

Artículo original

Teledetección de vertederos a cielo abierto de residuos sólidos municipales en una provincia de Tacna

Remote Sensing of Open-Air Landfills of Municipal Solid Waste in a Province of Tacna

MARISOL MENDOZA AQUINO¹

 <https://orcid.org/0000-0002-1616-9885>

BRIYAN RENSO MAMANI VARGAS²

 <https://orcid.org/0000-0002-7644-755X>

YEMILE ROCIO DEL CARMEN CASTRO MACHACA³

 <https://orcid.org/0000-0002-1384-6828>

Recibido: 5/07/2023

Aceptado: 18/09/2023

Publicado: 5/10/2023

^{1,2,3}Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

E-mail: ¹marmendozaa@virtual.upt.pe, ²briyanfelt@gmail.com, ³yemilecastro@gmail.com



Resumen

La teledetección desempeñó un papel fundamental en el estudio al facilitar la recopilación de datos esenciales para monitorear y crear mapas interactivos que detallan la ubicación de vertederos a cielo abierto de residuos sólidos municipales en la Provincia de Tarata. Este enfoque permitió comprender de manera integral la distribución y características de los vertederos. A través del software ArcMap, se realizó una comparación entre los datos de 2023 y 2016. El proceso implicó examinar imágenes de satélite y registros georreferenciados. Además, se integró un conjunto de ortofotos capturadas por un dron. Los análisis permitieron identificar cuatro vertederos. El más grande se ubicaba en Ticaco, con una superficie de 1568,02 m², destacando la magnitud del problema de disposición de residuos en esta zona. Por otro lado, el más pequeño se encontraba en Estique, con una extensión de 378 m². Además, la evaluación de las imágenes reveló la degradación del suelo a lo largo del tiempo, siendo especialmente evidente en la ortofoto capturada por el dron. Esto resalta el impacto ambiental de las actividades de vertedero. En definitiva, el uso de la teledetección y la tecnología de drones proporciona información valiosa para tomar decisiones informadas y gestionar de manera sostenible los residuos en la región.

Palabras clave: vertedero; residuos sólidos; imagen satelital.

Abstract

Remote sensing played a crucial role in the study by facilitating the collection of essential data for monitoring and creating interactive maps detailing the locations of open-air municipal solid waste landfills in the Tarata Province. This approach allowed for a comprehensive understanding of the distribution and characteristics of the landfills. Using ArcMap software, a comparison was conducted between the 2023 and 2016 data. The process involved the examination of satellite images and georeferenced records. Additionally, a set of orthophotos captured by a drone was integrated into the study. These analyses resulted in the identification of four landfills. The largest one, covering an area of 1568.02 m², was found in Ticaco, highlighting the magnitude of the waste disposal issue in this area. Conversely, the smallest one, covering an area of 378 m², was discovered in Estique. Furthermore, the evaluation of the images revealed soil degradation over time, which was particularly evident in the orthophoto captured by the drone. This stands out the environmental impact of landfill activities. Ultimately, the use of remote sensing and drone technology provides valuable information for making informed decisions and managing waste sustainably in the region.

Keywords: landfill; solid waste; satellite image.

1. Introducción

En la actualidad, la sociedad se enfrenta a una problemática latente relacionada con la gestión de residuos sólidos (Izquierdo-Horna et al., 2022), la cual ha experimentado un notable aumento en los últimos años, y esto se debe en gran medida al crecimiento poblacional. Como consecuencia, se ha generado un incremento significativo en la producción de residuos sólidos (Debrah et al., 2021). Entre las formas de disposición más empleados para la gestión de residuos se encuentran los vertederos de residuos sólidos municipales, industriales y peligrosos. Estos vertederos son establecimientos controlados y diseñados, en los que los residuos deben cumplir con ciertas regulaciones. No obstante, también coexisten los vertederos informales, que son mayormente conocidos como vertederos a cielo abierto (Siddiqua et al., 2022).

La presencia de vertederos a cielo abierto, es un indicador común de una disposición final inadecuada de los desechos, lo que suscita preocupación debido a los posibles efectos negativos que este deficiente manejo podría tener en el medio ambiente. Estos efectos podrían extenderse al deterioro de recursos vitales como el aire, el agua y el suelo (Vaverková, 2019). Es evidente que la ubicación de estos vertederos en una determinada zona suele ser un proceso poco selectivo, sin considerar adecuadamente los criterios para una disposición final apropiada de los desechos domésticos. Como resultado, estos vertederos a menudo contienen una variedad de contaminantes que se liberan durante la descomposición de los residuos, lo que plantea el riesgo de que estos contaminantes lleguen al acuífero, degrade la calidad del agua y, en última instancia, represente una amenaza para la salud humana (Abubakar et al., 2022; Ferronato & Torretta, 2019).

Por lo tanto, la aplicación de tecnologías de teledetección, como el uso de imágenes satelitales, se convierte en una herramienta fundamental para identificar las áreas específicas donde se están depositando los residuos sólidos municipales generados por la población. Estas herramientas nos brindan la capacidad de analizar la ubicación de estos vertederos, lo que a su vez facilita la planificación de acciones de mantenimiento y cierre de estos sitios (Papale et al., 2023; Elkharchy et al., 2023). La información recopilada a través de la teledetección proporcionará a las autoridades locales los datos necesarios para una gestión más eficaz y sostenible de los residuos sólidos.

Es importante destacar que la gestión adecuada de los residuos sólidos contribuye directamente al logro del Objetivo 11 y 13 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que buscan lograr “ciudades y comunidades sostenibles” y “mitigar el cambio climático” (Naciones Unidas, 2015). Al aplicar la teledetección en este contexto, no solo se promueve una gestión más dinámica y actualizada de los residuos sólidos de Tarata, sino que también se protegen los componentes vitales del ecosistema, como el agua, el aire y el suelo. Este enfoque integral es esencial para preservar la diversidad biológica de la región, incluyendo su flora y fauna, y promover una gestión eficaz de los residuos que reduzca la aparición de estos preocupantes puntos críticos. Ante este escenario, el objetivo principal del estudio fue identificar y localizar vertederos a cielo abierto de residuos sólidos municipales de la Provincia de Tarata mediante la Teledetección.

2. Metodología

La metodología se basó en el uso de la teledetección, que involucra la identificación y ubicación de puntos críticos en la zona de estudio mediante la plataforma *United States Geological Survey* (USGS) para obtener imágenes satelitales, así como el empleo de un dron para capturar imágenes aéreas de lugares previamente identificados con el fin de dimensionar vertederos de residuos sólidos.

La georreferenciación se empleó para una correcta ubicación dentro de la zona de estudio, utilizando un GPS para obtener las coordenadas precisas de cada punto. Las imágenes se descargaron de la plataforma USGS, que ofrece datos de diferentes rangos de longitud de onda del espectro electromagnético, permitiendo visualizar aspectos no visibles a simple vista. Para la descarga de imágenes satelitales, se requiere crear una cuenta en USGS, seleccionar el Path/Row correspondiente a la zona de estudio, y optar por la versión más clara de Landsat 8 para evitar problemas de nubosidad en las imágenes (ArcGIS Resource Center, 2019).

Para el análisis de datos se realizó una combinación de bandas denominada Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) por medio del software ArcGIS 10.5 para analizar las imágenes obtenidas, y posteriormente, se compararon con años anteriores para poder establecer los impactos generados. Al respecto, Cherlinka (2023), menciona que el NDVI es una herramienta que facilita la evaluación de la cantidad, calidad y crecimiento de la vegetación. Se calcula al comparar la reflectancia de dos bandas del espectro electromagnético: la banda 4, conocida como infrarrojo cercano, y la banda 3, que corresponde al rango visible en la región del rojo. Luego, esta diferencia se divide por la suma de las reflectancias de estas dos bandas, como se ilustra en la ecuación 1.

$$NDVI = (NIR - VIS)/(NIR + VIS) \quad (1)$$

Donde *NIR* es la luz del infrarrojo cercano y *VIS* es la luz roja visible.

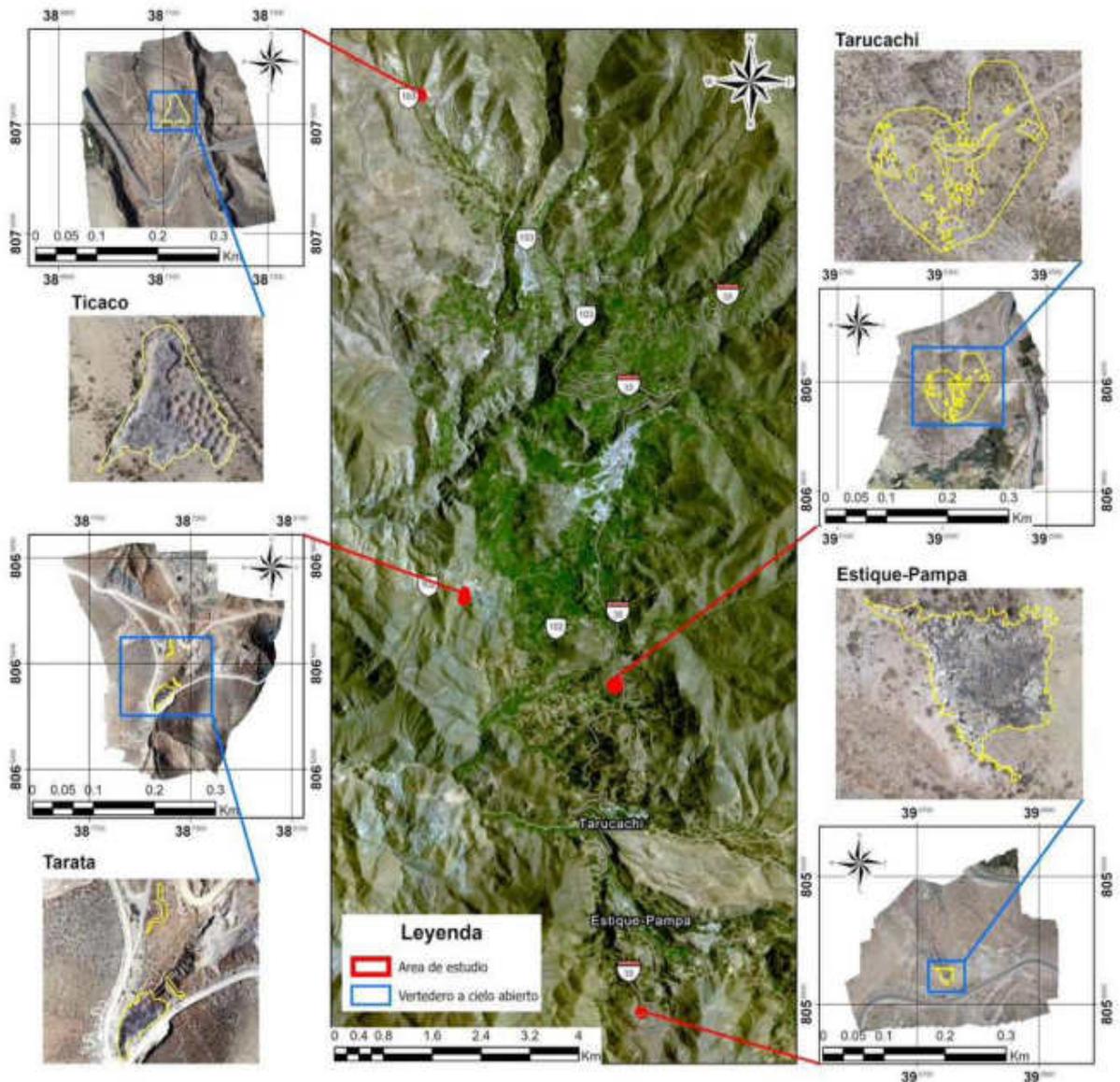
Para el proceso de verificación y delimitación del área afectada, se utilizó un dron para capturar imágenes aéreas de la zona de estudio y verificar su coincidencia con las imágenes Landsat. Posteriormente, se empleó la información obtenida del dron para determinar con mayor precisión el área afectada, especialmente en lo que respecta a los vertederos identificados. Asimismo, el procedimiento para la creación de mapas interactivos implicó la teledetección y la generación de ortofotos en campo, seguido de la identificación y delimitación visual de las áreas degradadas por residuos sólidos. Estas áreas se georreferenciaron para obtener coordenadas, área y perímetro con precisión, y se incorporaron en Google Earth Pro para crear mapas interactivos compartibles. En cuanto a la metodología de comparación multianual involucró la revisión de imágenes satelitales en Google Earth Pro, la identificación de áreas degradadas en los vertederos de los 4 distritos (Estique, Tarata, Tarucachi y Ticaco), la descarga de imágenes disponibles para los años 2013, 2016, 2019, 2020 y la ortofoto de 2023, seguida de la comparación de la degradación de las zonas de estudio debido a residuos sólidos a lo largo de varios años.

3. Resultados

El área de estudio, se encuentra dentro de las cuatro provincias que conforman el departamento de Tacna en el Sur del Perú, ubicada al noreste de la región Tacna, encaramada en un tramo de la cordillera de los Andes, específicamente en la Cordillera del Barroso, geográficamente está dividida entre dos cuencas fluviales: la cuenca alta del río Sama y la cuenca del río Maure.

En la Figura 1, se muestra la ubicación y el dimensionamiento de los vertederos a cielo abierto en la provincia de Tarata. En el centro, se presenta una vista satelital que marca la ubicación de los vertederos en color rojo, mientras que, en los laterales se incluyen vistas aéreas (Ortofoto) capturadas por un dron para cada uno de los vertederos. Gracias a las herramientas SIG, se calcularon las áreas de los vertederos, resaltadas en color amarillo.

Figura 1
Localización de los vertederos y dimensionamiento



Respecto a la localización se usó la georreferenciación de las zonas de estudio para tener con precisión el espacio geográfico y obtener las coordenadas de cada vertedero de residuos sólidos, resultando lo que se aprecia en la Tabla 1.

Tabla 1
Coordenadas de los vertederos

Vertedero	Coordenada Este	Coordenada Norte
Estique	390759	8058837
Tarata	387860	8065430
Tarucachi	390402	8064040
Ticaco	387123	8073225

El dimensionamiento de las áreas de vertederos se llevó a cabo utilizando la herramienta de ArcGIS y las imágenes obtenidas mediante el dron. Se creó un polígono para delimitar con precisión los vertederos de residuos sólidos que prevalecen en la provincia de Tarata, como se muestra en la Tabla 2. En este contexto, el vertedero de Ticaco presenta la mayor extensión, mientras que el de Estique, tiene la menor área en comparación a los cuatro vertederos.

Tabla 2
Áreas de los vertederos

Vertedero	Área (m ²)
Ticaco	1568,022
Tarucachi	1347,444
Tarata	1195,131
Estique	378,561

3.1. Procesamiento y comparación con imágenes satelitales

Se basó en la interpretación visual comparativa del NDVI de imágenes procesadas, la cual se realizó con la herramienta *Raster Calculator* de ArcGIS, donde se empleó la combinación de bandas con la Ortofoto obtenida del Dron, y la comparación con dos imágenes satelitales descargadas de USGS una del presente año y otra del año 2016, haciendo una diferencia de 7 años, esto debido a que la calidad de las imágenes satelitales de esta plataforma no ofrece una calidad alta cuando son áreas pequeñas y se trabajó con imágenes recientes que permitan una mejor visualización (Figura 2).

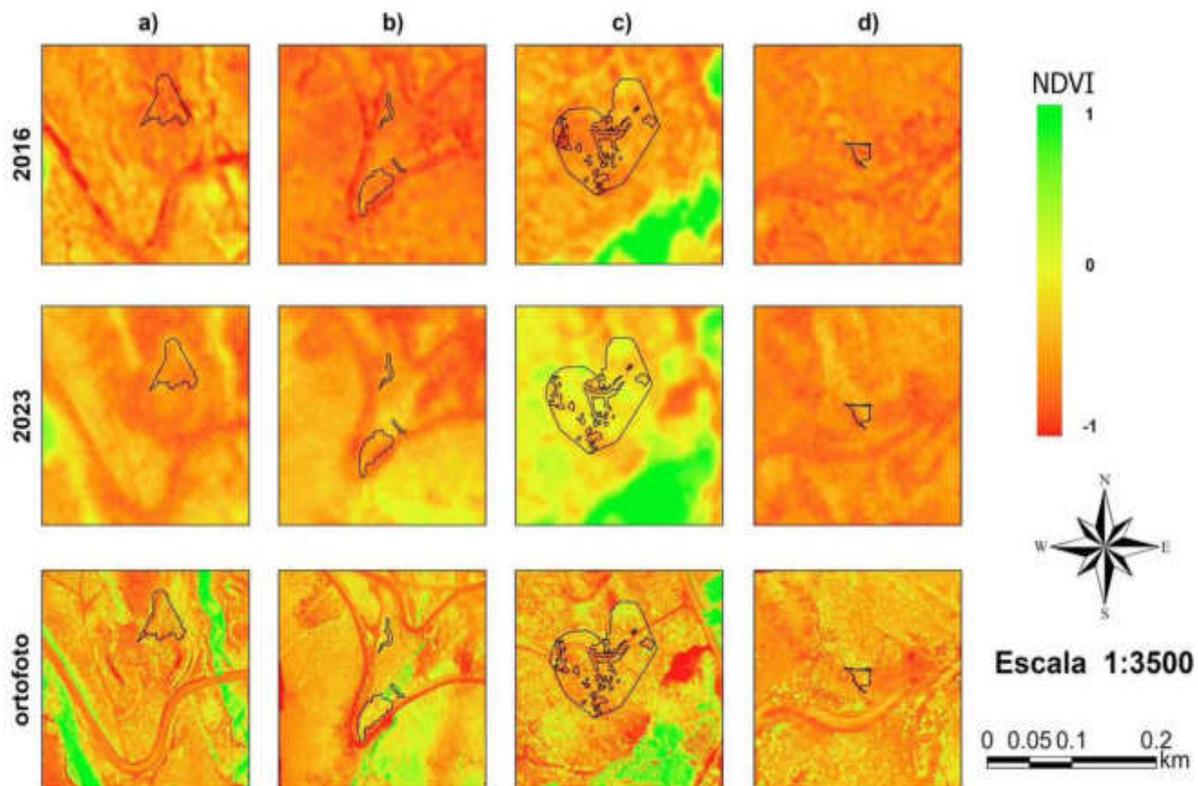
Con las áreas previamente delimitadas, se procedió a visualizar los cambios a lo largo de los años. Se debe tener en cuenta que los vertederos identificados inicialmente eran de menor tamaño y, en el año 2016, las imágenes muestran suelos áridos con escasa vegetación, predominantemente en tonos rojos y anaranjados. Para el año 2023, se observa un cambio

hacia tonalidades más amarillentas con algunas áreas verdes, según lo indicado en las imágenes satelitales. Esto sugiere una mayor presencia de vegetación.

Sin embargo, es importante considerar que los residuos sólidos se degradan con el tiempo, y la materia orgánica presente en los vertederos puede dar lugar al crecimiento de vegetación. Además, las imágenes satelitales se capturaron antes de la temporada de lluvias en la zona. Por esta razón, el cúmulo de residuos emite una reflectancia que puede interpretarse como si no hubiera una presencia significativa de residuos sólidos, como se observó in situ. Por tanto, la visualización con el dron, como se muestra en la ortofoto, resulta crucial, ya que ofrece una mayor calidad y concuerda con la interpretación mencionada. En este caso, la mayor presencia de residuos sólidos se manifiesta en una reflectancia amarillenta.

Figura 2

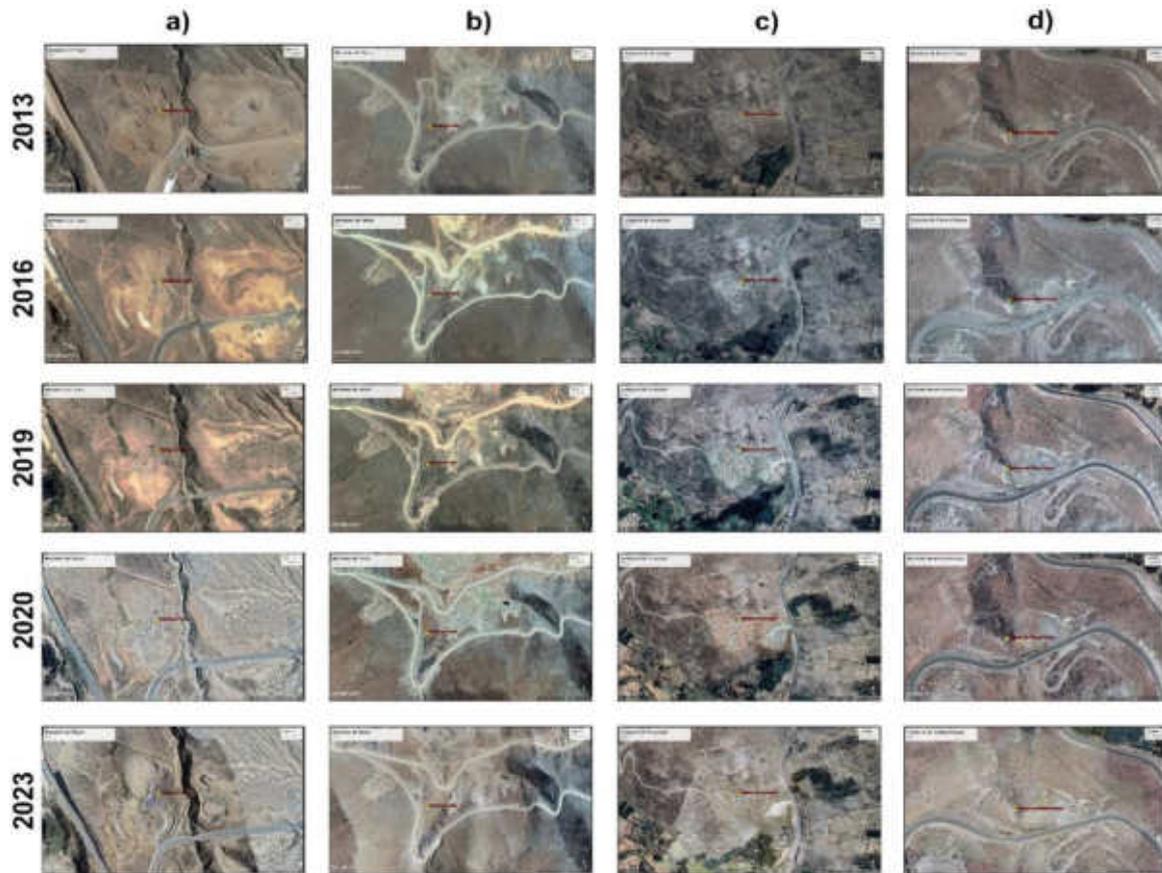
Comparación por NDVI en diferentes años vs imágenes de Dron



Nota. Las columnas representan los vertederos a cielo abierto de a) Ticaco, b) Tarata, c) Tarucachi y d) Estique; mientras que las filas representan el NDVI para el año 2016, 2023 y la Ortofoto.

La Figura 3 presenta imágenes de los vertederos a cielo abierto en diferentes años, desde 2013 hasta 2023. En estas imágenes, se pueden observar patrones de cambios en la cobertura. El cambio más notable se evidencia en el vertedero a cielo abierto de Tarucachi, que ha pasado de estar mayormente cubierto de vegetación natural a presentar una degradación casi completa de su cobertura.

Figura 3
Comparación multitemporal



Nota. Las columnas representan los vertederos a cielo abierto de a) Ticaco, b) Tarata, c) Tarucachi y d) Estique; mientras que las filas representan las imágenes obtenidas de Google Earth Pro de los años 2013, 2016, 2019, 2020 y 2023.

3.2. Teledetección y uso del Dron en la generación de datos para el seguimiento de vertederos

Mediante la teledetección, se obtuvieron imágenes de una extensa superficie que se adaptaron para trabajar en la zona de estudio, lo que resultó en una menor complejidad al analizar los resultados en comparación con los drones. Los drones, al ser vehículos no tripulados de un tamaño manejable y de uso relativamente sencillo, pudieron desplegarse en el área de investigación, ofreciendo resultados de mayor calidad gracias a sus sensores de alta resolución. Estos sensores permitieron una resolución adecuada para su uso con el software ArcMap (Figura 4).

La georreferenciación fue más precisa con ayuda del Dron ya que se pudo observar puntos específicos con mayor facilidad. Por otro lado, según Derichebourg (2019) los drones se han utilizado para identificar problemas de exceso de basura en las playas, así como para prevenir lo mejor posible incendios en zonas de alto riesgo. Ahora también podrían servir en conjunto con la teledetección para mejorar la eficiencia de los vertederos de residuos sólidos como su seguimiento, teniendo en cuenta que la información confiable es vital en los estudios, ya que estos deben proporcionar resultados fiables para luego ser tomado como antecedentes.

Figura 4

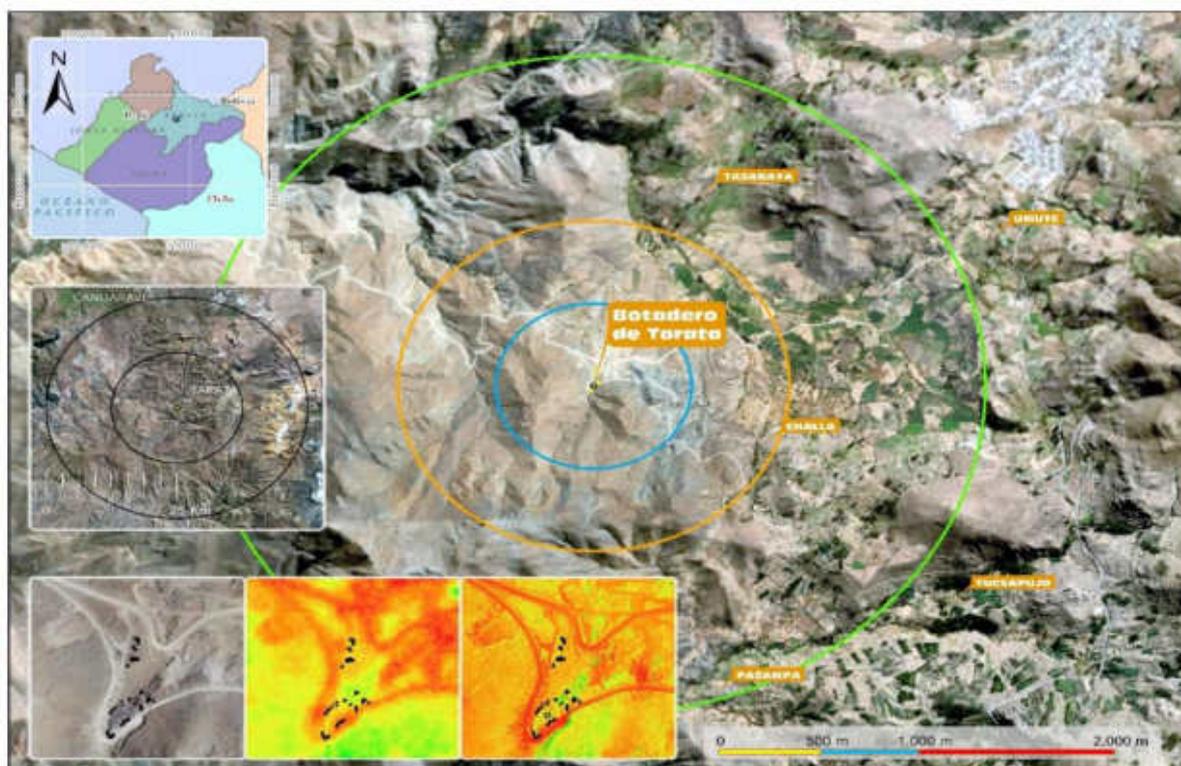
Comparación entre Teledetección y Dron



En la Figura 5, se aprecia el vertedero de Tarata, el cual está ubicado aproximadamente a 1 km del centro poblado de Challa y a 2 km del centro poblado de Tucsapujo. La Ortofoto, con un área delimitada de 1195 m², muestra claramente los residuos sólidos, mientras que el NDVI muestra la degradación del suelo causada por estos en tonos rojizos y naranjas.

Figura 5

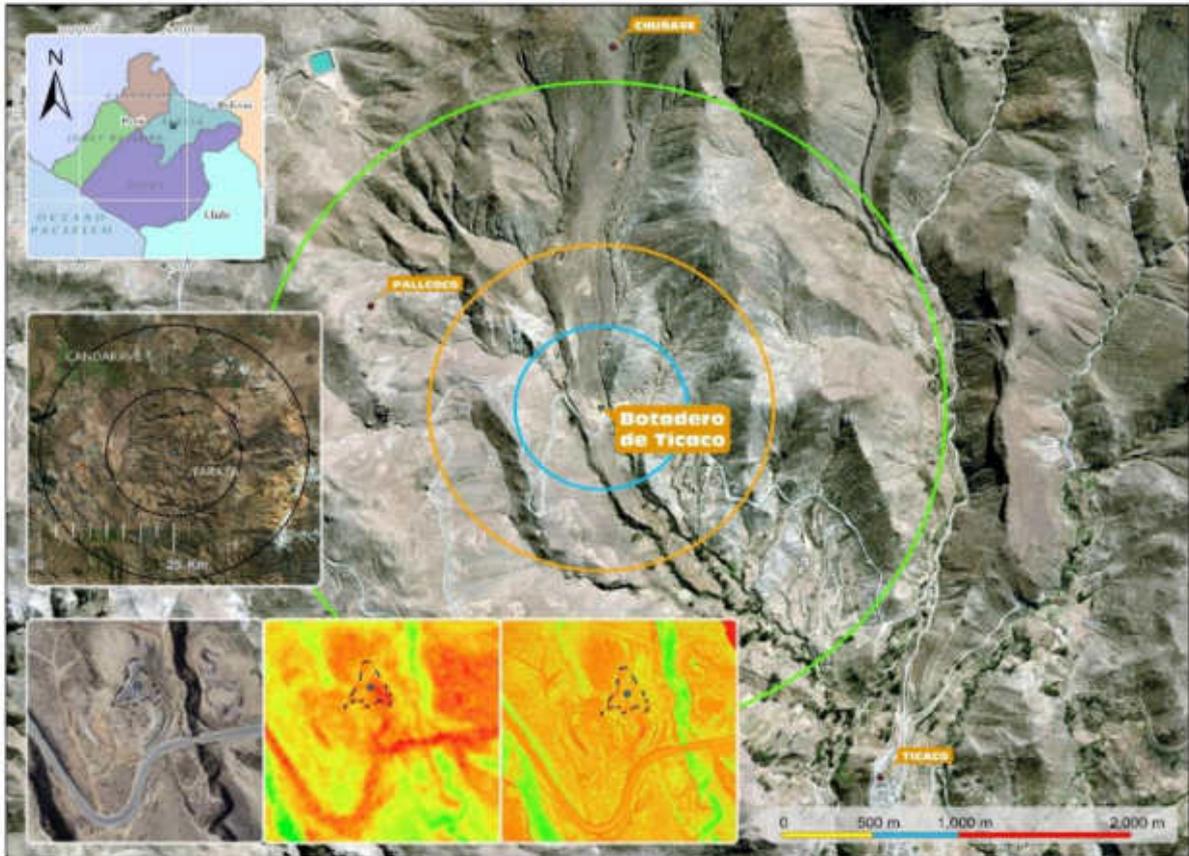
Mapa descriptivo del vertedero a cielo abierto de Tarata



En la Figura 6, se observa el vertedero de Ticaco, el cual se encuentra ubicado a aproximadamente 1,5 km del centro poblado de Pallcoco y a más de 2 km del distrito de Ticaco. Con un área delimitada de 1568 m², es uno de los vertederos más grandes estudiados. La Ortofoto muestra de manera evidente la presencia de residuos sólidos, mientras que el NDVI indica la degradación del suelo causada por estos residuos en tonos rojizos intensos.

Figura 6

Mapa descriptivo del vertedero a cielo abierto de Ticaco



En la Figura 7, se muestra el vertedero de Estique, ubicado a aproximadamente 2 km del distrito de Estique Pueblo. Con un área delimitada de 379 m², es uno de los vertederos más pequeños estudiados. La Ortofoto muestra de manera evidente la presencia de residuos sólidos, mientras que el NDVI indica la degradación del suelo causada por estos residuos en tonos rojizos intensos y naranjas.

Por su parte, en la Figura 8 se visualiza el vertedero de Tarucachi, ubicado a aproximadamente 0,7 km del centro poblado de Tucsapujo y a 2 km del distrito de Tarucachi. Con un área delimitada de 1347 m², la Ortofoto presenta de manera difusa los residuos sólidos, que se encuentran agrupados en montículos, mientras que el NDVI indica la degradación del suelo causada por los residuos sólidos en tonos rojizos y naranjas.

4. Discusión

En una investigación realizada por Coa & Rosales (2020), utilizando teledetección junto con imágenes de Google Maps y Google Earth. Indican que puede ser aplicada antes y después de un plan de gestión integral de residuos sólidos para prevenir así impactos negativos en el medio ambiente y en las personas que viven en los alrededores. En cuanto a la zona de estudio de la presente investigación, se observó que no existe un relleno sanitario, por lo tanto, el uso de esta herramienta permitiría un mejor análisis para un futuro relleno sanitario. También es importante tener en cuenta que sería necesario implementar medidas mitigadoras y correctivas para los vertederos de residuos sólidos. Es relevante destacar que, en comparación con la investigación de Coa & Rosales, donde se identificaron 40 puntos críticos y se confirmaron con visitas de campo, en el caso de Tarata se trabajó con 4 puntos críticos de mayor magnitud y que son constantes en el tiempo, ya que son lugares de disposición final de residuos sólidos. Esto representa una problemática latente, ya que aún no se han implementado medidas mitigadoras de gran impacto.

Los sitios de relleno sanitario representan una alternativa viable para la disposición final de los desechos urbanos, cuando se diseñan y gestionan adecuadamente, estos lugares aportan considerables beneficios tanto para la población como para el medio ambiente (Sánchez et al. (2019). Sin embargo, una gestión deficiente y la eliminación inadecuada de residuos pueden conllevar consecuencias irreversibles para los residentes. Por lo tanto, es de suma importancia que la población promueva un plan de reciclaje de desechos, lo que contribuirá a la reutilización y erradicación de malos hábitos, evitando así las repercusiones negativas para la salud, como la quema de basura, la disposición inapropiada de residuos y la acumulación de desechos. Durante el presente estudio, se observó que la disposición de los residuos no ha pasado por el proceso de reciclaje ni optimización, y en dos de estos lugares se ha constatado la quema de residuos, lo que ha tenido un impacto negativo en la vegetación circundante y ha generado olores penetrantes debido a su descomposición. Por lo tanto, se hace necesario adoptar medidas mitigadoras similares a las propuestas para la comunidad de Chepo, especialmente porque en ambos casos se trata de poblaciones reducidas ubicadas en zonas donde también se llevan a cabo actividades agrícolas y ganaderas. La solución, en última instancia, depende en gran medida del interés y la participación de todas las partes involucradas.

Los problemas de acceso a los datos, la determinación de enrutamientos óptimos para la fase de transporte y la selección de tecnologías de tratamiento de la gestión de residuos sólidos urbanos (Sierra, 2023), podrían resolverse eficazmente mediante el uso de una serie de técnicas geoespaciales, tales como la detección remota (DR) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En consecuencia, con la presente investigación y sus resultados, se logró identificar la presencia de estos vertederos de residuos sólidos, así como obtener información acerca de sus dimensiones, lo que permite la creación de modelos para la gestión de residuos que detallen las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas. Además, brinda la oportunidad de tomar medidas de mejora en el servicio que prestan los gobiernos locales y desarrollar estrategias que permitan una mejor disposición final de los residuos sólidos.

En una investigación donde se identificó vertederos mediante sensores remotos (SR) y sistemas de información geográfica (SIG) (Aslam et al., 2022), dividió en 9 polígonos de Thiessen y se clasificó según su favorabilidad para el desarrollo y expansión de vertederos. De esta manera, se obtuvo la información necesaria y luego se definió el Polígono 6 como la mejor

región para el desarrollo y expansión de vertederos, debido a su mayor cantidad de vegetación, menor población y menor presencia de áreas edificadas, según los índices medios de rango y desviación estándar (SD) de RS y datos vectoriales. En ambos estudios, se proporcionó un mecanismo integrado confiable basado en SIG y SR que puede implementarse en áreas de estudio similares y ampliarse a otros países en desarrollo. Como resultado, es posible mejorar la planificación urbana y la gestión de la ciudad, y gestionar los residuos sólidos urbanos con destreza, como ambas investigaciones lo demuestran. El uso de estas tecnologías no solo facilita la gestión de la información, sino que también promueve el desarrollo de nuevas alternativas de solución, teniendo en cuenta las particularidades de cada sector.

Otras investigaciones basadas en el análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat, realizaron el seguimiento y evaluación de la temperatura de la superficie terrestre en vertederos, encontrando una diferencia de temperaturas reducida entre las zonas de acumulación de residuos y los terrenos contiguos (Plaza et al. (2017), esta diferencia podría deberse a la posible momificación de los residuos depositados, influenciada principalmente por la extrema aridez de la región. Esta aridez se caracteriza por la alta evapotranspiración del terreno, la baja precipitación (régimen de aridez en ambos casos de tipo xérico), la salinidad del suelo y otros factores. Como resultado, la descomposición de los residuos es muy lenta o casi inexistente, lo que se refleja en la reducida generación de lixiviados y biogás.

Este hallazgo es un punto en común entre ambas investigaciones, ya que fue necesario verificar la presencia de residuos y establecer relaciones entre los datos obtenidos en el sitio y los recabados a través de la teledetección para obtener resultados más precisos. Sin embargo, los datos obtenidos plantean dudas sobre la utilidad de la teledetección para la localización o el seguimiento de vertederos en zonas áridas, donde la degradación es mínima o nula, como se evidenció en la investigación de Plaza et al. (2017). A pesar de esto, en la presente investigación se complementaron los datos con imágenes de drones, lo que permitió un seguimiento y análisis más efectivos de la realidad en la zona de estudio.

5. Conclusiones

Las tecnologías de la teledetección y georreferenciación demostraron ser una herramienta esencial en la identificación y monitoreo de vertederos a cielo abierto de residuos sólidos municipales en la Provincia de Tarata, teniendo en cuenta su dimensión y persistencia a lo largo del tiempo. Sin embargo, la incorporación de drones proporcionó imágenes aéreas de alta calidad en la zona de estudio.

Así mismo, la aplicación de la teledetección para generar datos destinados al análisis multitemporal, la creación de mapas interactivos e imágenes obtenidas durante las visitas realizadas a cada vertedero facilitaron una visualización clara y precisa. Además, estas visualizaciones resultaron esenciales para la comunicación de los hallazgos y la concienciación pública sobre la gestión de residuos en la región.

Por último, la integración de tecnologías como la teledetección, la georreferenciación y el uso de drones, respaldada por la plataforma de Google Earth Pro, ha permitido identificar, monitorear y visualizar de manera efectiva los vertederos. Estos avances tecnológicos representan un paso importante hacia la gestión sostenible de residuos en esta región y proporcionan una base sólida para la toma de decisiones informadas en el futuro.

6. Referencias Bibliográficas

- Abubakar, I. R., Maniruzzaman, K. M., Dano, U. L., AlShihri, F. S., AlShammari, M. S., Ahmed, S. M. S., Al-Gehlani, W. A. G., & Alrawaf, T. I. (2022). Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the Global South. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12717. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912717>
- ArcGIS Resource Center (2019). *Georreferenciación y sistemas de coordenadas*. <https://goo.su/uQjG>
- Aslam, B., Maqsoom, A., Tahir, M. D., Ullah, F., Rehman, M. S. U., & Albattah, M. (2022). Identifying and ranking landfill sites for municipal solid waste management: An integrated remote sensing and GIS approach. *Buildings*, 12(5), 605. <https://doi.org/10.3390/buildings12050605>
- Cherlinka, V. (28 de setiembre de 2020). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): Preguntas frecuentes y qué necesita saber*. EOS Data Analytics. <https://goo.su/HDoU>
- Coa, E. & Rosales J. (2020). *Teledetección en la identificación de puntos críticos de residuos sólidos en el distrito de Comas, 2020* [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/55847>
- Debrah, J. K., Vidal, D. G., & Dinis, M. A. P. (2021). Raising awareness on solid Waste Management through formal education for sustainability: A developing countries evidence review. *Recycling*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.3390/recycling6010006>
- Derichebourg (27 de marzo de 2019). *Drones y sistemas inteligentes para vigilar vertederos de residuos urbanos*. <https://goo.su/6FLara>
- Elkhrachy, I., Ranjan Yadav, R., Nouh Mabdeh, A., Nguyen Thanh, P., Spalevic, V., & Dudic, B. (2023). Landslide susceptibility mapping and management in Western Serbia: an analysis of ANFIS- and SVM-based hybrid models. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1218954>
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- Izquierdo-Horna, L., Damazo, M., & Yanayaco, D. (2022). Identification of urban sectors prone to solid waste accumulation: A machine learning approach based on social indicators. *Computers, Environment and Urban Systems*, 96(101834), 101834. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101834>
- Naciones Unidas (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://goo.su/niQRR>
- Papale, L. G., Guerrisi, G., De Santis, D., Schiavon, G., & Del Frate, F. (2023). Satellite data potentialities in solid waste landfill monitoring: Review and case studies. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(8), 3917. <https://doi.org/10.3390/s23083917>
- Plaza, J. A. M., Martín, L. A. F., Ávalos, G. Á., & de Cortázar, A. L. G. (2017). *Seguimiento y*

evaluación de la temperatura en superficie de vertederos en zonas áridas a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales landsat. Unpublished.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20266.00965>

Sánchez de Peralta, M. E., Smith, R., & Jones Burkett, V. (2019). Impacto del vertedero a cielo abierto en habitantes de la comunidad de Chepo, Higuera 2018. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 8(2), 95–104.
<https://revistas.up.ac.pa/index.php/centros/article/view/735>

Siddiqua, A., Hahladakis, J. N., & Al-Attiya, W. A. K. A. (2022). An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(39), 58514–58536.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>

Sierra, L. (2023). Integrando sistemas de teledetección y georreferenciación en la gestión de los residuos. *Innovare Revista de Ciencia y Tecnología*, 12(1), 38–40.
<https://doi.org/10.5377/innovare.v12i1-1.16013>

Vaverková. (2019). Landfill impacts on the environment— review. *Geosciences*, 9(10), 431.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9100431>

Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Privada de Tacna, Perú (UPT) – Facultad de Ingeniería por financiar esta investigación (Resolución de Decanato Nro. 830-D-2022-FAING/UPT). También, agradecen a Alvaro Herrera Villanueva por la recopilación de información de campo.