángulo del sol es más favorable y se reduce la influencia de sombras intensas y del calentamiento extremo de la superficie, lo que contribuye a obtener mediciones más consistentes. De igual forma, es importante disponer de suficiente capacidad de almacenamiento en el dispositivo utilizado para la descarga de las imágenes o, en su defecto, contar con un disco duro externo, considerando el gran volumen de datos que generan los sensores térmicos y multiespectrales.

En relación con la pregunta científica planteada, los resultados del análisis espacial indican que la movilidad potencial del fósforo tiende a incrementarse en aquellas áreas donde coinciden altas temperaturas superficiales, baja cobertura vegetal reflejada en valores bajos de NDVI y suelos con menor capacidad de retención o características que favorecen el transporte, como una mayor pendiente. En contraste, las zonas con cobertura vegetal densa y suelos finos y bien estructurados presentan una menor susceptibilidad al transporte del fósforo, debido a una mayor captación del nutriente por la vegetación y a una mayor capacidad del suelo para retenerlo.

Adicionalmente, se recomienda, para futuros estudios, la incorporación sistemática de dispositivos complementarios de medición de temperatura del suelo, así como la estandarización de las condiciones de vuelo y medición en campo, con el fin de reducir incertidumbres y mejorar la comparabilidad de los datos obtenidos.



REFERENCIAS

- Börling, K., Otabbong, E., & Barberis, E. (2004). *Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils*. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 70(1), 39–47.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). *Soil fertility management*. FAO.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson Education.
- McDowell, R. W., Sharpley, A. N., & Folmar, G. J. (2003). *Phosphorus export from an agricultural watershed: Linking source and transport mechanisms*. Journal of Environmental Quality, 32(4), 1587–1595.
- Sharpley, A. N., Chapra, S. C., Wedepohl, R., Sims, J. T., Daniel, T. C., & Reddy, K. R. (1994). *Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options*. Journal of Environmental Quality, 23(3), 437–451.
- Sims, J. T., & Pierzynski, G. M. (2005). *Chemistry of phosphorus in soils*. En J. T. Sims & A. N. Sharpley (Eds.), *Phosphorus: Agriculture and the environment* (pp. 151–192). American Society of Agronomy.
- United States Geological Survey (USGS). (2023). *The distribution of water on, in, and above the Earth*. USGS Water Science School.
- Withers, P. J. A., & Jarvie, H. P. (2008). *Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review*. Science of the Total Environment, 400(1–3), 379–395.
- DJI. (2022). *DJI Mavic 3E/3T Manual de usuario* (v1.2, 2022.11)