



Capítulo 10



Diseño y aplicación de índices espectrales para la detección de fosas clandestinas

José Luis Silván Cárdenas¹, Ana Josselinne Alegre Mondragón²,
Edgar Daniel Ramírez Aceves, David Rogelio Campos Cornejo y
Maximiano Bautista Andalón³
Contribución arbitrada

Resumen

La efectividad de una búsqueda de cualquier índole recae, principalmente, en la agudeza de los sentidos del ser humano y la consecuente información que estos logren recabar sobre el entorno. Maximizar estas capacidades cobra una particular relevancia cuando lo que se indaga es el paradero de una persona desaparecida, más aún, cuando se sospecha o se tiene certeza de que ésta ha sido privada de la vida y sus restos han sido ocultados en alguna fosa clandestina.

Tecnologías como las cámaras multiespectrales montadas a bordo de drones, de aeronaves tripuladas o de satélites, que fueron diseñadas para llevar a cabo acciones de monitoreo de cultivos, identificación de cambios en la cobertura vegetal, detección de desastres naturales

-
- 1 Profesor Investigador Titular C, Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. Email: jsilvan@centrogeo.edu.mx
 - 2 Profesora Investigadora Asociada A, Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. Email: jalegre@centrogeo.edu.mx
 - 3 Académicos, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Universidad Jesuita de Guadalajara

y otros procesos de la superficie terrestre, pueden ser consideradas como una extensión de los sentidos, pues posibilitan la percepción y registro de indicios que de otra forma resultarían inaccesibles para la especie humana, como es el caso de la bandas espectrales que son imposibles de detectar para el ojo humano.

Por ello, en este estudio se discute si los principios de la detección a distancia por información espectral pueden ser aplicables de forma eficaz para facilitar el hallazgo de inhumaciones clandestinas; lo que, además, evitaría la exposición de las personas buscadoras a riesgos y esfuerzos innecesarios en función a las posibilidades de observación a distancia y de exploración de sitios de difícil acceso que estos instrumentos proveen. En específico, se presenta una metodología de diseño de índices espectrales para detectar distintos tipos de inhumaciones, y se ilustra su aplicación con imágenes de drones y satelitales.

Palabras clave: fosas clandestinas, espectroscopía, firma espectral, dron, imagen multiespectral.

¿Se pueden detectar fosas clandestinas con sensores remotos?

Primero, es necesario acotar qué se entiende por “fosa clandestina”. Aunque el concepto tiene muchas aristas, mismas que han sido discutidas ampliamente en otros textos (ver, por ejemplo, Lorusso, 2021), aquí se considerará que una fosa clandestina es la inhumación ilegal y al aire libre de uno o varios cuerpos o restos humanos creada deliberadamente con el fin de ocultar un crimen; tomando en consideración que dichos cuerpos o restos pudieron o no haber sido sometidos a determinados tratamientos, depositados en contenedores y/o cubiertos con ciertos objetos.

A partir de esta acepción se derivan casos de naturaleza forense que no son considerados como fosas clandestinas para los propósitos de este estudio. Estas excepciones incluyen los ocultamientos al interior de construcciones, las fosas comunes creadas por las autoridades para depositar en ellas los cuerpos o restos de personas no identificadas y los sitios de exterminio donde se usan crematorios clandestinos o sustancias químicas para desintegrar los cuerpos. Incluso en el caso de que fuera posible detectar algunas de estas sustancias mediante imágenes como sugiere un estudio reciente (Silván-Cárdenas, Alegre-Mondragón, Madrigal-Gómez & Silva-Arias, 2024), todos esos casos quedan exentos de la metodología presentada aquí.

Con esta definición en mente, la lógica detrás de la detección de las fosas clandestinas con sensores remotos es relativamente simple. Como se ilustra en la Figura 1, cuando un cuerpo humano entra en proceso de descomposición altera física y químicamente la matriz de suelo circundante, lo que ocasiona un comportamiento de la vegetación distinto al que normalmente se observaría, ya sea inhibiendo su crecimiento o favoreciendo uno más vigoroso.

Figura 1. Lógica detrás de la detección de fosas con información espectral



Fuente: adaptado de Snirer (2013).

En particular, los cambios en la concentración de pigmentos, tales como la clorofila y los carotenoides, son los de mayor interés para la detección espectral⁴ (Snirer, 2013). Es sabido que la descomposición de un cadáver en el suelo proporciona un pulso localizado de nutrientes, y que los compuestos y materiales producidos a lo largo de las diversas etapas de descomposición producen una isla concentrada de fertilidad que rodea al cadáver. Aunque la mayor transferencia de nutrientes al suelo ocurre durante la etapa de descomposición, éstos perduran en él aun después de la Reducción esquelética, por lo que la acumulación de

4

Los cambios de la topografía del terreno se abordan en otro capítulo de esta misma publicación. Véase: “Morfología del terreno mediante fotogrametría con drones: oportunidades y limitaciones para la detección de clandestinas”.

los nutrientes en las plantas ocurre paulatinamente y a tasas variables, las cuales difieren en función de la especie y del periodo de crecimiento en que se encuentre el espécimen, pero mientras más nutrientes haya disponibles, más lo absorberán las plantas, llegando incluso a ser tóxico en algunos extremos (Kabata-Pendias, 2000).

En suma, tras la creación de una inhumación pueden ocurrir cambios en la superficie que, de ser detectados efectivamente, podrían dar cuenta de su existencia. Varios experimentos han demostrado que la localización de fosas clandestinas con sensores remotos es factible (Silván-Cárdenas et al., 2021; Leblanc, Kalacska, & Soffer, 2014; Kalacska & Bell, 2006), pero aún no existe un método robusto y simple que pueda ser aplicado de forma rutinaria por los equipos de búsqueda debido a que no se sabe fehacientemente cómo las condiciones de inhumación, los factores ambientales y los modos de observación afectan la detección.

Desarrollar métodos de detección de fosas clandestinas supone diversas complicaciones toda vez que éstas suelen ser poco accesibles y difíciles de controlar, además su estudio conlleva implicaciones éticas y de seguridad. Una alternativa conveniente ha sido la experimentación con “fosas simuladas”, pues permiten estudiar de manera consistente los factores que tienen impacto en el estado de las inhumaciones clandestinas y su evolución temporal, a la par de que permiten tener total certeza sobre el contenido de la fosa y garantizar una mayor seguridad física durante el desarrollo de la investigación. Es así que las fosas simuladas son modelos de las fosas clandestinas a través de las cuales intentamos conocer las alteraciones que se presentan en las fosas reales e interpretar la naturaleza que surge en torno a ellas.

Desde luego, la efectividad de aplicar el conocimiento experimental a casos factuales se encuentra ligada a la comparabilidad de las condiciones entre las pruebas controladas y la realidad. Es por ello que este estudio se basó en un sitio de prueba que replica diversas condiciones de inhumación observadas en Jalisco. El sitio se denomina Polígono 1 y es descrito ampliamente en un capítulo previo⁵, por lo que aquí solo mencionaremos sus características generales. Se trata de un sitio de experimentación forense creado dentro de las instalaciones del Centro Universitario Tonalá –de la Universidad de Guadalajara– el 31 de mayo del 2023, con 14 fosas que representan 7 tipos de inhumaciones a dos profundidades (0.75 y 1.25 m) más dos fosas de control, una a cada profundidad. Los tipos de inhumaciones fueron: cuerpo

5 Véase: “Experimentación forense: la historia de un proyecto”.

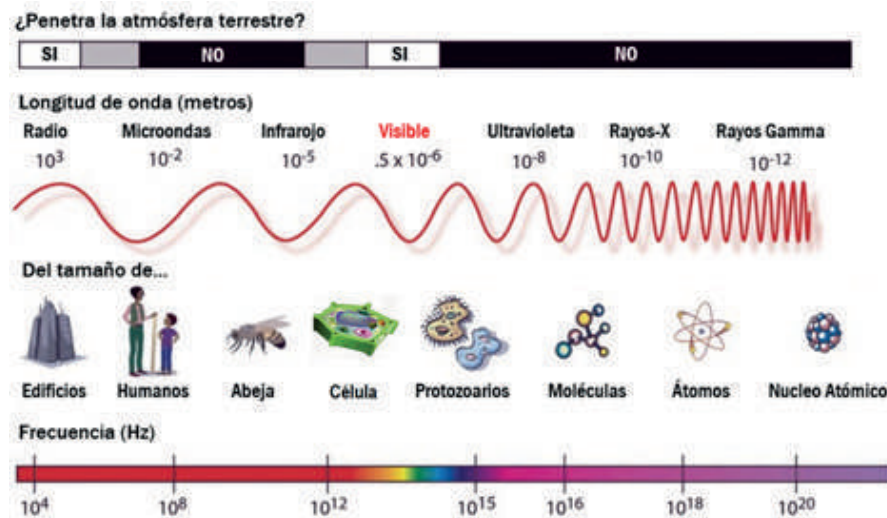
completo (CC), cuerpo seccionado (CS), cuerpo con cal (CL), cuerpo en bolsa (CB), cuerpo con cobija (CJ), cuerpo quemado (CQ) y reducción esquelética (RE).

Ver para saber

El método de detección que se aborda en el presente texto emplea la iluminación solar recibida por las superficies de forma natural, por lo que resulta conveniente repasar algunos conceptos sobre la medición con luz. Cualquier libro sobre percepción remota ofrece una introducción más amplia a estos temas (Campbell & Wynne, 2011; Lillesand, 2015).

En principio, es necesario recordar que la luz vibra a diferentes frecuencias y que a cada una de ellas corresponde a una longitud de onda; la primera mide la característica temporal de la vibración y, la segunda, la característica espacial de la misma, pero pueden ser consideradas cantidades recíprocas: a mayor longitud de onda menor frecuencia y viceversa.

Figura 2. Relación entre longitud de onda, tamaño, frecuencia y color



Fuente: adaptado de Wikipedia.

La luz se puede emitir o absorber, pero también puede atravesar las superficies donde incide o ser reflejada. A este último componente se le llama reflexión y es la propiedad que permite que los seres humanos registremos imágenes de los objetos iluminados. A la distribución de la intensidad de la luz en un rango de frecuencias o longitudes de onda se le denomina espectro.

Así, los colores que somos capaces de percibir no son otra cosa que un espectro de luz, ya sea reflejada desde una superficie o emitida por una fuente, con longitudes de onda específicas (Figura 2). Por ejemplo, el espectro del color azul se compone de vibraciones con longitudes de onda entre los 400 y 500 nanómetros (nm), —unidad equivalente a la milmillonésima parte de un metro—; el verde, corresponde al rango de entre 500 y 600 nm; mientras que el rojo al de entre 600 y 700 nm. Además, al mezclarse estos rangos con distintas contribuciones o intensidades, generan toda la gama de colores susceptibles de ser observados por el ojo humano. En contraparte, también hay espectros que las personas son incapaces de percibir: por debajo del rango azul —a una mayor frecuencia— se encuentra el rango del ultravioleta y, por encima del rojo, — a menor frecuencia— se encuentran los infrarrojos. La Tabla 1 proporciona un conjunto de bandas espectrales que son de interés para la percepción remota.

Tabla 1. Designación de algunos rangos de longitudes de onda de interés para la percepción remota

Nombre de la banda	Rango espectral [nm]
Ultravioleta A	315-400
Visible	400-700
Pared roja	700-780
Infrarrojo cercano	750-1000
Infrarrojo de onda corta 1	1000-1800
Infrarrojo de onda corta 2	1800-2500

También es importante señalar que el rango de longitudes de onda de los espectros reflejados está relacionado con el tamaño del objeto que se observa (Campbell & Wynne, 2011). Por ejemplo, algunas moléculas que se encuentran en la atmósfera, por su tamaño y estructura, pueden bloquear la luz en ciertas longitudes de onda, lo que impide que alcancen

la superficie de la Tierra. Es decir, como se ilustra en la Figura 2, la longitud de onda, el tamaño del objeto, la frecuencia y el color están íntimamente relacionados⁶.

En esa misma ilustración se muestran los rangos que tienen la capacidad de atravesar la atmósfera, aspecto de relevancia ya que, como se mencionó anteriormente, la fuente de iluminación para el método de detección utilizado es el Sol y, mediante esta técnica pasiva, resulta imposible observar los rangos espectrales donde la luz no alcanza la superficie terrestre; para lograrlo sería necesario recurrir a técnicas activas como el radar, que cuenta con su propia fuente de radiación en el rango de las microondas, tema que se aborda en otro capítulo del volumen⁷.

Para llevar a cabo la medición de espectros de luz reflejada es posible usar distintos dispositivos: uno de ellos es el espectroradiómetro, un instrumento con fotodetectores que mide cuánta luz de un rango de longitudes de onda específico incide en cada uno de los detectores; otro método es la utilización de cámaras sensibles a varios rangos de longitudes de onda, en cuyas características se profundizará toda vez que resulta acorde a las técnicas empleadas en el desarrollo de la experimentación propia de esta investigación.

A diferencia del espectroradiómetro, que registra la luz reflejada de un área en cientos de bandas espectrales muy delgadas y contiguas, una cámara lo hace sólo en unas cuantas bandas más anchas, pero en múltiples áreas o píxeles simultáneamente (o casi simultáneamente). Por lo tanto, se considera que una cámara es multiespectral cuando registra al menos unas cuantas bandas, no necesariamente contiguas, con anchos de alrededor de 100 nm, y que es hiperespectral cuando registra muchas bandas contiguas delgadas de alrededor de 10 nm. Aunque esto es sólo una convención, tiene relevancia debido a que el costo de una cámara hiperespectral es del orden de 10 veces el costo de una multiespectral, por lo que, para fines prácticos, resulta necesario conocer qué clase de fosas sería capaz de detectar determinado tipo de cámara o imagen.

Otro aspecto a considerar es el tamaño de píxel que cada cámara es capaz de mapear, pues, con sus debidas excepciones, se toma en consideración que la extensión superficial promedio de una fosa es de un metro a metro y medio de diámetro. En tanto, las resoluciones de las

6 Otras cantidades relacionadas son la temperatura del cuerpo que emite y la energía de la onda electromagnética.

7 Véase: “Reflejos de una búsqueda: el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para la detección de inhumaciones clandestinas”.



cámaras se clasifican como baja, media, alta o muy alta, considerando que cada píxel captura un área de un diámetro aproximado de mil, 100, 10 o un metro, respectivamente. Por tanto, para la detección de fosas se requieren imágenes de muy alta resolución espacial. En el caso de los drones, el tamaño del píxel se garantiza con la altura de vuelo de alrededor de 100 metros sobre el suelo, mientras que en el caso de los satélites es necesario realizar fusión entre una banda de alta resolución (denominada banda pancromática) con las bandas multiespectrales. No obstante, las imágenes tomadas por satélite ofrecen muchas ventajas sobre las imágenes tomadas con drones para la detección de fosas. Por ejemplo, ofrecen mayor consistencia temporal, una mayor frecuencia de revisita, mucho mayor cobertura permitiendo alcanzar lugares de difícil acceso o de alto riesgo para los drones, una mayor fidelidad espectral que las cámaras de los drones, así como numerosas herramientas para su tratamiento. Por lo tanto, de comprobarse que las imágenes de satélite de alta resolución son útiles para los fines de este estudio, se reducen los riesgos inherentes al trabajo de búsqueda en campo.

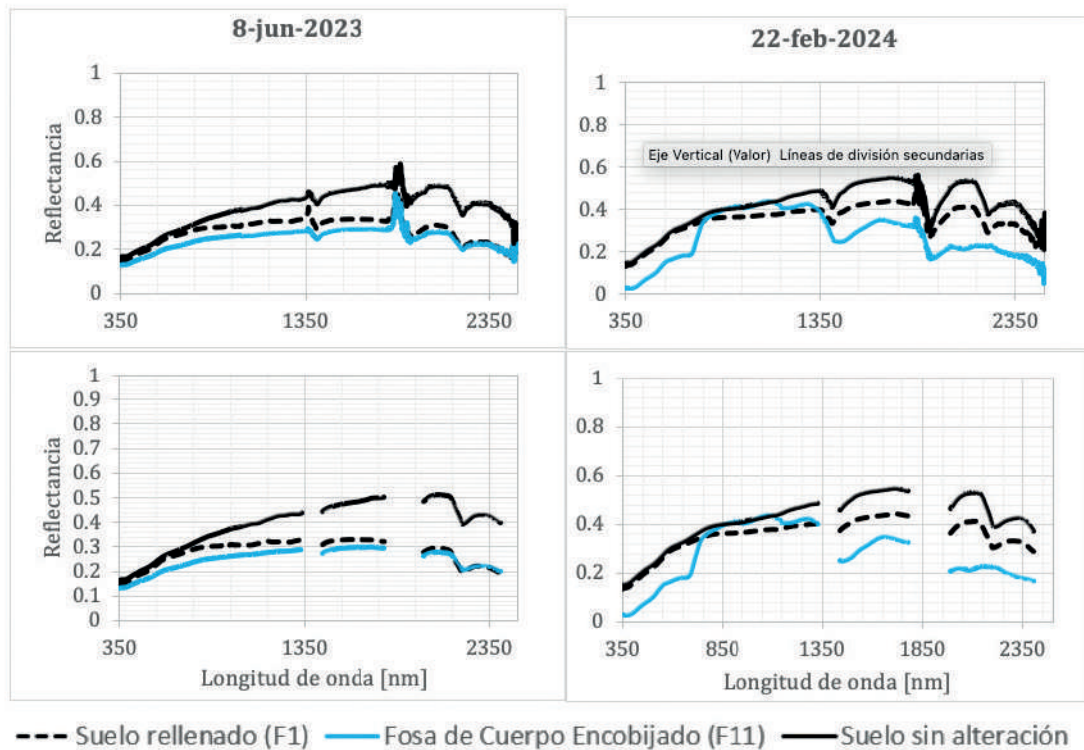
Por último, es pertinente acotar que en este estudio se emplea la espectroscopía —ciencia que estudia la estructura de la materia a partir de los espectros reflejados o absorbidos— para abordar la apariencia del suelo y la vegetación sobre las fosas simuladas, así como sus cambios en el lapso de un año. Basado en el análisis de las mediciones de la fracción de luz reflejada en las inhumaciones experimentales, el estudio apunta a determinar los espectros —o colores— que se deberían interpretar como fosas clandestinas en las imágenes capturadas por los drones o satélites.

El “color” de las fosas en el sitio experimental Polígono 1

La fracción de luz reflejada, o reflectancia, no es otra cosa que el cociente de la luz reflejada dividida entre la luz incidente en un rango de longitudes de onda denominado banda espectral, al cual hemos aludido como “color”. Esta cantidad se midió para bandas centradas a cada nanómetro entre 350 y 2 mil 500 nm, de tal forma que cada firma de reflectancia consta de dos mil 151 valores de reflectancia en el rango de 0 y 1, cada uno asociado a una banda espectral de un nanómetro de ancho. Estas firmas se pueden visualizar como curvas donde el eje horizontal indica la longitud de onda del centro de la banda y el vertical, la reflectancia. Ejemplos de firmas graficadas se muestran en la Figura 3. El rango espectral medido incluye

regiones espectrales donde el vapor de agua y el dióxido de carbono de la atmósfera absorben gran parte de la radiación y por tanto los valores registrados en esos rangos suelen presentar fluctuaciones erráticas que pueden registrar valores mayores a uno o menores a cero. Estas fluctuaciones ocurren alrededor de los mil 350, mil 850 y dos mil 450 nm y representan errores que normalmente requieren un tratamiento especial, pero antes es necesario explicar cómo se realizaron las mediciones.

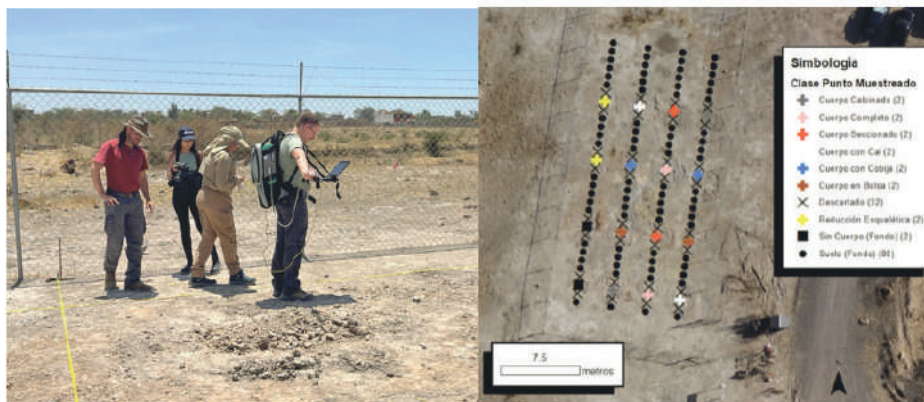
Figura 3. Ejemplos de firmas de reflectancia espectral, sin (arriba) y con (abajo) procesamiento, para tres puntos medidos en junio (izquierda) del 2023 y febrero (derecha) del 2024



Fuente: elaboración propia.

La medición de las firmas de reflectancia se realizó con un espectroradiómetro de campo de la marca *FieldSpec 4 Std Res.* de *ASD Inc.* (Figura 4-izqda.). El instrumento consta de una unidad de medición que se lleva en una mochila, una computadora portátil con la cual se configura la medición y una sonda por donde se capta la luz en un ángulo de 25 grados proveniente desde la dirección a donde se apunta la sonda. La luz se canaliza al dispositivo por una fibra óptica de alrededor de 1.5 m de largo. Las mediciones se realizaron apuntando la sonda hacia abajo desde una altura aproximada de 1.2 m. Esta combinación de ángulo y altura garantiza que la superficie reflectante corresponda a una circunferencia del suelo con un diámetro aproximado de 50 cm. En cada campaña de muestreo se recolectaron 120 firmas de reflectancia a lo largo de cuatro líneas paralelas que pasaban sobre las fosas, 30 lecturas por cada línea (vea la Figura 4-dcha.). Antes de realizar una línea se registró la cantidad luz incidente empleando un panel de referencia que tiene una reflectancia unitaria en todas las longitudes de onda, de tal forma que las mediciones subsecuentes corresponden a la luz reflejada normalizadas con respecto a la referencia registrada previamente. En total se realizaron cinco campañas de muestreo en el Polígono 1, la primera a los ocho días de la creación de las fosas, y las subsecuentes cada tres meses, aproximadamente.

Figura 4. A la izquierda una foto durante la medición de firmas espectrales y a la derecha los perfiles creados



Fuente: elaboración propia.

Ya en gabinete, a cada firma se le aplicó un suavizado y se le hizo un recorte para reducir los efectos causados por las condiciones atmosféricas al momento de la medición. Además, se etiquetó cada firma de acuerdo a su proximidad una fosa como se indica en la Figura 4-derecha. En la Figura 3 se pueden comparar las firmas antes (arriba) y después del procesamiento (abajo) para 3 puntos en dos fechas distintas. Observe que la forma de la firma de una fosa con un cuerpo envuelto en cobija (F11) era muy parecida a la firma del suelo rellenado (F1) al principio, pero en la última fecha éstas ya se diferenciaban claramente. En cambio, la firma del suelo rellenado se hizo más parecida a la firma del suelo sin alteración, lo cual parece bastante razonable ya que al paso del tiempo el suelo rellenado se va compactando y volviendo a su estado natural. Desde luego las firmas no serían un método práctico para detectar fosas en búsquedas reales, ya que su recolección es un trabajo arduo, lento, riesgoso y costoso. Entonces, la pregunta que se busca responder es: ¿cómo usar la información de las firmas para construir un índice que luego se pueda aplicar con imágenes captadas por dron o satélite?

En la búsqueda del “índice de fosas”

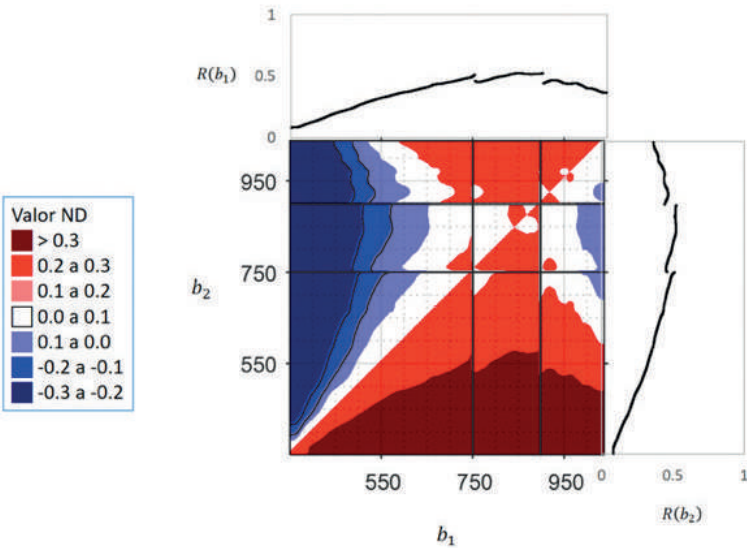
Uno de los métodos más efectivos para realzar las diferencias sutiles que existen en una firma espectral son los índices de la diferencia normalizada (*ND*). El nombre proviene de su forma algebraica, la cual combina los valores de reflectancia (*R*) en dos bandas espectrales, b_1 y b_2 , como la diferencia dividida por la suma:

$$ND = \frac{R(b_1) - R(b_2)}{R(b_1) + R(b_2)}$$

El problema consiste en encontrar las bandas que definan el mejor índice, que resulte en valores grandes para el rasgo de interés (fosas) y en valores pequeños para otros que no son de interés (no fosas).

Así, para una firma con seis bandas hay un total de 30 índices de la diferencia normalizada, la mitad de los cuales son iguales en magnitud, pero con distinto signo, respecto a la otra mitad (el intercambio de bandas sólo cambia el signo del ND). En cambio, para el caso de las firmas recolectadas en el Polígono 1 se generan cerca de tres millones de índices por firma, lo cual parece incrementar la complejidad del problema tremendamente; no obstante, nuestro sistema de visión está adaptado para interpretar imágenes, de tal suerte que si se ordena la colección de índices como un mapa donde las coordenadas representan las longitudes de onda asociada a cada banda de la firma y el color representa el valor del índice, es posible visualizar dicho mapa resaltando las regiones con valores altos del índice. Un ejemplo de mapa espectral del índice se muestra en la Figura 5 donde los tonos cálidos indican valores positivos y los fríos, valores negativos, mientras que las líneas vertical y horizontal indican discontinuidades debido a las bandas eliminadas en la firma.

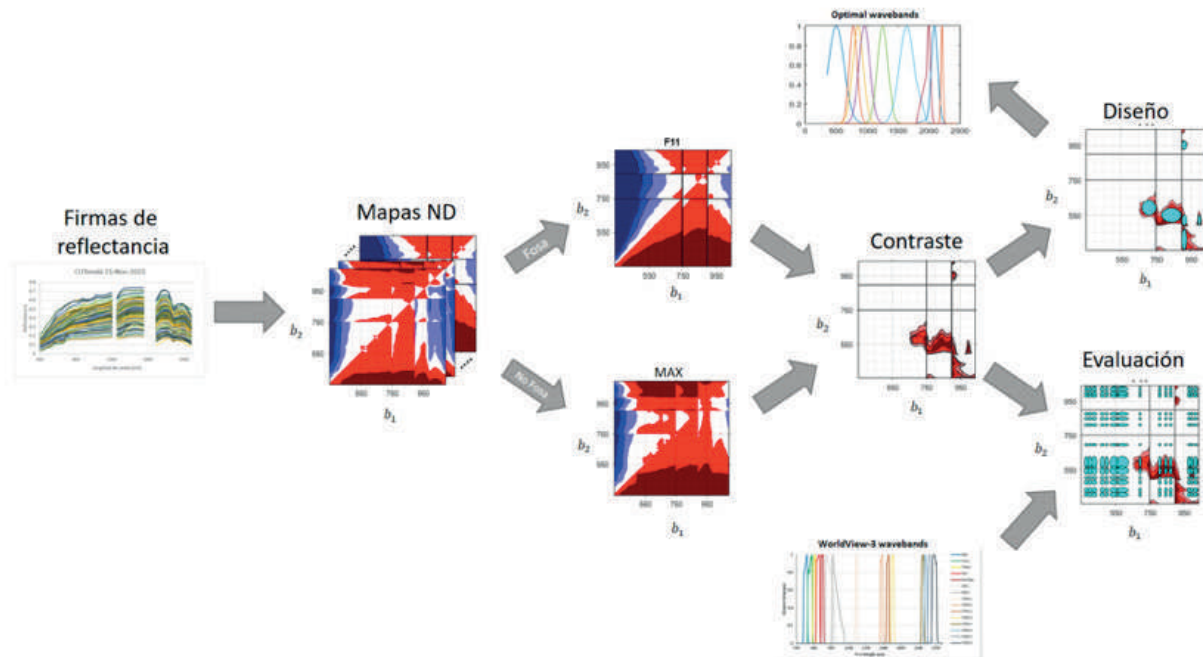
Figura 5. Mapa espectral del índice de la diferencia normalizada para la firma de Fosa F11 tomada en noviembre de 2023



Fuente: elaboración propia.

Cabe aclarar que los valores altos del índice por sí mismos no nos garantizan que el rasgo de interés será distinguible de otros rasgos. La única forma de poder garantizar que un índice tomará valores mayores para las fosas que para las no fosas es sustrayendo el valor máximo de todos los mapas asociados a firmas que no son fosas. El resultado es un índice de contraste que, en las regiones donde toma valores positivos, nos garantiza que sería factible la detección, y en caso de no haber valores positivos, nos dice que no es posible hacer la detección. Así, los mapas de contraste pueden ser usados para diseñar las bandas espectrales que se requerirían para la detección del rasgo de interés, pero también, como se verá más adelante, para saber si una cámara dada podría ser útil para detectar dicho rasgo.

Figura 6. Diagrama ilustrativo los pasos del análisis de las firmas espectrales para la identificación de bandas espectrales de interés



Fuente: elaboración propia.

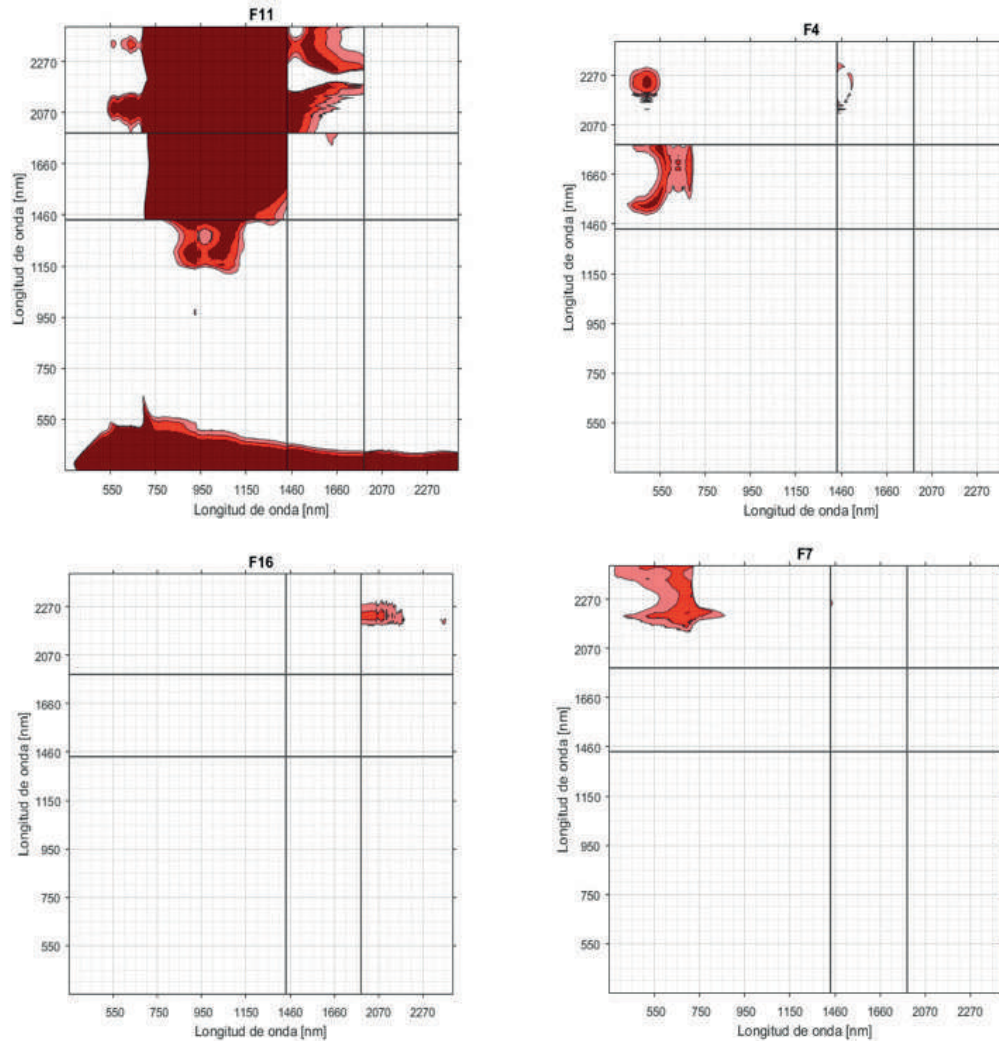
El diagrama de la Figura 6 resume los pasos centrales del método de análisis de las firmas para poder dar con el o los índices que podrían ser empleados para detectar fosas. De acuerdo con este método, cada firma es transformada en mapas de diferencia normalizada y luego a los de mapas de fosas se les sustrae el máximo de los mapas que no son fosas dando como resultado los mapas de contraste, que son el principal insumo para el diseño o evaluación de índices espectrales. Ejemplos de los mapas de contraste obtenidos para firmas del Polígono 1 se muestran en la Figura 7, donde se excluyen regiones con contraste por debajo de 0.01, esto para dotar de mayor robustez a la detección. La ubicación y el tamaño de las regiones con contraste positivo determinan el centro y ancho de las bandas espectrales del índice de la diferencia normalizada que se podrían emplear para la detección de fosas, mientras que el máximo contraste indica la facilidad relativa con la que ésta se podría hacer bajo condiciones de suelo, clima y atmósfera similares a las del sitio de prueba.

¿Como es posible identificar los valores para fosas clandestinas?

Los análisis de las firmas del Polígono 1 mostraron valores de contraste relativamente bajos en todos los meses de monitoreo, por debajo de 0.1, excepto para las fosas con cuerpo con cobija (F11 y F12) en la última fecha, lo que indica la dificultad de detectar la mayoría de las fosas en una sola toma⁸.

8 En otros estudios se ha propuesto considerar la tendencia temporal de un índice de vegetación como medio para la detección (Silván-Cárdenas & Alegre-Mondragón, Espacio Clandestino: *A nationwide platform to support clandestine graves search in Mexico*, 2023).

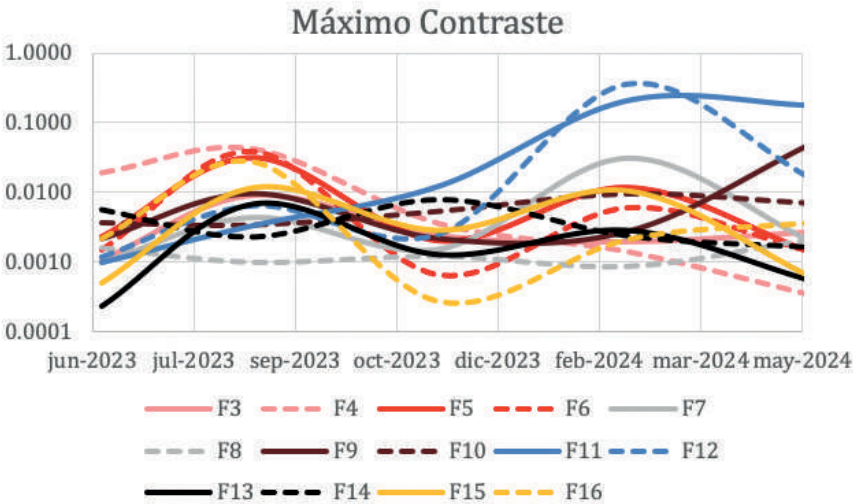
Figura 7. Ejemplos de mapas del índice de contraste espectral para firmas de fosas tomadas en agosto del 2023 (izquierda) y febrero del 2024 (derecha). Se muestran valores de contraste mayores a 0.01 (rosa), 0.02 (rojo), y 0.03 (marrón)



Fuente: elaboración propia.

La Figura 8 muestra la variación temporal del máximo contraste observado en escala logarítmica para cada una de las fosas: las fosas con cuerpo con cobija (F11 y F12) presentaron los contrastes más altos, pero sólo a partir de que transcurrieran nueve meses desde la inhumación; las fosas con cuerpos seccionados (F5 y F6), con reducción esquelética (F15 y F16) y una con cuerpo completo (F4) tuvieron un mayor contraste a los tres meses de la inhumación (ago-2023), lo cual parece confirmar observaciones previas hechas en campos de prueba ubicados en Yautepec, Morelos, y en Milpa Alta, Ciudad de México donde se inhumaron cuerpos completos (Silván-Cárdenas et al., 2017; Silván-Cárdenas et al., 2021); una fosa de cuerpo con cal (F7) fue detectable a los nueve meses, lo cual confirma el efecto de retardo que este material provoca en la descomposición del cuerpo; mientras que las fosas de cuerpos con bolsa (F9 y F10) y de cuerpos calcinados (F13 y F14) tuvieron contrastes menores a 0.01 en todo el período, lo que sugiere que son indetectables con éste método, al menos en el lapso de un año.

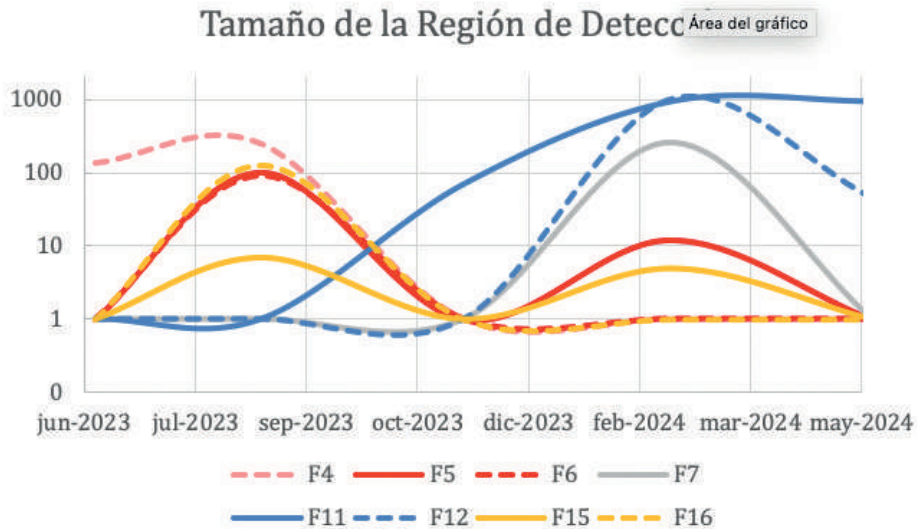
Figura 8. Variación del máximo contraste a lo largo del año de monitoreo (El color indica el tipo de inhumación, la línea continua la versión somera y la discontinua la versión profunda)



Fuente: elaboración propia.

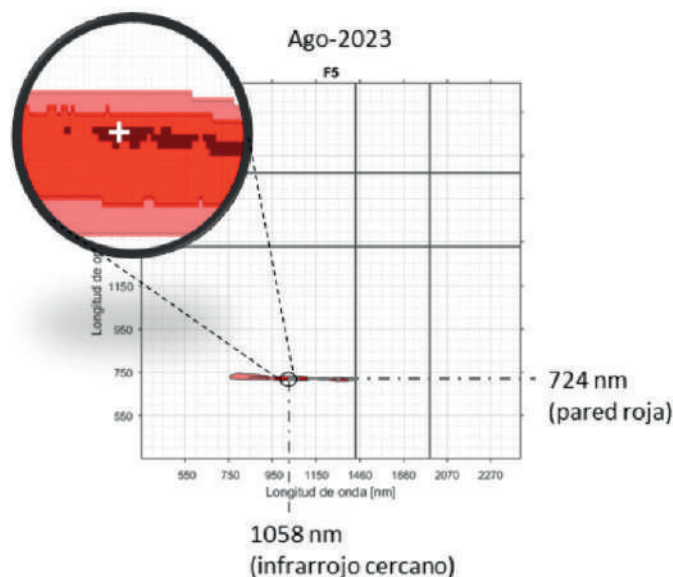
La Figura 9 muestra la variación del tamaño de la región de detección en el mapa de contraste, mismo que fue calculado con la raíz cuadrada del número de combinaciones de bandas espectrales en las que el contraste fue mayor a 0.01. La gráfica confirma que sólo ocho de las 14 fosas fueron detectables en el lapso de un año, con dos ventanas de detección, una a los tres meses (CC, CS y RE) y otras a los nueve meses (CJ y CC).

Figura 9. Variación del tamaño efectivo de la región de detección para fosas con contraste máximo mayor a 0.01



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Mapa de contraste de una fosa con cuerpo seccionado (F5) generado con la firma espectral de ago-2023. El acercamiento indica las longitudes de onda del máximo local



Fuente: elaboración propia.

Los índices ideales

Para definir índices óptimos, se pueden escoger las longitudes de onda donde el contraste es máximo. Por ejemplo, en la Figura 10 se indica un máximo local del mapa correspondiente a una fosa con cuerpo seccionado, de tal forma que podemos proponer el índice para detectar específicamente ese tipo de fosa de la siguiente manera:

$$ND_{Cs} = \frac{R(1058) - R(724)}{R(1058) + R(724)}$$

Al proceder de esta forma con otros mapas de contraste es posible generar una serie de índices ideales para detectar los diferentes tipos de fosas que son detectables. La Tabla 2 presenta la lista de los diez máximos locales encontrados en todos los mapas de contraste que se generaron. Las columnas b_1 y b_2 de la tabla definen las bandas donde se ubica el máximo contraste C_{max} . La tabla también proporciona el valor ND_{max} , que es el máximo valor del ND creado con esas bandas. Aunque el contraste positivo garantiza que el valor ND de una fosa excederá en al menos C_{max} el valor ND de una no fosa, esto no significa que ND debe ser positivo, como se puede constatar por los valores negativos de ND_{max} . Para generar un índice que dé positivo para una fosa y negativo para una no fosa, se puede agregar un desplazamiento $\delta = C_{max} - ND_{max}$ a la fórmula. Así, la forma general del índice espectral para detectar algún tipo de fosas se puede escribir como:

$$ND_{FOSA} = \frac{R(b_1) - R(b_2)}{R(b_1) + R(b_2)} + \delta$$

Tabla 2. Resumen de máximos locales en mapas de contrastes para fosas detectables

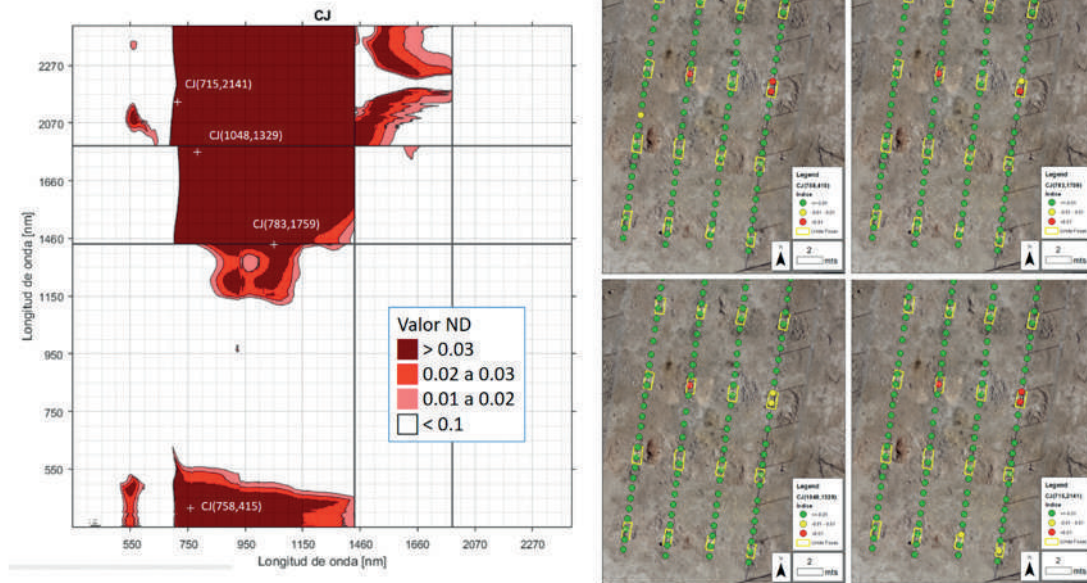
#	Contenido (Fosa)	Tiempo [meses]	b_1	b_2	C_{max}	ND_{max}
1	CC (F4)	3	488	2238	0.0341	-0.0125
2	CC (F4)	3	547	1764	0.0416	-0.2113
3	CC (F4)	3	519	1548	0.0399	-0.2552
4	CS (F5)	3	1058	724	0.0308	0.2145
5	RE (F16)	3	2232	2058	0.0279	0.1556
6	CJ (F11 y F12)	9	758	415	0.0893	0.7655
7	CJ (F11 y F12)	9	783	1759	0.1435	0.1732
8	CJ (F11 y F12)	9	1048	1329	0.0607	0.0894
9	CJ (F11 y F12)	9	715	2141	0.1788	0.1073
10	CL (F7)	9	688	2213	0.0308	0.0629

¿Pero cuál índice es mejor? Cuando se tienen varios máximos locales en un mapa de contraste es posible escoger entre los índices de mayor contraste, pero una forma más conveniente es calcular los índices a partir de las firmas espectrales para evaluar su efectividad real. Por ejemplo, para las fosas de cuerpo con cobija (F11 y F12) se encontraron cuatro máximos locales (Tabla 2).

En la Figura 11 se muestran los máximos locales junto con el mapa de detección de cada índice. Los círculos rojos indican un valor mayor a 0.01 (hay fosa), los verdes, un valor menor a -0.01 (no hay fosa) y los amarillos, un valor entre -0.01 y 0.01 (podría ser fosa o no fosa). Aunque todos los índices proporcionan una buena detección, el índice número 7, cuyo mapa se muestra en la parte superior derecha, es mejor que los otros porque no recoge amarillos fuera de las fosas objetivo y presenta al menos un rojo dentro de las fosas objetivo.

En suma, si se tuviera la posibilidad de crear una cámara que registrara la reflectancia en las longitudes de onda listadas en la Tabla 2, se podría utilizar para mapear índices que dieran cuenta de la existencia de fosas con las características indicadas.

Figura 11. A la izquierda se muestran el mapa de contraste para las fosas F11 y F12 en febrero de 2024, con sus máximos locales indicados. A la derecha se muestran la detección con los índices diseñados a partir de cada máximo local



Fuente: elaboración propia.

Los índices reales

Como se ha visto, en condiciones ideales es posible detectar algunos tipos de fosas en ciertos momentos. Sin embargo, en la práctica sólo contamos con imágenes de cámaras con unas pocas bandas espectrales fijas que son mucho más anchas a 1 nm, por lo que es necesario evaluar si son suficientemente cercanas a las bandas ideales o, por lo menos, intersecan las regiones de contraste positivo. Para determinarlo, se superponen las bandas del sensor en cada uno de los mapas de contraste, haciendo todas las posibles combinaciones de bandas. Las combinaciones que intersecan las regiones de alto contraste pueden entonces ser propuestas como índices para usar con ese sensor particular, en el entendido de que esto es sólo una aproximación (vea el Apéndice A. Cobertura espectral de sensores comerciales, para algunos ejemplos).

Para este estudio se contó con imágenes de drones DJI Mavic 3M, DJI Phantom 4PM y Matrice 300 Micansense Redge-P, así como imágenes multitemporales del satélite Pléyades NEO. El proceso de adquisición y procesamiento de las imágenes de drones fue similar al procedimiento descrito en el Capítulo 9⁹, mientras que la adquisición y procesamiento de las imágenes satelitales se detallan en el Apéndice B. Adquisición y procesamiento de las imágenes. Por lo tanto, el estudio se enfocó en diseño de índices para estos sensores, pero también se incluyó el caso del satélite *WorldView-3* por sus características.

Una lista no exhaustiva de índices para los diferentes sensores de interés se proporciona en la Tabla 3. Nótese que de los cinco casos que se pueden detectar con índices ideales, solo cuatro se podrían detectar con los sensores multiespectrales considerados ya que ninguno intersecó el mapa de fosa con reducción esquelética, mientras que solo *WorldView-3* podría detectar cuerpos completos y con cal, ya que es el único que cuenta con bandas en el infrarrojo de onda corta.

Algunos de estos índices han sido previamente propuestos para otros propósitos. Por ejemplo, el número 5 que se propone para detectar fosas con cuerpos seccionados fue recientemente identificado como un índice apropiado para suelos contaminados con sangre (Silván-Cárdenas, Alegre-Mondragón, Madrigal-Gómez, & Silva-Arias, 2024); mientras que el número 6 corresponde al índice de vegetación de la diferencia normalizada del verde (GNDVI)

9 Véase: “Morfología del terreno mediante fotogrametría con drones: oportunidades y limitaciones para la detección de fosas clandestinas”.

por sus siglas en inglés, que fue originalmente desarrollado para estimar la concentración de clorofila en las hojas de las plantas (Gitelson & Merzlyak, 1998), pero que también se ha propuesto como uno de los índices para detectar fosas vía el enriquecimiento de nitrógeno que ocurre tras la descomposición de los cuerpos (Silván-Cárdenas et al., 2021).

Algunos de estos índices han sido incluidos en GSIM, una plataforma web para el mapeo de índices espectrales a nivel global, donde se pueden elegir algunas colecciones de imágenes de acceso libre, incluyendo los ortomosaicos generados para este proyecto. Es posible ingresar a la plataforma mediante el siguiente enlace:

<https://jsilvan.users.earthengine.app/view/indices-espectrales-globales>

Tabla 3. Lista de índices multispectrales que aproximan un máximo local del mapa de contraste

Índice	Contenido (Fosa)	Tiempo [meses]	Sensores	b1	b2
1	CC (F4)	3	WorldView-3	Blue	SWIR5
2	CC (F4)	3	WorldView-3	Green	SWIR4
3	CS (F5)	3	WorldView-3	NIR1	Rededge
4	CS (F5)	3	WorldView-3	NIR2	Rededge
5	CS (F5)	3	DJI Mavic 3M, DJI Phantom 4 PM, Micasense RedEdge-M, Pléyades NEO	NIR	Rededge
6	CL (F7)	9	WorldView-3	Red	SWIR5
7	CL (F7)	9	WorldView-3	Rededge	SWIR5
8	CJ (F11 y F12)	9	DJI Mavic E 3M	NIR	Green
9	CJ (F11 y F12)	9	DJI Mavic E 3M	Rededge	Green
10	CJ (F11 y F12)	9	Pléyades NEO, WorldView-3	NIR	Coastal
11	CJ (F11 y F12)	9	Pléyades NEO, WorldView-3	Rededge	Coastal
12	CJ (F11 y F12)	9	DJI Phantom 4PM	NIR	Blue
13	CJ (F11 y F12)	9	DJI Phantom 4PM	RE	Blue
14	CJ (F11 y F12)	9	WorldView-3	NIR1	SWIR4
15	CJ (F11 y F12)	9	WorldView-3	NIR1	Coastal
16	CJ (F11 y F12)	9	WorldView-3	NIR1	Coastal

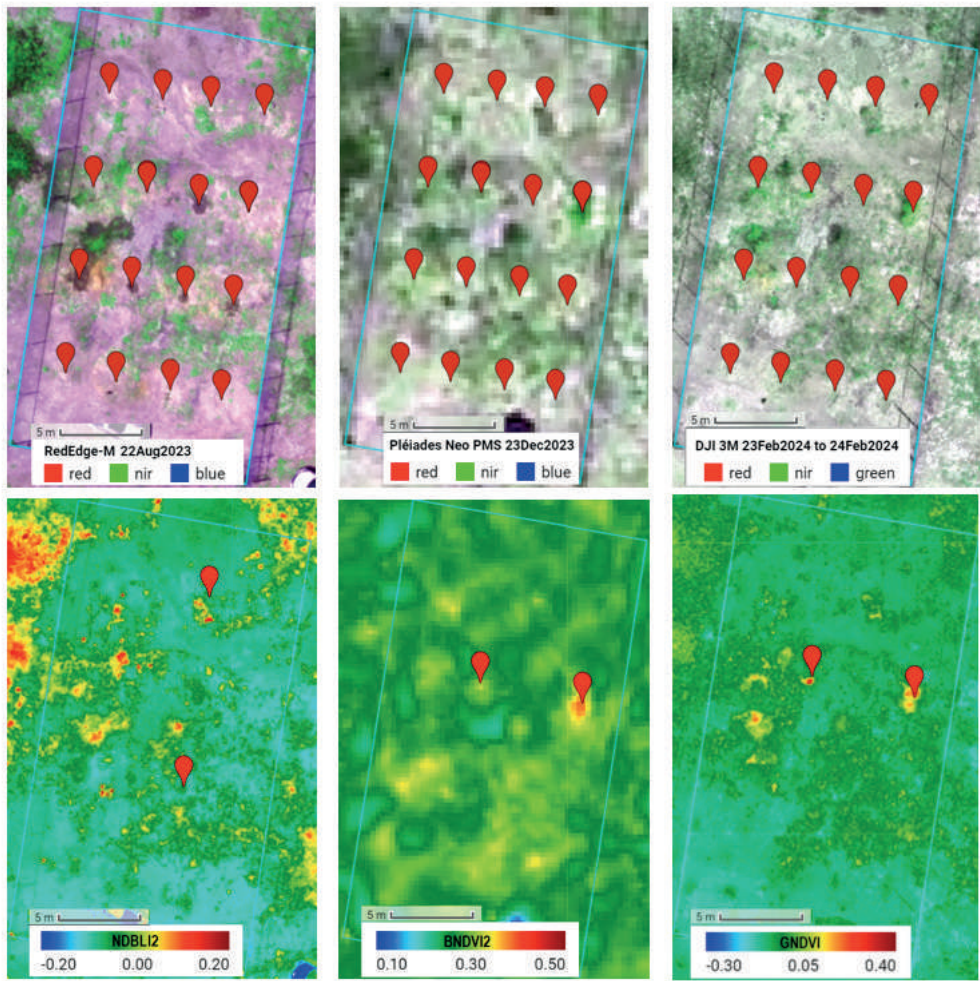
La Figura 14 muestra tres ejemplos de mapeo de índices generados con la plataforma GSIM, mostrando un compuesto en falso color de las bandas multispectrales (arriba) y los índices correspondientes en escala de color (abajo). El primer caso muestra el índice número 5 para la detección de las fosas con cuerpo seccionado con la cámara *Micasense Rededge-M*, el cual muestra baja efectividad debido a que las bandas del sensor caen en una orilla del área de detección y lejos del máximo local; una mejor opción habría sido el número 4, pero no se contó

con la imagen requerida. El segundo caso corresponde al índice #10 para la detección de las fosas con cuerpo envuelto en cobija mediante el satélite Pléyades NEO, el cual muestra una mayor efectividad con la fosa más somera (F11), aún y cuando la fecha no fue la más óptima; mientras en el último caso también se muestra el índice #8 para la detección de cuerpo con cobija. Aquí, el índice fue más sensible con las dos fosas aun cuando las bandas de éste se encuentran más lejos del óptimo que el caso anterior. Esto se explica por la fecha de la imagen, más próxima a la ventana de tiempo de los nueve meses.

Estos ejemplos demuestran los distintos factores que pueden influir en la efectividad de la detección de fosas clandestinas con luz, incluso en condiciones controladas. También es importante tomar en consideración que los mapas de contraste empleados para el diseño de los índices incorporan sólo una muestra limitada de superficies que no son fosas, por lo que no se descarta que en la práctica otros tipos de superficies puedan resaltar como fosas cuando no lo son.



Figura 12. Se muestran compuestos de imágenes en falso color (arriba) y los índices 5, 10 y 8 de la Tabla 3



Fuente: elaboración propia.

Comentarios finales y recomendaciones

En este documento se ha presentado una metodología que permite diseñar índices óptimos y aproximados para detectar fosas mediante imágenes de alta resolución espacial, ya sea captadas desde satélites o desde aeronaves tripuladas o no tripuladas, donde la efectividad esperada depende de factores como los requerimientos de resolución espacial y la cobertura espectral y temporal.

Aunque el análisis se limitó a las mediciones hechas de un sólo sitio experimental en el lapso de un año, se confirmó la viabilidad de estas técnicas para la detección de cinco de las siete formas de inhumación probadas: cuerpo completo, cuerpo seccionado, reducción esquelética, cuerpo envuelto en cobija y cuerpo con cal; en tanto que no fue posible detectar fosas de cuerpos en bolsa ni calcinados, al menos no dentro del lapso de un año.

Los análisis revelaron que la detección de los primeros tres casos se puede hacer en una ventana temporal centrada a los tres meses desde la inhumación, lo cual parece coincidir con observaciones previas recogidas en otros estudios; mientras que los otros dos casos fueron observables a partir de los nueve meses desde la inhumación.

En términos generales, se observó un nivel bajo en lo referente a la facilidad con que las fosas fueron detectadas, excepto para aquellas que contenían cuerpos envueltos en cobija, mismas que exhibieron suficiente contraste para ser localizadas aún con índices subóptimos de imágenes provistas por drones y satelitales. Es decir, el análisis demostró que la detección de las fosas con imágenes está fuertemente influida por la forma de la inhumación. En ese sentido, la cobija y la cal parecen tener un efecto retardante en la detección. Adicionalmente, la cobija tuvo un efecto amplificador posiblemente por la retención de humedad que permitió un crecimiento más profuso de la vegetación. Las bolsas y la incineración, tuvieron un efecto inhibitor. Aunque la profundidad de las fosas no generó un patrón consistente entre los diferentes tipos de inhumaciones, sí parece haber causado un mayor retardo en la detección de la fosa de cuerpo con cobija.

De los cinco tipos de inhumación detectables, cuatro podrían ser avistadas mediante sensores multiespectrales y, de esos, sólo tres podrían detectarse mediante cámaras limitadas al rango visible-infrarrojo cercano. De hecho, entre las bandas espectrales que aparecen



recurrentemente en los índices espectrales destacan la pared roja, el infrarrojo cercano, el verde, el azul, la costera, así como bandas del infrarrojo de onda corta.

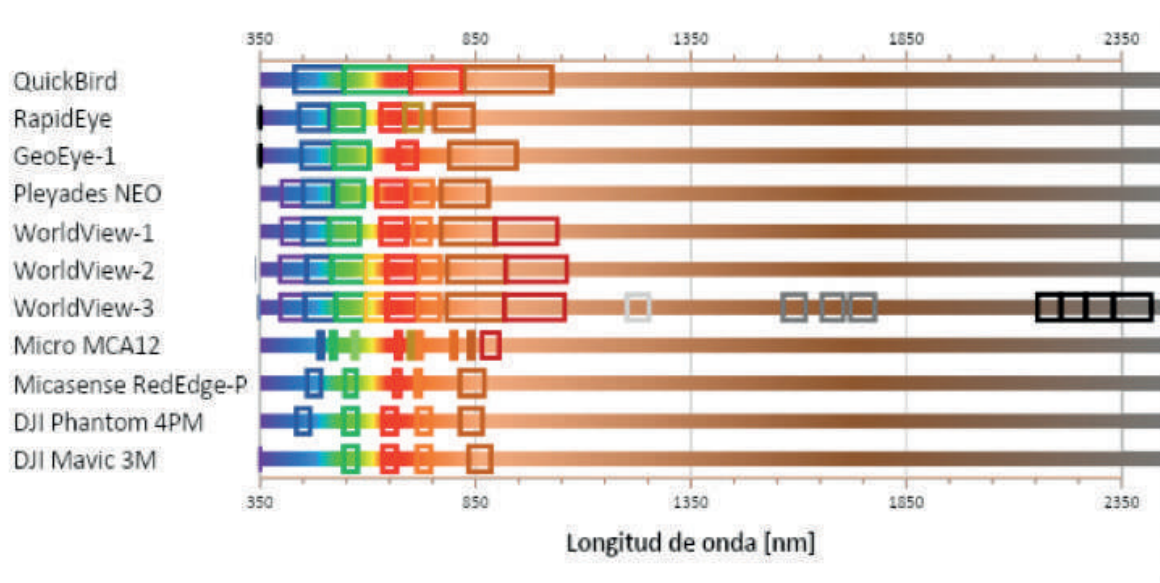
Aunque los drones proporcionan una forma accesible de mapear algunos índices que podrían ser útiles, resulta necesario tener en cuenta que no existe un método optimizado para el mapeo efectivo de las distintas formas de inhumación con las que se experimentó, por lo que, para lograrlo es posible que se requieran varias cámaras o incluso imágenes satelitales como *WorldView-3*.

Una de las mayores limitaciones para el uso práctico de esta técnica son las variaciones en la ventana temporal durante la que cada tipo de fosa es visible; no obstante, este indicio debe ser confirmado mediante investigaciones que recojan un monitoreo de mayor plazo que el realizado para este trabajo.

Apéndice A. Cobertura espectral de sensores comerciales

La Figura 13 muestra las bandas espectrales de varios sistemas comerciales. Los primeros siete representan sistemas satelitales que registran imágenes de muy alta resolución espacial (< 4 m) y los últimos cuatro son cámaras montadas en o compatibles con drones comerciales. El diagrama deja claro que sólo el satélite *WorldView-3* permite registrar la reflectancia en bandas del infrarrojo de onda corta mientras que el resto se limitan a bandas del visible y el infrarrojo cercano, esto es a longitudes de onda por debajo de los 1,050 nm. La implicación inmediata, considerando las bandas de la Tabla 2, es que la gran mayoría de sensores solo podrían detectar fosas con cuerpos envueltos en cobijas o seccionados.

Figura 13. Bandas espectrales muestreadas por algunos de los sistemas comerciales (satélites y cámaras de drones)

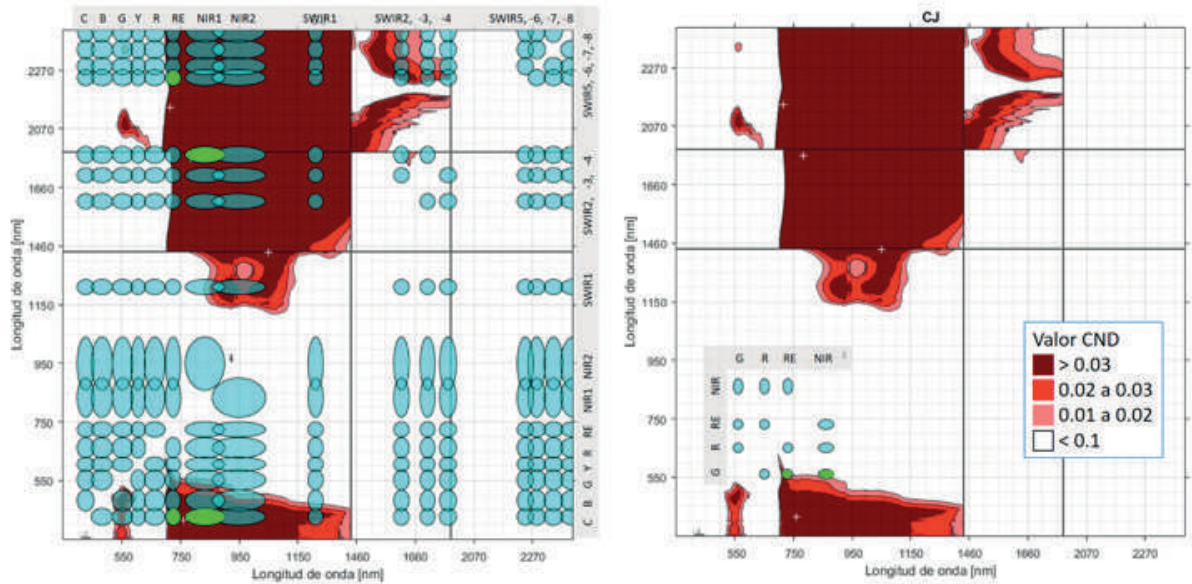


Fuente: elaboración propia.

El número de índices de la diferencia normalizada que se pueden formar varía cuadráticamente con el número de banda. Como ejemplo se puede considerar el dron *DJI Mavic Enterprise 3M*, el cual cuenta con una cámara que registra cuatro bandas espectrales, a saber, *Green* (544-576 nm), *Red* (634-666 nm), *RedEdge* (714-746 nm) y *NIR* (834-886 nm), con las cuales se pueden formar hasta 12 índices distintos, mientras que el satélite *WorldView-3* cuenta con un escáner multiespectral que registra 16 bandas, incluyendo en el infrarrojo de onda corta uno (*SWIR 2-SWIR 4*) y dos (*SWIR 5-SWIR 8*), con las cuales se podrían generar hasta 120 índices. En general, mientras más bandas tienen un sensor, mayores son las posibilidades de cubrir una región del mapa de contraste.

La Figura 14 muestra el mapa de contraste de las fosas de cuerpo con cobija con elipses superpuestas, cada una de las cuales representa un índice potencial y su tamaño indica el ancho de banda a lo largo de cada eje. En el primer caso, se resaltan en verde las dos combinaciones que intersecan la región de detección cerca del máximo número 6 de la Tabla 2, mientras que el segundo caso resalta hasta cuatro combinaciones próximas a los máximos identificados con los números 6 al 9 y señalados con cruces. Por lo tanto, las imágenes del primero permiten definir dos índices para la detección de fosas de cuerpo con cobija, mientras que las de *WorldView-3* permiten crear cuatro índices potenciales.

Figura 14. Ejemplos de sobre posición de las bandas del satélite WorldView-3 (izquierda) y del dron DJI Mavic Enterprise 3M (derecha) sobre los mapas de contraste de las fosas de cuerpo con cobija (F11 y F12). Las elipses resaltadas en verde definen los índices más próximos a un máximo local



Fuente: elaboración propia.

Apéndice B. Adquisición y procesamiento de las imágenes Pléiades Neo

Las imágenes de satélites de alta resolución son un producto que se vende en el mercado y es necesario realizar la compra de las escenas con un distribuidor autorizado, por lo que su adquisición se realizó como se describe a continuación. El primer paso fue identificar a un distribuidor que pudiera cumplir con los requerimientos y la experiencia necesaria para dar respuesta a la necesidad. Después de revisar diferentes opciones, se encontró en la empresa Imagen Geo (Imágenes Geográficas S.A. de C.V.) la experiencia, disponibilidad y compromiso con el proyecto. Gracias a las gestiones de la empresa Imagen Geo se tuvo acceso a una imagen con licencia demo del satélite Pléiades Neo de la empresa Airbus Intelligence, del mes de abril del 2023 (previo a la inhumación), lo cual nos permitió establecer que la resolución espacial y espectral son viables para un análisis de esta naturaleza.

Con el apoyo del distribuidor se realizó una propuesta técnica económica con un descuento especial al tratarse de un tema humanitario. La Universidad de Guadalajara realizó las gestiones de compra y adquisición de las imágenes para una cobertura de 50 km². Se obtuvieron en total 7 coberturas de imágenes correspondiente a los meses de abril, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y diciembre del 2023. Las imágenes fueron entregadas en formato estándar GeoTiff a través de un enlace de descarga. El producto adquirido se denomina BUDLE y consiste en un paquete de tres compuestos denominados PAN, NED y RGB. La primera es una banda pancromática con una resolución de 30 cm/pix, mientras que las otras dos contienen bandas multiespectrales con una resolución de 1.2 m/pix. NED es el acrónimo de NIR-Edge-DeepBlue que corresponde a los nombres de las bandas infrarrojo cercano, pared roja y azul profundo, en tanto que RGB lo es de Red-Green-Blue, correspondiente a las bandas del espectro visible (rojo, verde y azul).

Las imágenes de satélite entregadas necesitaron de diferentes procesos para lograr una ortoimagen satelital que fuera compatible con las ortofotos tomadas con los drones y así ser analizadas con la misma referencia espacial. El procesamiento consistió en:

- 1) Apilamiento de las bandas multiespectrales.
- 2) Fusión de las bandas multiespectrales con la pancromática (*pansharpening*).
- 3) Recorte al área de interés.

- 4) Procesamiento de rectificación con la función racional polinomial de la imagen (ortorectificación).
- 5) Control de calidad a partir de una ortofoto del dron.

El reporte de control de calidad indicó un error residual posicional menor a 1 m (RMSE menor a 3 píxeles de 30 cm).

Agradecimientos

Las imágenes Pléiades NEO fueron adquiridas gracias a las gestiones de la Universidad de Guadalajara (UDG) y el apoyo de la empresa ImagenGeo (Imágenes Geográficas S.A. de C.V.). Las imágenes de dron fueron recabadas con drones del Observatorio Etnográfico de las Violencias del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), la Comisión de Búsqueda de Personas del Estado de Jalisco (COBUPEJ) y la empresa Bitelemetric del ingeniero Eduardo Santos. A todos ellos nuestro profundo agradecimiento.



Referencias

- CAMPBELL, J. B. & WYNNE, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford press.
- GITELSON, A. A. & MERZLYAK, M. N. (1998). *Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves*. *Advances in Space Research*, 22, 689–692.
- KABATA-PENDIAS, A. (2000). *Trace elements in soils and plants*. CRC press.
- KALACSKA, M. & BELL, L. S. (2006). *Remote sensing as a tool for the detection of clandestine mass graves*. *Canadian Society of Forensic Science Journal*, 39, 1–13.
- LEBLANC, G., KALACSKA, M. & SOFFER, R. (2014). *Detection of single graves by airborne hyperspectral imaging*. *Forensic Science International*, 245, 17–23.
- LILLESAND, T. K. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- LORUSSO, F. (2021). *Una discusión sobre el concepto de fosa clandestina y el contexto mexicano. El caso de Guanajuato*. *Historia y grafía*, 129–170.
- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L. & ALEGRE-MONDRAGÓN, A. J. (2023). *Espacio Clandestino: A nationwide platform to support clandestine graves search in Mexico*. *International Conference on Geospatial Information Sciences*.
- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L., ALEGRE-MONDRAGÓN, A. J. & RUIZ-REYES, J. (2021). *Geospatial Analysis of Clandestine Graves in Baja California: New Approaches for the Search of Missing Persons in Mexico*. *International Conference on Geospatial Information Sciences*, (págs. 29–39).
- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L., ALEGRE-MONDRAGÓN, A. & GONZÁLEZ-ZUCCOLOTTO, K. (2019). *Potential distribution of clandestine graves in Guerrero using geospatial analysis and modelling*. *Proceedings of the 1st International Con*, 13, págs. 21–28.
- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L., CACCAVARI-GARZA, A., QUINTO-SÁNCHEZ, M. E., MADRIGAL-GÓMEZ, J. M., CORONADO-JUÁREZ, E. & QUIROZ-SUAREZ, D. (2021). *Assessing optical remote sensing for grave detection*. *Forensic Science International*, 329, 111064.

- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L., CORONA-ROMERO, N., MADRIGAL-GÓMEZ, J. M., SAAVEDRA-GUERRERO, A., CORTÉS-VILLAFRANCO, T. & CORONADO-JUÁREZ, E. (2017). *On the detectability of buried remains with hyperspectral measurements. Mexican Conference on Pattern Recognition* (págs. 201–212).
- SILVÁN-CARDENAS, J., ALEGRE-MONDRAGÓN, A., MADRIGAL-GÓMEZ, J. & SILVA-ÁRIAS, C. (2024). *Design of spectral indices for detecting soil contamination from criminal activity in México. Remote Sensing Applications: Society and Environment*, in review.
- SNIRER, E. (2013). *Hyperspectral Remote Sensing of Individual Gravesites – Exploring the effects of Cadaver Decomposition on Vegetation and Soil Spectra*. Master's thesis, McGill University.



