

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

TESIS:

**IDENTIFICACIÓN DE MICROPLÁSTICOS POLÍMEROS (PET Y LDPE)
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN SUELOS
AGRÍCOLAS DE LA ZONA HUACARÍZ-CAJAMARCA 2024**

Para optar el Grado Académico de

MAESTRO EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL

Presentada por:

EVELYN VERÓNICA ROJAS VILLEGAS

Asesor:

Dr. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ

Cajamarca, Perú

2025



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
Evelyn Verónica Rojas Villegas
DNI: 41385842
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.
Programa de Maestría en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental.
2. Asesor: Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
Identificación de microplásticos polímeros (PET y LDPE) mediante el uso de imágenes hiperespectrales en suelos agrícolas de la zona Huacaríz - Cajamarca 2024
6. Fecha de evaluación: **07/08/2025**
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **11%**
9. Código Documento: **3117:479299444**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **15/08/2025**

<small>Firma y/o Sello Emisor Constancia</small>

..... Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz DNI: 40043738

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2025 by
EVELYN VERÓNICA ROJAS VILLEGAS
Todos los derechos reservados



Universidad Nacional de Cajamarca
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD
Escuela de Posgrado
CAJAMARCA - PERÚ



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las **15:10** horas, del día 20 de junio del dos mil veinticinco, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el, **Dr. AUGUSTO HUGO MOSQUEIRA ESTRAYER, M.Cs. EDGAR DARWIN DIAZ MORI, M.Cs. MAX EDWIN SANGAY TERRONES**, y en calidad de Asesor el **Dr. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada “**IDENTIFICACIÓN DE MICROPLÁSTICOS POLÍMEROS (PET Y LDPE) MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA HUACARÍZ - CAJAMARCA 2024**”, presentada por la **Bachiller en Ingeniería Ambiental EVELYN VERÓNICA ROJAS VILLEGAS**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó **APROBAR** con la calificación de **DIECISIETE** la mencionada Tesis; en tal virtud, la **Bachiller en Ingeniería Ambiental, EVELYN VERÓNICA ROJAS VILLEGAS**, está apta para recibir en ceremonia especial el Diploma que la acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS Mención en GESTIÓN AMBIENTAL**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las **16:40** horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

.....
Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
Asesor

.....
Dr. Augusto Hugo Mosqueira Estrayer
Jurado Evaluador

.....
M.Cs. Edgar Darwin Diaz Mori
Jurado Evaluador

.....
M.Cs. Max Edwin Sangay Terrones
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

Al amor de los amores; mi señor Jesús y mamita María por darme la vida, fe y esperanza para lograr cada anhelo y hacer de mí una persona digna y fiel.

A mis padres, quienes son mi mayor ejemplo de amor, unión, superación y constancia, siempre inculcándome respeto y humildad.

A mi esposo Máximo, gracias por ser mi apoyo constante, por hacer de mi vida tan especial llenándome de dicha y amor con cada detalle y palabra de aliento.

A mis hijos Max y Leonel a quienes amo con todo mí ser y quienes son el motivo de levantarme feliz cada día y enfrentar cada desafío propuesto con mucho amor, fortaleza y decisión.

A mis hermanos, tíos, primos y a toda mi familia que siempre creyeron en mi perseverancia y superación, mostrándome su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi asesor, Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz, quien estuvo siempre involucrado conmigo en la presente investigación, sin sus conocimientos y correcciones adecuadas no hubiese podido lograr finalizar esta meta tan anhelada

Gracias al Dr. Eduardo Torres Carranza por su apoyo en el trabajo, por su amistad, por su guía y todos sus consejos, los llevaré grabados en mi memoria durante toda mi vida profesional y personal.

Gracias a mi amiga Lupita por apoyarme con Leito en momentos de mucha carga laboral y brindarme su amistad incondicional y sincera.

Gracias a Cecilia, mi amiga que fue una inspiración como madre para vencer los obstáculos y lograr cumplir los sueños a pesar de las dificultades de la vida.

Agradecer a la Universidad Nacional de Cajamarca que me ha permitido laborar en ella, y a la vez brindarme la oportunidad de superarme profesionalmente y obtener mi tan ansiado título.

Agradezco a cada directivo por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender conocimientos.

No siempre podemos hacer grandes cosas, pero sí podemos hacer cosas pequeñas con amor.

Madre Teresa de Calcuta

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
EPILOGO	vii
ÍNDICE.....	viii
Lista de tablas	xii
Lista de figuras	xiii
Lista de abreviaturas.....	xiv
Resumen	xv
Abstract	xvi
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO II.	
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	4
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	4
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	6
2.1.3. Antecedentes Regionales- Locales.....	7
2.2. Bases Teóricas.....	8
2.2.1. Residuo sólido.....	8
2.2.2. El plástico como residuo sólido	9
2.2.3. Plásticos en el Perú.....	9

2.2.4. Clasificación de polímeros plásticos.....	10
2.2.5. Polímeros.....	13
2.2.6. Polímeros PET (Polietileno Tereftalato)	14
2.2.7. Polímero LDPE (Polietileno de Baja Densidad)	15
2.2.8. Microplásticos.....	16
2.2.9. El suelo: Depósito de microplásticos.....	17
2.2.10. Imágenes Hiperespectrales.....	18
2.2.11. Espectro electromagnético y Longitud de onda	20
2.2.12. Sensores lineales o de empuje (Pushbroom Scanner)	22
2.2.13. Modelos de clasificación HSI.....	23
a) Máquina de soporte de vectores (SVM).....	23
b) Componentes Principales (PCA).....	24
 CAPITULO III.	
PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	25
3.1. Hipótesis del a investigación.....	25
 CAPÍTULO IV.	
MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1. Ubicación del área de estudio	26
4.1.1. Ubicación geográfica.....	26
4.1.2. Accesibilidad.....	28
4.1.3. Clima.....	28
4.2. Diseño de la investigación, unidad de análisis, población y muestra	30
4.2.1. Diseño de la investigación.....	30
4.2.2. Unidad de análisis.....	31
4.2.3. Población de estudio.....	33
4.2.4. Muestra.....	34
4.3. Equipos y materiales.....	34
4.3.1. Materiales	35
4.3.2. Equipos	35
4.3.3. Sistema de Programación	36

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	37
4.4.1. Etapa de gabinete.....	37
4.4.2. Etapa de muestreo.....	37
4.4.3. Técnica de obtención de microplásticos.....	38
4.5. Procesamiento y análisis de datos	41
4.5.1. Calibración del sistema de imagen hiperespectral.....	41
4.5.2. Adquisición de datos espectrales	42
4.5.3. Pre tratamiento espectral	43
4.5.4. Algoritmo de extracción de características.....	43
4.5.5. Construcción de modelo SVM.....	44
CAPÍTULO V	
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
5.1. Análisis de resultados	45
5.1.1. Procesamiento de las imágenes hiperespectrales.....	45
5.1. 2. Comparación espectral de MPs, suelo original y sus mezclas.....	46
5.1.3. Curva espectral de muestras de microplásticos del suelo	47
5.1.4. Extracción de características de datos espectrales	48
5.1.5. Indicador de evaluación de la clasificación de datos espectrales	51
CAPÍTULO VI	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
6.1. Conclusiones	59
6.2. Recomendaciones	60
REFERENCIAS.....	62
ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de termoplásticos	12
Tabla 2. Coordenadas UTM-WGS84 de los vértices de la Zona de Investigación.....	26
Tabla 3. Rutas de acceso Cajamarca – Huacaríz.....	28
Tabla 4. Tratamientos y concentraciones de microplásticos.....	32
Tabla 5. Tratamientos de las muestras de la investigación	40
Tabla 6. Contribución del componente principal de muestras analizadas	50
Tabla 7. Resultados de la clasificación con cuatro concentraciones diferentes de MP.....	52
Tabla 8. Clasificación de datos espectrales mediante SVM	54
Tabla 9. Resultados de la Tabla ANOVA	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representación de una onda electromagnética.....	21
Figura 2: Representación de un espectro electromagnético.....	22
Figura 3: Representación de un sensor Lineal o de empuje	23
Figura 4: Ubicación de la zona de muestreo caserío Huacaríz.....	27
Figura 5: Pronóstico mensual de precipitación de la región Cajamarca y punto de muestreo	29
Figura 6: Situación actual de la zona de la campina de Cajamarca- Huacaríz	30
Figura 7: Diagrama de flujo de la investigación	31
Figura 8: Zona de muestreo y recolección de material plástico (PET y LDPE)	33
Figura 9: Preparación de la muestra de suelo con tipo de microplástico	34
Figura 10: Pantallazo del software Spectronon 3.5. utilizado para la recolección de datos.....	36
Figura 11: Tamizado de microplásticos.....	39
Figura 12: Codificación de muestras según tratamiento	41
Figura 13: Calibración del enfoque de la cámara y procesador de imágenes	42
Figura 14: Representación de un hipercubo con muestra de suelo.....	45
Figura 15: Espectro del patrón de referencia y muestras de suelo	46
Figura 16: Espectros NIR de microplásticos PET y LDPE en distintas concentraciones	47
Figura 17: Proyección lineal del algoritmo de componentes principales	48
Figura 18. Análisis estadístico de los tratamientos en muestras PET y LDPE	57

LISTA DE ABREVIATURAS

- **HSI:** sistema de imagen hiperespectral
- **MP:** microplásticos
- **PE:** Polietileno
- **PA:** poliamida
- **PS:** poliestireno
- **PP:** polipropileno
- **PET:** Polietileno Tereftalato
- **LDPE:** Polietileno de baja densidad
- **ONU:** Organización de las Naciones Unidas
- **OCDE:** Organización para la cooperación y desarrollo económico
- **INC:** Comité intergubernamental de negociación
- **SVM:** Maquina de soporte de vectores
- **PCA:** Análisis de componente de vectores
- **NIR:** Infrarrojo cercano

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Muestra de referencias de los microplásticos a diferentes niveles de concentración.....	71
Anexo 2: Pesado de suelo y microplásticos PET y LDPE.....	72
Anexo3: Procesamiento de imágenes espectrales en muestras analizadas	73
Anexo 4: Análisis espectral de las muestras analizadas	75

RESUMEN

Esta investigación tiene por finalidad identificar microplásticos de los polímeros Polietileno Tereftalato (PET) y Polietileno de baja densidad (LDPE) en suelos agrícolas a través del uso de imágenes hiperespectrales. Los microplásticos MP son partículas plásticas (< 5mm) que impactan en el ambiente. Éste impacto se lograría controlar y mitigar con la identificación oportuna, eficiente y precisa de estos contaminantes. En la investigación se logró identificar microplásticos PET y LDPE en muestras de suelo agrícola usando tecnología hiperespectral; extrayendo sus características mediante análisis de componentes principales PCA para luego desarrollar el modelo de máquina de vectores de soporte SVM y el análisis ANOVA prueba de Tukey; se logró identificar, clasificar y diferenciar 10 muestras de suelo con microplásticos, estableciendo 4 categorías de suelo: suelo, suelo + PET, suelo + LDPE, suelo + PET +LDPE, con concentraciones diferentes de 1%, 2%, 3%, 4%, 6% y tres muestras paralelas en cada categoría. Utilizando el PCA se logró reducir datos; obteniendo el primer componente (M1) 93.63%, segundo componente (M2) 14.12 % y tercer componente (M3) 5.7%; el SVM logró 100% clasificación en suelo, suelo + PET, suelo + LDPE, mezcla al 6%, en el análisis Tukey se determina diferencias significativas entre distintos grupos de muestreo (a, b, c, d, e), un valor menor a 0.05 en esta prueba significa que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una diferencia significativa entre cada concentración y tipo de polímero.

Palabras clave: microplásticos, imágenes hiperespectrales, PET y LDPE

ABSTRACT

This research aims to identify microplastics of the polymers Polyethylene Terephthalate (PET) and Low Density Polyethylene (LDPE) in agricultural soils through the use of hyperspectral images. MP microplastics are plastic particles (< 5mm) that impact the environment. This impact could be controlled and mitigated with the timely, efficient and accurate identification of these pollutants. In the research, it was possible to identify PET and LDPE microplastics in agricultural soil samples using hyperspectral technology; extracting their characteristics through principal component analysis PCA and then developing the support vector machine model SVM and the ANOVA analysis Tukey test; it was possible to identify, classify and differentiate 10 soil samples with microplastics, establishing 4 soil categories: soil, soil + PET, soil + LDPE, soil + PET + LDPE, with different concentrations of 1%, 2%, 3%, 4%, 6% and three parallel samples in each category. Using PCA, data reduction was achieved, yielding the first component (M1) 93.63%, the second component (M2) 14.12%, and the third component (M3) 5.7%. SVM achieved 100% classification into soil, soil + PET, soil + LDPE, and a 6% mixture. Tukey analysis determined significant differences between different sampling groups (a, b, c, d, e). A value less than 0.05 in this test means the null hypothesis is rejected, and it is concluded that there is a significant difference between each concentration and polymer type.

Keywords: microplastics, hyperspectral images, PET and LDPE

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Cajamarca ha venido creciendo poblacionalmente y con ello la expansión territorial ha logrado transformar muchas zonas agrícolas en zonas urbanas, esta zona agrícola presenta impactos debido a las actividades antrópicas como generación de residuos sólidos, uso de aguas servidas, parque automotor, procesos productivos y extractivos, consumismo (uso excesivo de plásticos). Según (Banco et al, 2021; Yunlong et al 2023), la contaminación por productos plásticos en su disposición final que con el tiempo y los agentes ambientales se convierten en partículas contaminantes (microplásticos), son considerados como uno de los problemas ambientales más alarmantes y se espera que su magnitud aumente en las próximas décadas, los microplásticos representa una seria amenaza para la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas terrestres (Wright y Kelly, 2017; Álvarez y Chávez, 2022); alteran la microbiota (actividad microbiana y enzimática), reduce la materia orgánica que contiene y su capacidad para actuar como filtro, ocasionando un desequilibrio de sus nutrientes (FAO, 2018, Parr.3).

Según León (2021) “para implementar una agricultura sostenible y un manejo racional del medio ambiente, es necesario tener un mejor conocimiento de los suelos” (p.40). Según Castillo (2021) es importante la identificación de los contaminantes utilizando tecnología hiperespectral a partir de la reflectancia se puede obtener firmas espectrales (p.1). Las imágenes hiperespectrales es una técnica que combina la espectroscopia y las imágenes convencionales, las cual se pueden aplicar a diferentes campos, muestran una alternativa para el control del suelo contaminado (Flores y Loro, 2019).

La identificación de microplásticos en suelos agrícolas es una alternativa de control de estos contaminantes, las imágenes hiperespectrales se vienen aplicando recientemente en

investigaciones medioambientales de contaminación (Flores y Loro, 2019, p.68), además servirá como herramienta preventiva de control para su posterior enmienda y remediación.

Cajamarca es una región considerada agrícola y ganadera es por ello el enfoque en la gestión ambiental de este recurso, el presente estudio presenta una herramienta tecnológica capaz de identificar la presencia de microplásticos en el suelo, mediante esta tecnología hiperspectral encontraremos datos precisos, rápidos y no invasivos que permiten enfocarse en la gestión de estos residuos y mejorar la calidad del ambiente. El área donde se tomó las muestras de suelo corresponde a la zona de Huacaríz que se ubica a pocos kilómetros de la zona urbana, lugar donde aún se conserva espacios dedicados a la agricultura, se realizó en la época de lluvia durante el mes de noviembre (una sola fecha), para tener mayor facilidad de extracción, la humedad sería un factor irrelevante ya que la muestra sería secada en laboratorio, para la identificación de los microplásticos se utilizó una cámara hiperspectral RESONON donde no es necesario profundizar en las características específicas del suelo, el objetivo es caracterizar y clasificar los datos espectrales logrando identificar éstos contaminantes mediante la tecnología hiperspectral.

La contaminación en los suelos ha impulsado a generar herramientas tecnológicas efectivas, rápidas y con bajo costo que además no implique un pre tratamiento de las muestras (Xu et al., 2023), Es así que surge el sistema de imágenes hiperspectrales (HSI) que combina espectroscopia e imágenes convencionales para identificar, clasificar, comparar y diferenciar las distintas características y materiales de las muestras (Ai et al., 2022). La investigación identifica polímeros plásticos en muestras de suelo utilizando cámaras hiperspectrales, el análisis de datos de los píxeles de cada imagen permite identificar el tipo de polímero plástico y su concentración en el suelo (Xu et al., 2023). (Shan et al. 2019). La ventaja de utilizar este tipo de tecnología es que permite diferenciar los materiales mejor que con las imágenes convencionales y puede ser

usada en una gama de aplicaciones actuales y emergentes como teledetección, clasificación, control de calidad, investigación y desarrollo, entre otras.

Este trabajo se justifica porque se aplica en el ámbito de la investigación sobre factores ambientales que podrían tener efecto negativo en el suelo, se utiliza el sistema de imágenes hiperespectrales para identificar, clasificar y diferenciar las características del suelo con distintas concentraciones de microplásticos de dos polímeros distintos que pueden causar contaminación en suelos agrícolas y productivos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- Identificar microplásticos polímeros (PET y LDPE) mediante el uso de imágenes hiperespectrales en suelos agrícolas de la zona Huacaríz - Cajamarca 2024.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Reducir datos hiperespectrales irrelevantes mediante análisis multivariado.
- Clasificar y cuantificar distintas concentraciones de microplásticos (2%, 4%, 6%) de dos clases de polímeros (PET y LDPE) y su mezcla.
- Diferenciar concentraciones y tipo de polímeros mediante análisis estadísticos en muestras de suelo.

CAPITULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes De La Investigación

2.1.1 Antecedentes Internacionales.

Según Shan et. al., (2019) en su trabajo de investigación demuestran que el sistema de imágenes hiperespectrales (HSI) es una técnica eficaz para la identificación de microplásticos al combinarla con el algoritmo denominado máquina de soporte de sectores (SVM), logra la detección de una amplia gama de tipos de microplásticos y partículas (> 0.2 mm), aplican este modelo para verificar su viabilidad, logrando un resultado satisfactorio, demostrando que la combinación de este algoritmo con HSI tiene un efecto significativo para identificar cinco tipos de polímeros domésticos más comunes.

En su investigación Xu et al (2022) indican que las imágenes hiperespectrales identifican los microplásticos (MP) del suelo de forma rápida y no destructiva, y proporciona un método automatizado eficaz para la detección de polímeros, que sólo requiere una muestra rápida y sencilla de preparación, el rango de longitud de onda de HSI cae entre 387 nm y 1034 nm, indicando que fue factible utilizar HSI como un enfoque no destructivo y rápido para detectar MP en el suelo. Fiore et al., (2022) aplican una nueva técnica para detectar partículas plásticas en el suelo, utiliza el rango de longitud de onda de HSI entre 387 nm y 1034 nm, logrando definir y comparar la abundancia, las categorías y los parámetros morfológicos y morfométricos de los MP (< 5mm) siendo la clase más utilizada entre 1 y 2 mm, concluyendo que fue factible utilizar HSI como un enfoque no destructivo y rápido para detectar MP en el suelo. Marchesi et al., (2023) indican que el algoritmo de análisis de componentes principales (PCA) en HSI logra muy buena eficiencia a los espectros del infrarrojo cercano (NIR) de mezclas de polietileno (PE), polipropileno (PP) y

poliestireno (PS), ubicando todas las muestras dentro de un triángulo, lo que refleja el diagrama triangular de las composiciones iniciales.

Stroyuk et al., (2020) utiliza polímero Tereftalato de polietileno (PET) y poliamidas (PA) logrando identificar a través de algoritmos la identificación confiable, de manera no invasiva y no destructiva, estos materiales poliméricos típicos, así como el encapsulante de etileno acetato de vinilo (EVA), revelan características espectrales en el sistema de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRA) características y bien resueltas que no se superponen.

Vidal y Pasquini (2021) logran la identificación de cinco polímeros; poliamidas (PA-6), PE, polipropileno (PP), PET y PS a través de un modelo de HSI en el rango de tamaño de 150-300 μm , incluidas partículas incoloras, directamente en la matriz de sedimentos, en muestra de arena, indican que la amplia ocurrencia de contaminación por microplásticos exige tecnologías para determinar de manera rápida y precisa la identidad de los polímeros que presentan variabilidad espectral debido a la composición físico-química y la exposición a la intemperie, esto facilita enormemente la identificación confiable de materiales y componentes.

En su estudio de investigación sobre tecnología HSI Xu et al., (2023) combinan los modelos de aprendizaje automático, como SVM, para lograr resultados de clasificación efectivos en la detección de MP en suelos contaminados de tierras agrícolas, el SVM puede realizar el análisis de los resultados de detección para concentraciones bajas de microplásticos, los resultados mostraron que las tasas de precisión de clasificación de SVM alcanzó el 95,00%.

Según la opinión de Chen et al. (2024) en su trabajo de investigación considera al suelo como reservorio para aplicación de nuevas tecnologías, desarrollan un método rápido y eficiente en la identificación de suelos con PE y PA (tamaño promedio de 50 y 300 μm , respectivamente) a

través de sistemas HSI (400–1000) nm. Los espectros normalizados en el suelo revelaron diferencias espectrales significativas no sólo entre controlar el suelo y los microplásticos puros (es decir, PE 100 % y PA 100 %), pero también entre cinco mezclas de suelo y MP (PE 1,6 %, PE 1,6 % PA 6,9%, PA 5,0% y PA 11,3%). Ai et al (2022) la acumulación de microplásticos en el suelo puede afectar negativamente su biota, en su estudio utilizan imágenes hiperespectrales, donde analizan un total de 600 datos de 180 conjuntos de muestras de suelo en el rango de longitud de onda de 369 a 988 nm, concluyendo que mediante las imágenes hiperespectrales se logra la clasificación de tres polímeros, incluidos PE, PP y cloruro de polivinilo (PVC) en suelos, utilizando el algoritmo de máquina de vectores de soporte (SVM) y otros modelos.

Casso et al. (2022) las concentraciones de los microplásticos pueden llegar a ser un contaminante, puede afectar las propiedades del suelo con concentraciones de 0.5 % y 10% de MP por Kg de suelo. (p.60); al agregar polietileno de baja densidad (LDPE) en suelo, se encontró que afectó la composición y abundancia de microartrópodos y nematodos, además de la disminución significativa en la abundancia de ácaros oribátidos ($-15,3 \pm 5,7\%$), larvas de dípteros ($-30,5 \pm 9,3\%$), larvas de lepidópteros ($-41,5 \pm 12,2\%$) e himenópteros (hormigas; $-62,5 \pm 7,5\%$;) en comparación con las parcelas de control.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Mora, (2022) en su investigación sobre evaluación de métodos para la identificación y cuantificación de los impactos ambientales generados por los microplásticos utilizando tecnologías espectroscópicas en muestras de suelo, dan como resultados 61% de sensibilidad y 96% de especificidad, con una eficiencia del 78,5% para el modelo Convolutional Neural Network (CNN), se observa que los impactos ambientales generados al suelo son altas afectando a la rizosfera, estos resultados demuestran que la contaminación por microplásticos mediante el uso de tecnología

logra proporcionar datos importantes para futuros estudios sobre la eliminación de la contaminación por microplásticos del suelo. (p.31)

Huanaco (2019) en su investigación logra determinar la presencia de microplásticos en los sedimentos laterales en la cuenca baja del río Rímac, utiliza un tipo de metodología para el análisis e identificación de microplásticos, este consistió en la oxidación de materia orgánica y su posterior separación por densidad e identificación, los microplásticos identificados serían el poliestireno, polipropileno y polietileno tereftalato, identificando 538,9 MPs/m² en noviembre de 2017, y 16 566,7 MPs/m² en agosto de 2018 en las siete estaciones de monitoreo (p.90).

2.1.3. Antecedentes Regionales – Locales

Manrique (2019) en su tesis indica que los microplásticos fueron identificados en sedimentos fluviales, toma como unidad de estudio la cuenca baja hasta la desembocadura del río Jequetepeque, utilizó la metodología de extracción de microplásticos más adecuada, caracterizando los microplásticos aislados a base de HDPE, PS y PP de tamaño 180–500 µm, además de analizar la distribución espacial de estos contaminantes. La identificación de los microplásticos fue usando espectroscopia Raman, resultando ser óptimo (> 90 %). y clasificados en función de su forma, color y tipo de polímero, se encontraron 18 ítems, entre fragmentos y películas, compuestos en gran mayor por polietileno y polipropileno.

Todas estas investigaciones presentadas como antecedentes servirán para desarrollar el trabajo en la investigación sobre identificación de microplásticos en suelos agrícolas utilizando imágenes hiperespectrales.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Residuo Sólido

Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA define a los residuos sólidos como “materiales desechados que carecen de valor económico para la mayoría de las personas y se les conoce coloquialmente como basura” (INEI, 2018, p.15).

Los Residuos Sólidos, según la Ley General de Residuos Sólidos 27314-2000 establecen que “los residuos sólidos son aquellas sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido de los que su generador dispone, o está obligado a disponer, en virtud de lo establecido en la normatividad nacional.

Los residuos sólidos se componen principalmente de desechos procedentes de materiales utilizados en la creación, transformación o utilización de bienes para el consumo, éstos en su mayoría no son reaprovechables o susceptibles transformarse con un correcto reciclado, en la actualidad existe poca conciencia del reciclaje, debido a la percepción actual de contaminación esto está cambiando poco a poco, y problemas como el cambio climático, son ahora una amenaza latente establecida a corto plazo (INECC, 2020). La Organización de las Naciones Unidas en su informe sobre Perspectiva mundial de la Gestión de Residuos 2024, “prevé que la generación de residuos sólidos urbanos aumente de 2.300 millones de toneladas en 2023 a 3.800 millones de toneladas en 2050”.

Según el Ministerio del ambiente (MINAM, 2021), en el Perú se genera un promedio de 21 mil toneladas de residuos municipales al día, producidas por los 30 millones de habitantes, esto equivale a 0.8 kilogramos de generación de residuos sólidos por persona al día, además este Ministerio informa que el 1 % de los residuos municipales que se generan en el país se están

recuperando, pero, según estudios técnicos realizados indica que existe una gran estadística que estos residuos pueden ser reciclados.

2.2.2. El Plástico Como Residuo Sólido

Rivas et al. (2023), considera al plástico como un producto que puede ser modelado por efecto del calor y la presión, son productos orgánicos a base de carbón, compuestos por moléculas de cadenas cortas o largas llamados polímeros; éstos polímeros son considerados como materiales sintéticos obtenidos mediante reacciones de polimerización. Flores (2020) indica que “los residuos plásticos generados durante las actividades domésticas e industriales representan un grave problema ambiental, tienen una gran resistencia a los cambios en el tiempo, son de difícil degradación y se acumulan en los sistemas orgánicos”. (p.6)

Los plásticos hoy en día es el material más fabricado por el hombre y actualmente debido a su composición y efecto sobre el medio ambiente, están bajo la mira de muchos expertos. Sin embargo, a nivel global no se encuentra información sólida, sobre todo en su disposición final, en estudios realizados se calcula que 8.300 millones de plásticos vírgenes se han producido hasta la fecha. En el 2015, aproximadamente 6.300 toneladas de residuos plásticos se había generado, de éstos alrededor del 9% se había reciclado, el 12% se había incinerado y el 79% se había acumulado en vertederos o en el medio natural, si continua las tendencias actuales de producción y gestión de residuos, aproximadamente 12.000 toneladas de los residuos plásticos terminarán y se depositarán en vertederos o en el medio ambiente natural para el 2050 (Geyer et al. 2024).

2.2.3. Plásticos en el Perú

Según Defensores del Ambiente y Territorio (2024) en reunión del Comité Intergubernamental de Negociación (INC), de acuerdo con los datos del Gobierno,

aproximadamente, cada ciudadano utiliza 30 kilos de plástico de manera anual (entre bolsas, sorbetes, botellas, etc.), es así que, las bolsas de plástico se han convertido en el producto más empleado, ya que cada año se usan más de 3 mil millones de ellas (parr.7).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) informa que el Perú inició el Programa País, con el objeto de ser miembro de esta reconocida institución, es importante señalar que esta Organización logró elaborar normas sobre la Gestión Integral del plástico, aquí se plantea metas que el Perú se comprometió cumplir hasta el año 2030 (OCDE, 2022).

La tendencia y e interés de la ciudadanía e industria plástica peruana generan un contexto favorable para aplicar iniciativas relacionadas al consumo y producción sostenible del plástico, considerando atención primordial en el reciclaje de tereftalato de polietileno (PET) ya que la Ley N° 30884 en su artículo 10 señala la obligación del uso de material reciclado postconsumo en botellas de PET, en al menos 15% de su composición.

2.2.4. Clasificación De Polímeros Plásticos

Los materiales plásticos no están compuestos de un único material, es así que gran mayoría se obtienen a partir de la destilación del petróleo, la gran variedad está compuesta de materiales cuyas formas han sido realizadas para obtener determinadas propiedades y en función de ellos han sido modificados, logrando así establecer dos grandes grupos entre los que tenemos a los termoplásticos y los termoestables. (Álvarez, 1984, como se citó en Peinado, 2023). Según Peinado (2023) en su investigación indica que:

Los termoplásticos se funden cuando se calientan y se endurecen cuando se enfrían, por ello, es posible utilizarlos como un material reversible, podemos recalentarlos y darles forma y enfriarlos repetidamente, son los más utilizados y entre ellos están el PET, PP, PE, PVC o PS.

Los termoestables sin embargo no tienen esta propiedad reversible y cuando se calientan sufren una transformación química creando una red tridimensional que ya no será posible volver atrás y entre los más utilizados están PUR, Resinas Epoxi, Poliéster (p.5). Según Roca (2023) el polietileno se obtiene por polimerización del etileno, su estructura está formada por dos átomos de carbono y 4 átomos de hidrógeno unidos todos por enlaces de tipo covalente (CH₂-CH₂-), de acuerdo a la (Tabla1).

Tabla 1*Clasificación de termoplásticos*

Nombre	Siglas	Usos	Características	Código
<i>Polietileno Tereftalato</i>	PET	Es uno de los plásticos más fácilmente reciclables.	Ligero, rígido o semi-rígido, transparente o de color natural, resistente al impacto.	
<i>Polietileno</i>	HDPE (polietileno de alta densidad)	El polietileno es el material plástico más común. Se utiliza para fabricar botellas, tanques, depósitos y recipientes para el transporte.	Transparente o blanco, tiene excelentes propiedades de aislamiento, y es muy fuerte, versátil y barato.	
<i>Polietileno</i>	LDPE (polietileno de baja densidad)	Se utiliza para envases, bolsas, sacos, recubrimientos de cables, contenedores, tuberías y juguetes.	Translúcido o transparente. Apto para contacto con alimentos, es el plástico más ligero y más sensible al calor.	
<i>cloruro de polivinilo</i>	PVC	Se utiliza en la industria del papel y de embalaje, contenedores de comida, tarjetas de crédito, muebles, ropa y juguetes.	Es un plástico muy versátil, resistente al desgaste, agentes químicos y atmosféricos y el fuego.	
<i>polipropileno</i>	PP	Se utiliza para fabricar fibras textiles, acoplamientos, contenedores para el transporte, muebles, alfombras, cuerdas y envases de alimentos.	Transparente, ligero y resistente, este material puede ser utilizado tanto para plástico como fibra. Fácil de colorar, no absorbe el agua.	
<i>Poliestireno</i>	PS	Comúnmente usado para reemplazar el vidrio, aluminio y madera. Puede ser utilizado en materiales de embalaje, recipientes, cajas, lámparas, objetos desechables, vasos y juguetes.	Es transparente, duro e inflamable, muy brillante e inerte frente a muchos agentes corrosivos. Se puede administrar colores brillantes u opacos.	

Nota. Ésta clasificación logra entender mejor las características y usos del material plástico que se utilizará en el presente estudio.

Según el informe presentado por Verástegui (2020) en el Perú existe “una demanda en el uso de plástico tipo PET, alrededor de 50 mil toneladas al año, casi la mitad en comparación otros países de la región como Brasil o Argentina”, se indica además que Perú está en el promedio positivo en la demanda de este tipo de plásticos.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2019) indica que “cada minuto se compra un millón de botellas de plástico y, al año, se usan 500.000 millones de bolsas, casi una tercera parte de todos los envases de plástico salen de los sistemas de alcantarillado”. En el Perú las bolsas plásticas de polietileno de baja densidad (LDPE) son el material más utilizado logrando el 31% de la producción total de plásticos, siendo éste considerado como un material de empaque dominante por todas las ventajas que presenta, además es el material plástico que ha recibido muchas críticas al ser el más generado y además de ser un compuesto cuya capacidad de degradarse es lenta frente a condiciones ambientales (Males, 2013, como se citó en Pérez, 2019). Si bien en un principio los plásticos parecían la promesa de una ilusión a futuro, hoy se han convertido en una grave preocupación por los significativos problemas ambientales que están ocasionando.

2.2.5. *Polímeros*

Según Hermida (2021) en su investigación identifica a los polímeros como moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, estos están formados por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos; estas moléculas orgánicas son las que constituyen los materiales plásticos que conocemos y también los tejidos de los seres vivos como piel, músculos, seda, etc. (p. 14)

2.2.6. Polímero PET (Polietileno Tereftalato)

López (2023) indica que “el polietileno Tereftalato pertenece al grupo de los poliésteres saturados, tiene estructura lineal que le confiere un comportamiento mecánico propio de los plásticos termoplásticos” (p. 25), señala que se obtiene a través de un proceso de síntesis de polimerización por condensación en fundido, éste proceso se realiza mediante la reacción de ácido tereftálico con etilenglicol (esterificación) y también es posible la obtención de este polímero por reacción de dimetiltereftalato con etilenglicol (transesterificación) (p.26).

El PET es un plástico que se puede reciclar que se utiliza en todo el mundo, principalmente en los Estados Unidos y Europa, y se utiliza para fabricar botellas y envases. A pesar de ser un plástico reciclable su fabricación involucra sustancias tóxicas, metales pesado, químicos, irritantes y pigmentos, los cuales al final del proceso de producción permanecen en el aire, lo cual es sumamente perjudicial. (Bejarano, 2007, como se citó en Alcívar, 2020, p. 17)

Según Zurita (2019) en el Perú, la economía lineal usada convencionalmente implica la extracción de los productos, su producción y el deshecho que es el residuo sólido, hoy se busca reemplazar con una economía circular en la que estos residuos se recogen en su disposición final, este proceso involucra al sector bebidas embotelladas en PET.

Indica Díaz et al. (2020) en su investigación indica que “se estimó una producción nacional de envases rígidos de PET de 237.5 mil toneladas, donde el 0.4% serían envases retornables, el 10.2% residuos reciclados, el 50.7% importaciones y el 38.7% corresponderían a los que ingresan conteniendo productos importados y al stock de períodos anteriores” (p.30).

2.2.7. Polímero LDPE (Polietileno De Baja Densidad)

El polietileno (PE) es químicamente “el polímero más simple, es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación, lo que genera una producción de aproximadamente 80 millones de toneladas anuales alrededor del mundo” (Gastelo, 2018, p.4). El origen de este polímero se da en tres tipos, así tenemos el Polietileno de baja densidad (LDPE) cuya densidad es 0.910-0.925 g/cm³, Polietileno de media densidad (MDPE) cuya densidad es 0.926-0.940 g/cm³, y el Polietileno de alta densidad (HDPE) con una densidad de 0.9411-0.965 g/cm³ (Gastelo, 2018).

La biodegradación del polietileno de baja densidad (LDPE) abarca propiedades como la cohesión, dominio y la transformación del polímero a monómeros que pueden ser usados como sustrato en reacciones enzimáticas, para luego, debido el gran tamaño de estas moléculas que inhibe su paso por las membranas celulares es necesario que este sea depolimerizado y transformados a monómeros (etileno) y dímeros (butano) (Arutchelvi et al., 2008, Nanda & Sahu 2010, citado por Moreno, 2018).

Según Bustos (2021) en su resumen de investigación indica que el uso los residuos plásticos han venido desarrollándose a lo largo de los años debido a la alta demanda y facilidad de obtención del empaque plástico además por razones de seguridad e higiene para que finalmente solo sean desechados, existen nuevas alternativas viables de gestión para este tipo de residuos la cual comprende el desarrollo de una economía circular; ésta propuesta de alternativa tiene como función recuperar un mínimo porcentaje de 10% de polietileno de baja densidad (LDPE), y además genera materia prima para la creación de nuevos productos, donde se estaría contribuyendo al gran problema ecológico que produce la cantidad de residuos plásticos no biodegradables que son desechados a diario en la naturaleza.

2.2.8. Microplásticos

La palabra Microplásticos (MP) fue establecido por Thompson en el año 2004, en su investigación, “lo define como fragmento plástico de un tamaño promedio de 5 mm” (Casso et al., 2022, p. 55).

Los microplásticos (MPs) considerados dentro de la categoría de contaminantes emergentes recientemente investigados, se plasma debido a sus interacciones y persistencia en el medioambiente, esto debido a la deficiente gestión en el tratamiento de los residuos de zonas urbanas, malas prácticas industriales y su uso indiscriminado, estos contaminantes vienen siendo difundidos por todo el planeta, desde los océanos hasta los ríos, sedimentos, suelo, aire, organismos vivos e incluso en los recursos alimenticios y lugares muy lejanos del planeta como en el caso del ártico y glaciares montañosos (Castañeta et al., 2020).

Los microplásticos actualmente son un tema de suma importancia y trascendencia global, hoy en día existe una importancia en su estudio y monitoreo en el medio ambiente, particularmente sobre la presencia de estos en ecosistemas acuáticos, sedimentos y diferentes organismos; además se han comenzado investigaciones sobre las implicancias de éstos en la cadena alimenticia (Bollaín y Agulló, 2018).

Actualmente la contaminación del suelo por microplásticos es considerada como emergente, debido a resultados de estudios que determinan que este contaminante se está concentrado de manera insólito en los suelos, se trabajado en metodologías e investigaciones científicas que permitan la cuantificación e identificación de estos materiales sintéticos. “Las técnicas usadas actualmente son básicas como la identificación visual, técnicas de microscopía ópticas y modelos predictivos de contaminación, deberían considerar el tipo de suelo a muestrear,

el contacto con derivados plásticos, el correcto transporte de muestras y selección de aditivos según el polímero a identificar” (Casso et al, 2022, p. 59).

Según las investigaciones mencionadas anteriormente los polímeros plásticos son diversos, pero los más usados comúnmente en nuestro medio viene a ser el Tereftalato polietileno (PET) y el LDPE (polietileno de baja densidad) por su uso cotidiano, su facilidad de empaque, su costo y la deficiente gestión en su disposición final existente que lamentablemente depositan estos residuos en el ambiente que finalmente alteran la calidad del mismo.

2.2.9. *El Suelo: Depósito De Microplásticos*

Existen muchos estudios e investigaciones donde inciden que el suelo está siendo considerado como depósito de contaminantes, pues en él recaen los efectos de las distintas actividades antropogénicas y la explotación de este recurso como la agricultura, con el uso de fertilizantes y productos químicos, residuos sólidos, aguas residuales, manejo inadecuado de técnicas de cultivo, entre otras. Según Meenambigai et al. (2016) el suelo es considerado como el alma de la vida, éste está siendo contaminado por residuos orgánicos e inorgánicos debido a la urbanización e industrialización aceleradas. Los científicos estiman que la contaminación del suelo por microplásticos es entre 4 y 23 veces mayor que la contaminación oceánica, todo depende del sitio de comparación del estudio, además se estima que un tercio de todos los residuos plásticos termina en suelos o agua dulce (ONU. 2021).

Casso et al. (2022) en la conclusión de su investigación indica que:

El estudio de los MP en la matriz del suelo es un nuevo tema de investigación que aún pasa por su etapa teórica experimental, los países desarrollados o en vías de desarrollo son aquellos que están investigando, la falta de datos sobre el tema en cuestión hace pasar

desapercibida esta afectación que ante los escenarios más pesimistas podría afectar de manera discreta a la micro y macro diversidad del suelo, actualmente se trabaja en metodologías que permitan llevar a cabo la cuantificación e identificación de los materiales sintéticos, las técnicas abordadas hasta la fecha son básicas como identificación visual, técnicas de microscopía ópticas y modelos predictivos de contaminación, estos además deberían contemplar tipo de suelo a muestrear, prevenir el contacto con derivados plásticos, correcto transporte de muestras y selección de aditivos según el polímero a identificar. (p.59)

2.2.10. Imágenes Hiperespectrales

Paoletti et al. (2019) en su estudio de investigación sobre el uso de imágenes hiperespectrales indican que:

Las imágenes hiperespectrales constituyen el núcleo de varios programas de observación remota de la Tierra, la información que contienen está formada por cientos de canales espectrales estrechos y casi continuos, resulta de gran utilidad en aplicaciones en las que la caracterización de los materiales observados en la superficie terrestre resulta de gran relevancia, algunas de estas aplicaciones son la agricultura de precisión, la planificación en de espacios urbanos, o la prevención y seguimiento de desastres naturales, sin embargo, la gran dimensión de las imágenes hiperespectrales supone un reto en su tratamiento, almacenamiento y procesamiento, debido a la gran variabilidad espectral y la correlación existente en los datos (p. 129).

Debido a la gran cantidad de datos procesados, se necesita procedimientos y técnicas para minimizar dicha información utilizando nuevos software y algoritmos que transformen en datos

que sean más fáciles y rápidos de procesar. Las imágenes han demostrado ser útiles en una amplia gama de estudios recientes, sin embargo, la mejora de la resolución espectral supone un aumento en la complejidad del procesamiento de datos debido al incremento del número de bandas, lo que dificulta manejar tanta información en tiempo real (Navarro et al. 2024).

León (2021) en su artículo indica que “para implementar una agricultura sostenible y un manejo racional del medio ambiente, es necesario tener un mejor conocimiento de los suelos, de los cultivos, de los bosques, del agua y de otros recursos relacionados, esto implica utilizar tecnologías de última generación, como las imágenes hiperespectrales (HSI)”, ésta tecnología por su fina resolución espectral que contiene miles de bandas estrechas y contiguas del espectro electromagnético va a mostrar soluciones resultados prácticos para entender, formar y mapear, con mayor precisión, las principales características de los recursos terrestres, además, para monitorear sus dinámicas en el tiempo y en el espacio. (p. 40)

Schmid et al. (2016) indican que para lograr la determinación de las propiedades en la composición del suelo es esencial la aplicación de las imágenes hiperespectrales, este estudio integra estos datos hiperespectrales apoyados por información en su forma y aspectos fisicoquímicos del suelo logrando identificar y mapear las propiedades del suelo que pueden usarse para evaluar la erosión y acumulación del suelo. (p. 845)

Según Castillo (2021) el uso de imágenes hiperespectrales es una “importante herramienta tecnológica actual, la cual se aplica en estudio de suelos y permitiendo la elaboración de mapas litológicos y una biblioteca espectral, los resultados obtenidos permiten demostrar que a partir de la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes hiperespectrales, es posible identificar y clasificar suelos procedentes de diferentes regiones” (p.105).

Este proyecto tiene por objetivo identificar microplásticos polímeros, polietileno Tereftalato (PET) y Polietileno de Baja Densidad (LDPE) en suelos agrícolas empleando imágenes hiperespectrales. Según Delgado (2019) “las cámaras o sensores hiperespectrales son una tecnología emergente, estas imágenes obtenidas por estos sensores contienen información espectral de cada píxel en múltiples bandas, del rango visible e infrarrojo, permiten la detección y clasificación de objetos del espectro visible” (p. 49) .Con toda la información de las investigaciones citadas anteriormente podemos indicar que el uso de la tecnología hiperespectral logra identificar distintos contaminantes que pueden alterar la calidad del suelo; en este caso podremos identificar la presencia de microplásticos polímeros (PET y LDPE) en los suelos. El suelo es el hábitat de muchos organismos y microorganismos, los cuales se ven afectados; según Cifuentes (2018) en su investigación sobre el análisis de la exposición de microplásticos en *Lumbricus Terrestris*, “las lombrices de tierra al desplazarse perdieron la mucosidad superficial, provocándoles quemaduras y lesiones en su cuerpo” (p.21).

García (2022) en su reciente reportaje asevera que en recientes investigaciones los microplásticos podrían dañar la calidad del suelo afectando la producción de cultivos, ocasionando daños significativos, que representaría una amenaza para la seguridad alimentaria internacional a largo plazo, es por ello la gran importancia de esta investigación la cual servirá como antecedente de investigación de microplásticos en el suelo gracias a la tecnología hiperespectral que identificará de manera precisa y rápida a estos contaminantes convirtiéndose en una herramienta importante en este tipo de identificación de contaminantes.

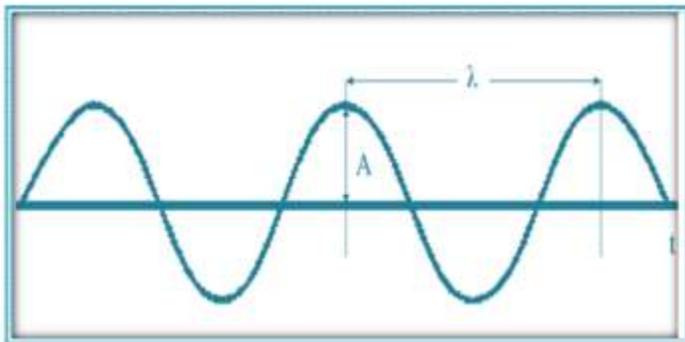
2.2.11. Espectro Electromagnético y Longitud De Onda

El espectro electromagnético es la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas (Ordoñez, 1992, citado por Castro, 2019), viene a ser el rango completo de todas

las radiaciones electromagnéticas ((National Aeronautics and Space Administration, 2011, Herrera et al., 2018), “La longitud de onda viene a ser la distancia que existe de un pulso a otro” (Avendaño et al. 2013 p.25) (Figura 1). Estas ondas se propagan simultáneamente por los campos eléctricos y magnéticos producidos por una carga eléctrica en movimiento, campos que son mutuamente perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas (Herrera et al., 2018).

Figura 1

Representación de una onda electromagnética

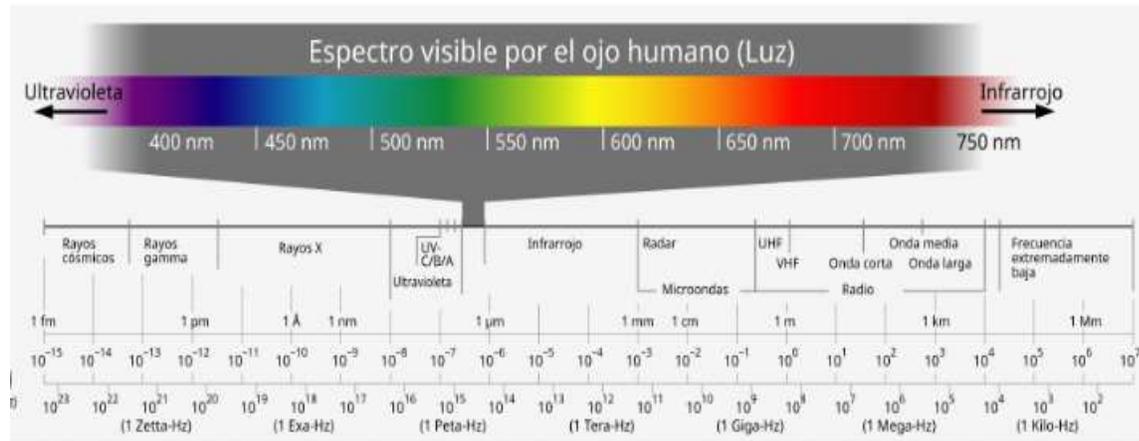


Nota. Se observa la frecuencia, la intensidad de radiación y la longitud de onda, que se extiende desde la menor longitud de onda hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud como son las ondas de radio.

Las imágenes hiperespectrales los definimos como un objeto, con lo cual podemos definir al espectro electromagnético como la radiación electromagnética que absorbe o emite las ondas que inciden sobre un objeto” (Boardman et al., 1995, citado por Villalobos, 2017, p. 32) (Figura 2).

Figura 2

Representación de un espectro electromagnético



Nota. El gráfico representa el rango completo de todas las ondas electromagnéticas, ordenadas según su longitud de onda o frecuencia.

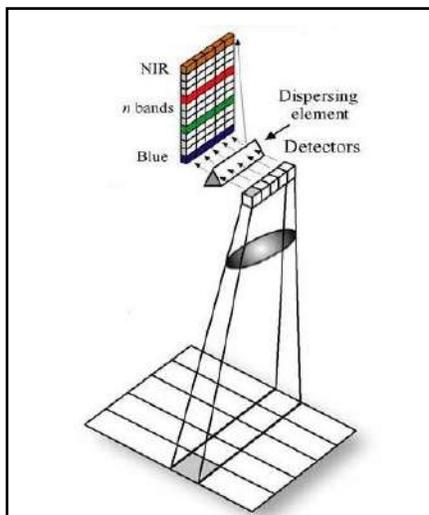
2.2.12. Sensores Lineales O De Empuje (Pushbroom Scanner)

Algunos escáneres eléctricos utilizan la técnica pushbroom donde utilizan una línea de detectores para escanear sobre una escena bidimensional, el movimiento de la acción o el satélite provee el escaneo a lo largo de la dirección, es así que, el inverso de la línea de frecuencia es igual al tiempo de permanencia del pixel, “usando un detector bidimensional, una dimensión puede representar el ancho de franja (dimensión espacial, ‘Y’) y la otra el rango espectral” (Van der Meer et al., 2002 citado Chávez 2018, p.18). “Son sensores lineales de estado sólido que están alineados entre ellos y de forma perpendicular a la trayectoria o recorrido del dispositivo” (Villalobos, 2017, p.37).

Al realizar el enfoque de imágenes hiperespectrales el sensor realiza un proceso continuo en la superficie a explorar, dando como resultado una imagen de perspectiva lineal logrando de esta manera una geometría cilindro- cónica donde cada línea de la imagen resultante necesita sus propios parámetros de orientación externa, tiene la sensibilidad espectral electromagnética visible hasta el infrarrojo cercano (Villalobos, 2017) (Figura 3).

Figura 3

Representación de un sensor Lineal o de empuje



Nota. El grafico representa un sensor realizando un proceso continuo sobre la superficie a explorar, obteniendo como resultado una imagen de perspectiva lineal.

2.2.13. Modelos De Clasificación HSI

a) *Máquina De Soporte De Vectores (SVM).*

La Máquina de vectores de soporte (SVM) son un conjunto de métodos de aprendizaje supervisado que se utilizan para la clasificación, regresión y detección de valores atípicos. Shan et al., (2019) en su investigación aplica este modelo para verificar su viabilidad, logrando un resultado satisfactorio, demostrando que la combinación de este algoritmo con HSI tiene un efecto

significativo para identificar cinco tipos de polímeros domésticos más comunes. Se obtuvo resultados comparables a los de los modelos que utilizan espectros completos utilizando modelos SVC como imágenes hiperespectrales, que utilizaron longitudes de onda importantes identificadas en condiciones variables, indispensables en futuros estudios de identificación del origen geográfico y clasificación de especies (Wang et al., 2024).

b) Componentes Principales (PCA).

El análisis de componentes principales (PCA) es uno de los algoritmos de aprendizaje automático más utilizado en muchas aplicaciones como en análisis de datos exploratorios, reducción de dimensionalidad, compresión de información, eliminación de ruido de datos y mucho más. En recientes investigaciones se utiliza para analizar datos en sistemas de imagen hiperespectral, pues estos datos obtenidos son muy extensos, además la complejidad del tiempo aumenta. Por esto resulta crucial disminuir la cantidad de datos o seleccionar sólo las bandas relevantes, es así que se utiliza el PCA para a través de él se logre seleccionar las bandas relevantes es decir pre procesar los datos hiperespectrales aplicando este análisis.

Marchesi et al., (2023) indican que el modelo de componentes principales (PCA) en HSI logra cuantificar mezclas de microplásticos reales (PE, PP, PS); además de lograr identificarlos según su variabilidad (tamaño, forma y ocurrencia). Hasan et al., (2021) indican que el enfoque más utilizado para la reducción de la dimensionalidad es el PCA. El PCA se puede utilizar de manera efectiva para extraer y decodificar automáticamente la información clave de la matriz del espectro para la obtención de imágenes (Cheng et al., 2022). Meng et al., (2024) identifican partículas de microplásticos puros y mixtos mediante PCA, concluyendo que dos primeros componentes principales de los microplásticos mixtos fueron linealmente dependiente.

CAPITULO III

PLANTEAMIENTO DE LAS HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis De La Investigación

Ho: No se logra identificar los microplásticos de los polímeros Polietileno Tereftalato (PET) y polietileno de baja densidad (LDPE) en muestras de suelo agrícola mediante el uso de imágenes hiperespectrales.

Ha: Las imágenes hiperespectrales logran identificar microplásticos de los polímeros Polietileno Tereftalato (PET) y polietileno de baja densidad (LDPE) en muestras de suelo agrícola.

CAPITULO IV

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Ubicación del Área de Estudio

4.1.1. Ubicación Geográfica

Desde una perspectiva geográfica, la zona de estudio donde se recolectaron las muestras de suelo, se localiza al norte del Perú y en la dirección suroeste de la ciudad de Cajamarca, la cual forma parte de la zona 17S. Limita por el norte con la ciudad de Cajamarca, por el sur con el caserío La Victoria, por el oeste con el centro poblado La Paccha y por este con el caserío Huayrapongo, este caserío se encuentra dentro del valle interandino y se caracteriza por encontrarse atravesado por una inmensa llanura inundable que vienen a ser el lecho de los ríos Mashcón y Chonta (INEI, 2017).

Las coordenadas UTM-WGS84 de los puntos de referencia se detallan en (Tabla 2) presentada a continuación:

Tabla 2

Coordenadas UTM-WGS84 de los vértices de la zona de investigación

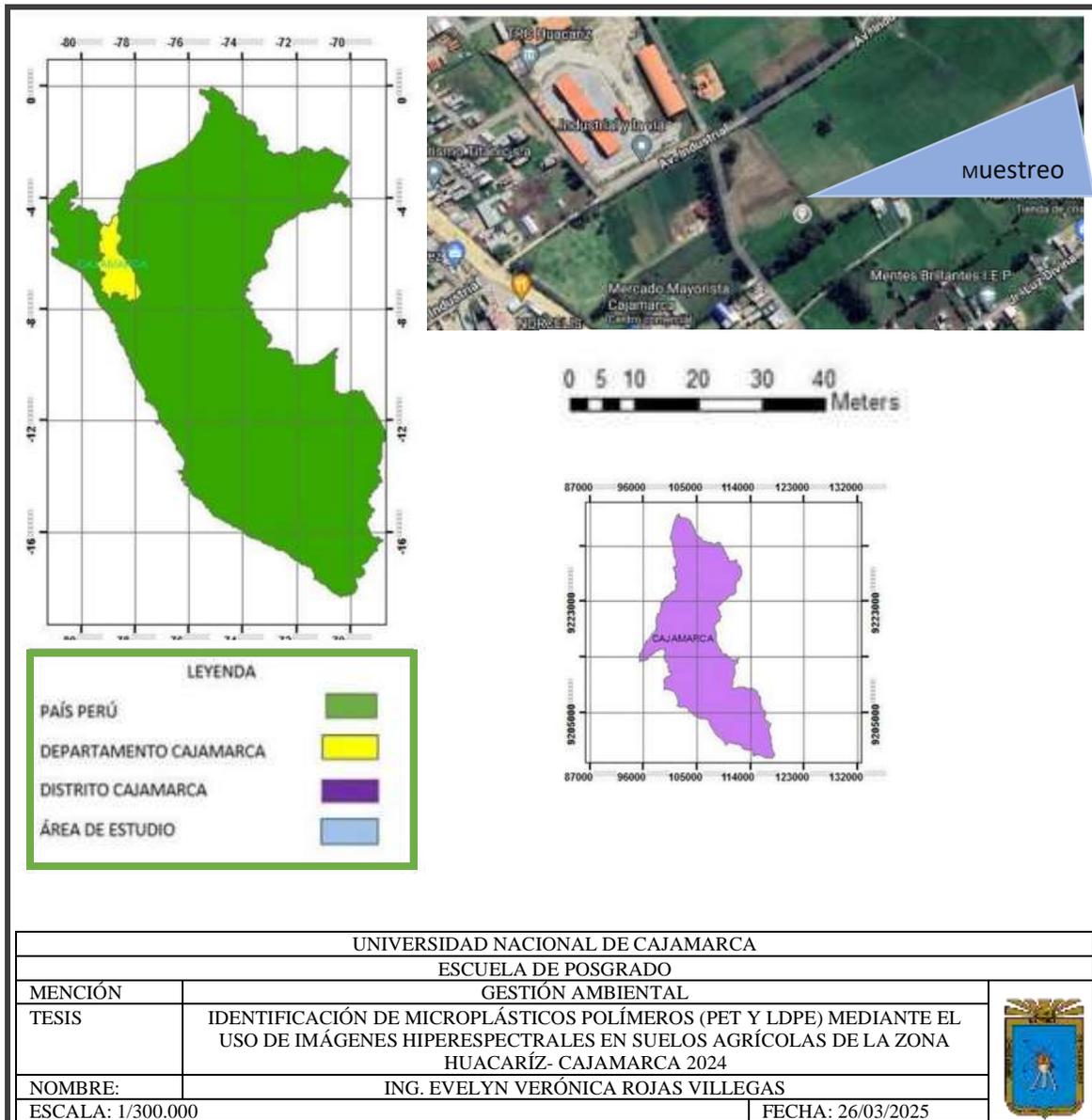
VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	778,023.520	9 206,205.543
2	778,206.760	9 205,994.764
3	778,139.463	9 205,951.510
4	778,473.594	9 205,565.346

Nota. Coordenadas del punto de muestreo ubicado en la zona de Huacaríz- Cajamarca

El lugar donde se realizará el muestreo de suelo para nuestra investigación es una zona que conserva aún áreas verdes dedicadas mayormente al cultivo de alfalfa y hortalizas de tallo bajo, las cuales son cultivadas utilizando agua proveniente de canales de regadío. A continuación, se presenta la figura 4, la ubicación exacta del punto de muestreo (Figura 4).

Figura 4

Ubicación de la zona de muestreo caserío de Huacaríz



Nota. Ubicación del estudio en la zona Huacaríz ubicada dentro del Departamento de Cajamarca.

4.1.2. Accesibilidad

El acceso a la zona se efectúa por vía terrestre, partiendo desde la Ciudad de Cajamarca y avanzando 3.8 kilómetro de la carretera asfaltada, que conduce al Distrito de Jesús, Llacanora y Namora. Estos detalles se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Rutas de acceso Cajamarca – Huacaríz

Tramo	Tipo de Vía	Longitud	Tiempo (min)
Cajamarca-Huacaríz	Asfaltada	3.8 Km	13

Nota. Se detalla las rutas de acceso por vía terrestre al lugar donde se realizó el muestreo de suelo.

4.1.3. Clima

El clima de la zona de muestreo es templado, seco y soleado en el día y frío en la noche. Las precipitaciones son de diciembre a marzo y se presentan con el fenómeno del Niño en forma cíclica, su temperatura media anual es de 15,8 °C. Por la cercanía al Ecuador y por ser una ciudad ubicada en piso térmico bajo, tiene un invierno suave y un verano (Chuquilín, 2022, p. 25).

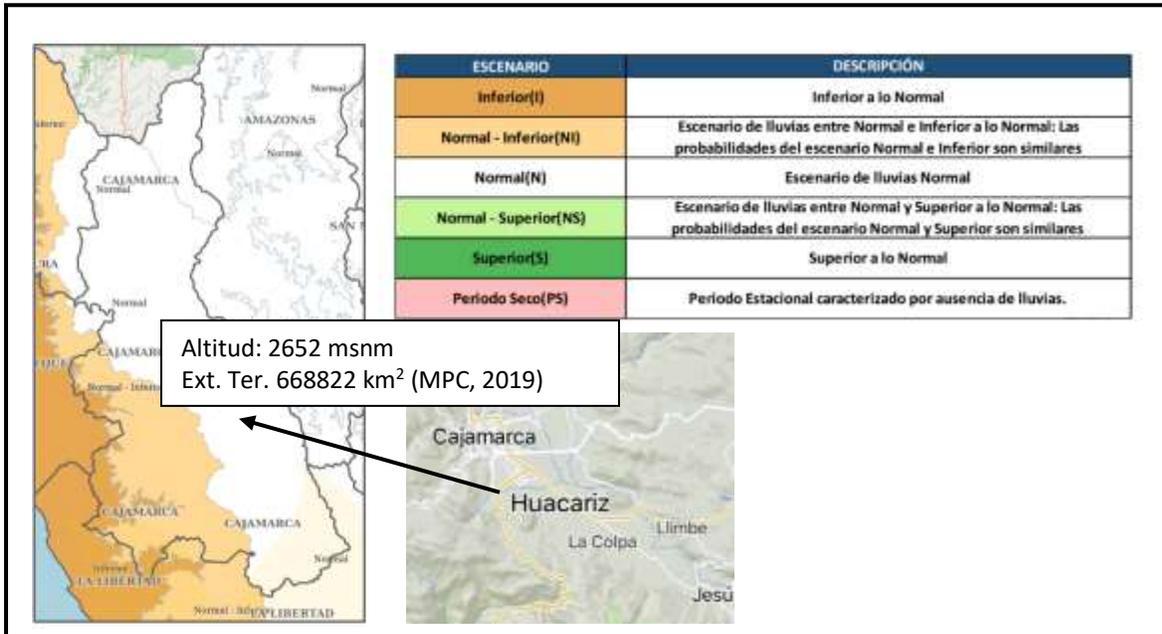
Las muestras para la investigación fueron tomadas durante el mes de noviembre del 2024 donde las precipitaciones durante el trimestre (octubre, noviembre y diciembre) se presentó en condiciones Normales (Figura 5) (SENAMHI, 2024), esto facilitó el muestreo respectivo.

La zona Huacaríz pertenece a la campiña de Cajamarca , está cubierto por un mosaico de cultivos, y pasturas; los cultivos agrícolas por razones de parcelación de la propiedad (tenencia de tierras), de perdida de la capacidad productiva de los suelos (urbanización) y sobre todo debido a la variabilidad de estos, así como a la falta de agua de riego en su gran extensión, no se encuentran

solos, si no asociado a pastos y a vegetación arbustiva, con cultivos propios del lugar como maíz, papá y pastos cultivados; tierras de práctica agrícola en la que los cultivos dependen del agua de lluvia en su mayoría y en menor extensión riego artificial mediante canales de regadío (GRC, 2011) (Figura 6).

Figura 5

Pronóstico mensual de precipitación de la región Cajamarca y punto de muestreo



Nota. Mapa del departamento de Cajamarca respecto a precipitaciones durante el mes de muestreo en la zona Huacaríz- Cajamarca.

Figura 6

Situación actual de la zona de la campiña de Cajamarca- Huacaríz



Nota. Área de la campiña de Cajamarca (Zona de Huacaríz), cultivos y pasturas y la actual urbanización de la zona.

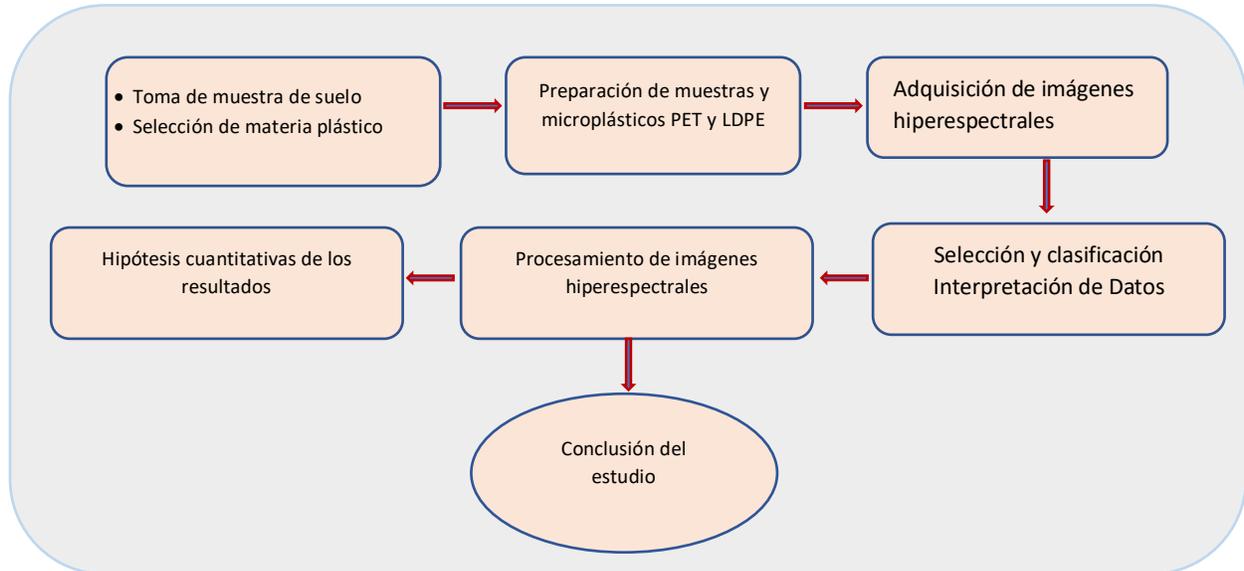
4.2. Diseño de la investigación, unidad de análisis, población y muestra

4.2.1. *Diseño De La Investigación*

El procedimiento que se siguió para realizar el estudio de investigación y lograr identificar microplásticos polímeros (PET y LDPE) mediante el uso de imágenes hiperespectrales donde el diseño analítico, cuantitativo y experimental, mediante un muestreo aleatorio simple (Figura 7).

Figura 7

Diagrama de flujo de la investigación



Nota. Proceso del diseño de la investigación que abarca muestreo, procesamiento de datos, resultados y conclusión de la investigación.

El procedimiento seguido para realizar la presente investigación se inicia con muestreo de suelo, luego éstas muestras fueron secadas y tamizadas en laboratorio, además se seleccionó el material plástico de acuerdo al tipo más usado en el medio (bolsas y botellas plásticas). Una vez seleccionados los plásticos se obtuvieron los fragmentos utilizando una tijera, reglas para medir el tamaño ($< 5\text{mm}$) preciso de los microplásticos en el ambiente.

4.2.2. Unidad De Análisis

El suelo y los microplásticos PET y LDPE fueron medidos en gramos (gr), estas medidas varían de acuerdo a las concentraciones del experimento (Tabla 4), cada una con su paralela correspondiente.

Tabla 4*Tratamientos y concentraciones de microplásticos*

Microplásticos		
Tipo de microplásticos	Porcentaje (%)	Unidad (g)
PET	2%	1
	4%	2
	6%	3
LDPE	2%	1
	4%	2
	6%	3
PET Y LDPE	1% + 1%	1
	2% + 2%	2
	3% + 3%	3

Suelo	
Tratamientos	Cantidad de suelo
1 -20 tratamientos	50 g x muestra

Nota. Se detalla los dos tipos de microplásticos y la mezcla de ambos en tres concentraciones distintas para una mayor eficiencia de los datos, además de la medida en gramos de acuerdo a la concentración del suelo (50 g).

4.2.3. Población De Estudio

La población de estudio estuvo compuesta por material plástico (botellas y bolsas) de distintos tamaños y espesor, aquí se obtuvo aproximadamente 1 kilogramos de botellas y 100 gr. de bolsas plásticas, los microplásticos obtenidos de manera artificial mediante corte en partículas menores a 5 mm semejantes a los microplásticos presentes en la naturaleza (Figura 8), el suelo utilizado para la investigación proviene de tierras agrícolas de la campiña de Cajamarca (Huacaríz).

Figura 8

Zona de muestreo y recolección de material plástico (PET y LDPE)



obtención de microplásticos (PET y LDPE) provenientes de bolsas y botellas plásticas.

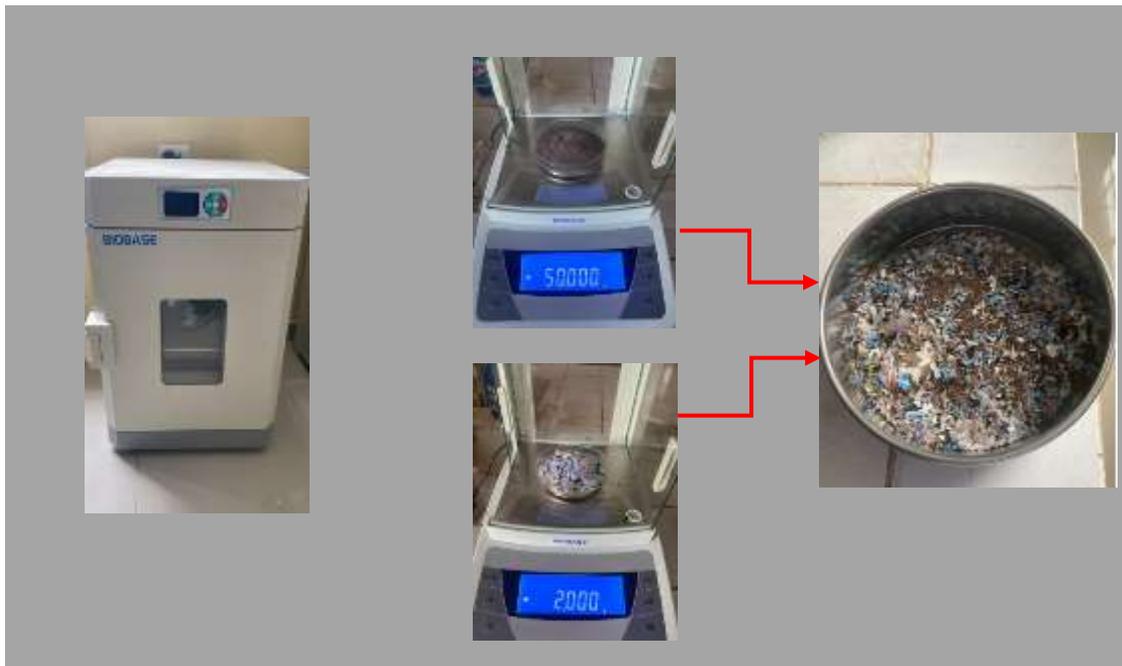
4.2.4. Muestra

La muestra de suelo fue tomada según la guía para muestreo de suelos en el Marco del Decreto Supremo N°. 0022013-MINAM, se recolectó una muestra de suelo natural de 2 kg de la capa superior de 5 cm y se llevó al laboratorio, para la investigación se preparó la muestra mediante el secado y tamizado para una mejor homogenización del suelo (Figura 9), luego se realizó la mezcla de suelo con el microplásticos, según metodología aplicada (Ai et al., 2022), se clasificaron

en cuatro categorías distintas: Suelo, Suelo + PET, Suelo + LDPE, Suelo + PET + LDPE, además se estableció 1 paralelo para cada uno según la concentración (2%, 4% y 6%) para cada tipo de microplásticos (PET y LDPE) y tres concentraciones (1%, 2%, 3%) para la mezcla de las dos clases de polímeros (Anexo 1) La concentración se calculó en 50 g/MP.

Figura 9

Preparación de la muestra de suelo con tipo de microplástico



Nota. En la figura se muestra el secado, pesado y mezcla de la muestra de suelo con el polímero (PET y LDPE) según la concentración empleada.

4.3. Equipos y materiales

Todo el proceso de ésta investigación, desde recopilación de la información, el uso de herramientas informáticas, toma de muestra de suelo, obtención de microplásticos, secado, pesaje, preparación y adquisición de datos espectrales, se utiliza lo siguiente:

4.3.1. *Materiales*

- Suelo (2 kg)
- Botellas y bolsas plásticas
- placas Petri
- Mortero
- Tijeras
- Libreta de apuntes
- Placa de calibración de reflectancia. El teflón tiene un largo de 32 cm y un ancho de 6.4 cm con 1.5 de espesor.

4.3.2. *Equipos*

Balanza analítica



Estufa



Cámara hiperespectral Resonon Pika IR- L



La Cámara hiperespectral Resonon Pika IR- L analiza un rango espectral infrarrojo cercano (NIR) de 925 a 1700 nm, 236 canales espectrales por línea y 320 píxeles espaciales.

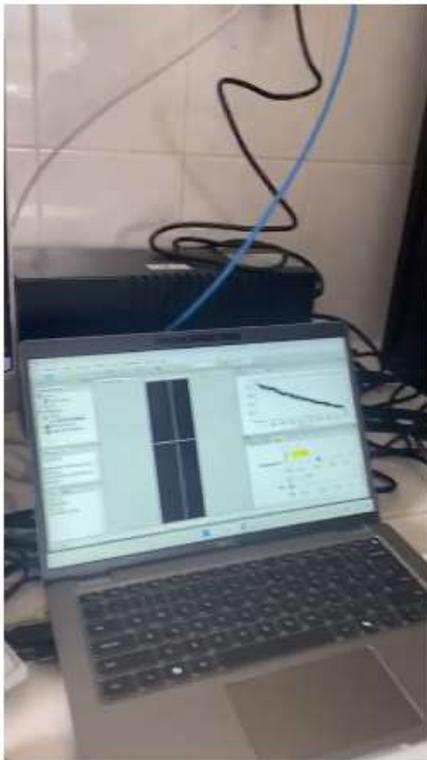
4.3.3. Sistema de Programación

Spectronon 3.5.

En la investigación se utilizó el Spectronon 3.5., este software tiene la capacidad de recopilar datos hiperespectrales mediante cámaras y sistemas hiperespectrales Resonon (Figura 10).

Figura 10

Pantallazo del software Spectronon 3.5. utilizado para la recolección de datos.



Nota. el sistema de adquisición de datos se controla por medio de un computador equipado con el software.

Python Versión 3.11.

Se utilizó este lenguaje de programación para realizar técnica de análisis de varianza (ANOVA) y prueba Tukey que mostrarán las diferencias significativas entre distintas concentraciones y ayudarán a identificar cuál o cuáles son las que tienen distinto tipo de microplásticos significativamente diferentes.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En este estudio, se emplean diversas técnicas y herramientas para realizar el muestreo de suelo y obtención de polímeros plásticos.

Estas técnicas incluyen:

4.4.1. Etapa de Gabinete

En esta etapa, se llevó a cabo una revisión bibliográfica que incluyó la exploración de libros, revistas y artículos científicos con el propósito de adquirir una comprensión más exhaustiva del estudio. La investigación sobre microplásticos es aún insipiente sobre todo lo concerniente con la contaminación en suelos, existiendo muchos estudios internacionales pero pocos estudios locales y nacionales.

4.4.2. Etapa de muestreo de suelo

Para esta etapa de la extracción de la muestra de suelo se seguirá de acuerdo a guía para Muestreo de Suelos 2014 en el Marco del Decreto Supremo N° 002. 2013- MINAM y la metodología de investigación. Wenjie (2022) la muestra natural de suelo será extraídas de la capa superficial de 5 cm, se eligió a ésta profundidad para cubrir la capa activa del suelo ya que la vida del suelo es concentrada en la capa superior, y la profundidad de enraizamiento y la profundidad de arado no supera los 30 cm. (Huerta et al, 2020).

Adquisición de las muestras.

Se recogieron muestras de suelo de una tierra de cultivo de la zona Huacaríz, Centro poblado de Cajamarca (778,023.520, 9 206,205.543). Se eliminaron raíces, hojas secas y las malezas de la superficie del suelo, para luego recoger 2 kg de tierra de los 5 cm superiores de la capa de suelo, la cual se llevó al laboratorio para su respectivo procesamiento.

Secado y tamizado de muestras de suelo.

Las muestras de suelo fueron secadas en una incubadora a 60 °C durante 12 h para evitar los cambios de humedad y tener una mayor precisión en el análisis (Xu et al., 2023). Para el tamizado se utilizó tamizadores de 2 mm para filtrar los materiales grandes del suelo seco, como raíces de cultivos, piedras pequeñas, etc.

4.4.3. Técnica de obtención de microplásticos

Recolección de plásticos y obtención de microplásticos.

Se recolectaron una cantidad aproximada de botellas y bolsas plásticas de diferentes tamaños y colores, luego se procedió a recortar lo más finamente posible (< 5mm) asemejando lo más natural de éstos en la naturaleza.

Tamizado de partículas microplásticas.

Las partículas de microplásticos obtenidas se pasaron por una malla metálica de 4mm para filtrar los microplásticos de mayor tamaño (Figura 11).

Figura 11

Tamizado de microplásticos



Nota. Se muestra el tamizado de microplásticos para obtener partículas menores a 5mm.

Preparación de muestras para análisis.

El suelo seco y tamizado se lleva a una placa y se pesa en la balanza una cantidad de 50 g por muestra (20 muestras = 1 kg), los microplásticos también se colocan en una placa Petri y se pesa, una cantidad de acuerdo a la concentración requerida (Anexo 2).

Las muestras fueron planteadas en 10 tratamientos con un paralelo cada una, además de tres concentraciones distintas (2, 4 y 6%) por cada tipo de polímero (PET y LDPE) y por la mezcla de ambos (PET+LDPE) (Tabla 5).

Tabla 5

Tratamientos de las muestras de la investigación

Tratamiento	SUELO (50 g)	PET	LDPE	Peso
T 1	X			50g
T 2	X	2%		1g
T 3	X	4%		2g
T 4	X	6%		3g
T 5	X		2%	1g
T 6	X		4%	2g
T 7	X		6%	3g
T 8	X	1%	1%	1g
T 9	X	2%	2%	2g
T 10	X	3%	3%	3g

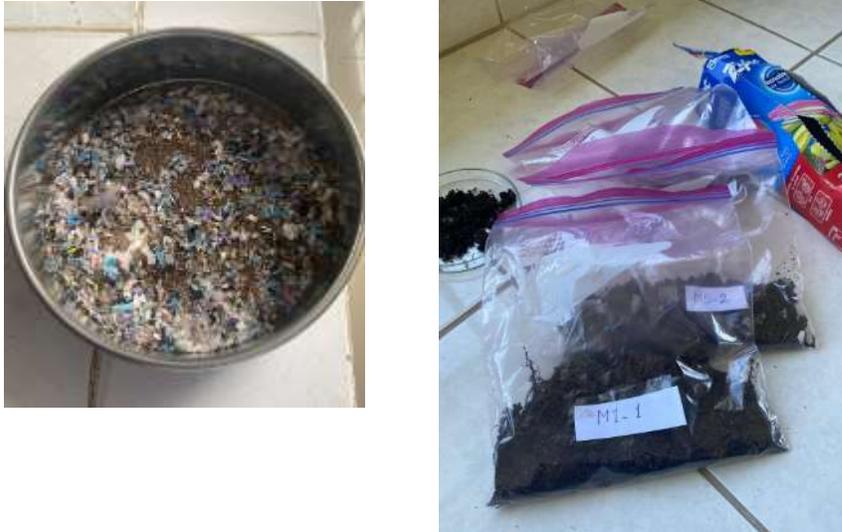
Nota. Se muestra mediante la figura los 10 tratamientos realizados en la investigación, la muestra de suelo con microplásticos polímero PET y LDPE además de la mezcla de ambos.

Mezclado de suelo y microplásticos.

Luego del pesado respectivo tanto de suelo como de los microplásticos, se procederá a mezclar, utilizando para esto un mortero hasta lograr su total integración, luego se vaciará en bolsas Ziplox con su respectiva codificación (Figura 12).

Figura 12.

Codificación de muestras según tratamiento



Nota. La imagen muestra el mezclado del suelo y el material plástico (PET y LDPE) para realizar posteriormente su codificación de acuerdo al tratamiento realizado en la investigación.

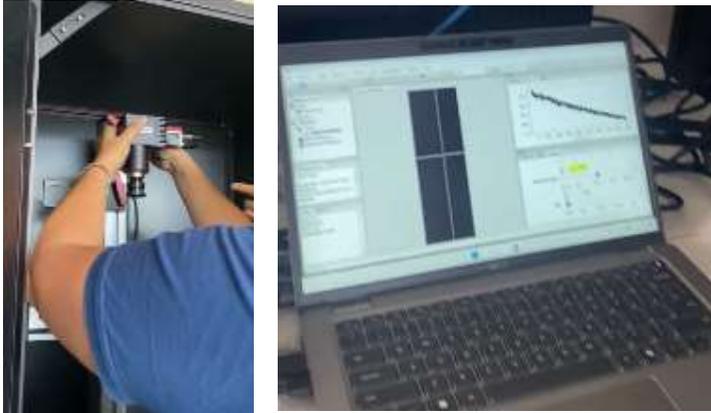
4.5. Procesamiento y análisis de datos

4.5.1. Calibración del sistema de imagen hiperespectral

Los parámetros usados en la calibración son la distancia de la cámara a la muestra que es 25 cm y tiempo de integración de 4.095 ms, para estos valores se obtiene la resolución espacial de 0.48 mm (tamaño de los píxeles) y área de barrido de 15.2 x 22.9 cm². En la calibración de la reflectancia se utiliza un hipercubo del patrón de referencia (teflón) y un hipercubo de la corriente oscura, ambos se adquieren con la cámara hiperespectral (Flores y Loro, 2019) (Figura 13).

Figura 13

Calibración del enfoque de la cámara y procesador de imágenes



Nota. La distancia de separación del lente de la cámara y la muestra respectiva, así como la velocidad de escaneo y tiempo de integración es indispensable para lograr la precisión de los datos espectrales.

4.5.2. Adquisición De Datos Espectrales

Para el escaneo de las muestras se utilizó un equipo de imágenes formado un sistema hiperespectral, escenario (plataforma móvil), fuente de iluminación y un computador. El sistema hiperespectral operará en modo de reflectancia con escaneo línea por línea (Pushbroom) en el rango de 925 – 1700 nm de 236 canales espectrales, que corresponde al espectro infrarrojo cercano NIR. Para la adquisición de datos espectrales se utilizó el software Spectronon 3. 5.6., el cual se controla mediante una computadora Marca DELL, conectados a su vez al generador de imágenes PIKA L y la platina (calibración); los cuales permiten realizar parámetros de ensayo de la cámara y controlar el funcionamiento durante la adquisición de las muestras. Las imágenes obtenidas se disponen en una matriz tridimensional denominada hipercubo de extensión *.bil (band interleaved by line). Asimismo, para leer estas imágenes se crea otro archivo conocido como la cabecera, cuya extensión es *.hdr. De las 20 muestras se recopilaron cientos de curvas espectrales, excluyendo

algunos datos espectrales que no coincidían con el experimento real, y una gran información de datos espectrales válidos.

4.5.3. Pre Tratamiento Espectral

En esta etapa de procesamiento es necesario agrupar la suma de canales adyacentes de datos espectrales para reducir el tamaño de datos ya que contaríamos con 252 900 datos espectrales, serviría además para disminuir la relación señal- ruido o aumentar la velocidad de escaneo, para eliminar la interferencia del ruido, es necesario pre procesar los datos hiperespectrales de las muestras de suelo (Xu et al., 2023), se utiliza el Binning de software que se leen en el generador de imágenes y luego se suman los canales espectrales y/o espaciales adyacentes al software, lo que produce un fotograma de tamaño espectral/espacial reducido inversamente proporcional a los factores de agrupamiento, mejorando la relación señal- ruido y el rango dinámico de los datos. En el generador de imágenes PİKA IR-L la velocidad máxima de cuadros, agrupamiento por software es de 249 fps.

4.5.4. Algoritmo De Extracción De Características

Según Xu et al., (2023) los datos espectrales pre procesados aún tienen una fuerte correlación, por eso es necesario analizar las variables de características que son útiles para la clasificación, éstas deben extraerse mientras que las variables irrelevantes se eliminan.; ésta técnica estadística consiste en reducir la cantidad de dimensiones de grandes conjuntos de datos identificando patrones y correlación, agrupando aquellas variables altamente correlacionadas logrando la caracterización de los datos espectrales (Navarro et al. 2024). El algoritmo PCA utiliza una proyección lineal para mapear datos de alta dimensión en una representación espacial de baja dimensión y espera la máxima varianza de los datos en las dimensiones proyectadas para utilizar

menos dimensiones de datos y, al mismo tiempo, preservar las características originales de los puntos de datos (Salem y Hussein, 2019, Xu et al., 2023).

4.5.5. Construcción De Modelo SVM

La máquina de vectores de soporte SVM es un método de aprendizaje, transforma los datos brutos en un espacio de alta dimensión para construir un hiperplano para la clasificación (Xu et al., 2023). A partir de los datos de entrada, el algoritmo genera una estimación sobre un patrón en los datos su función es distinguir entre dos clases encontrando el hiperplano óptimo que maximiza el margen entre los puntos de datos más cercanos de clases opuestas. Los datos brutos no lineales pueden transformarse en una categorización lineal mediante el mapeo de funciones kernel (Kuo et al., 2013, Xu et al., 2023). En esta investigación se selecciona la función kernel gaussiana para construir el clasificador, establecido en una matriz de confusión para este modelo.

CAPITULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultado

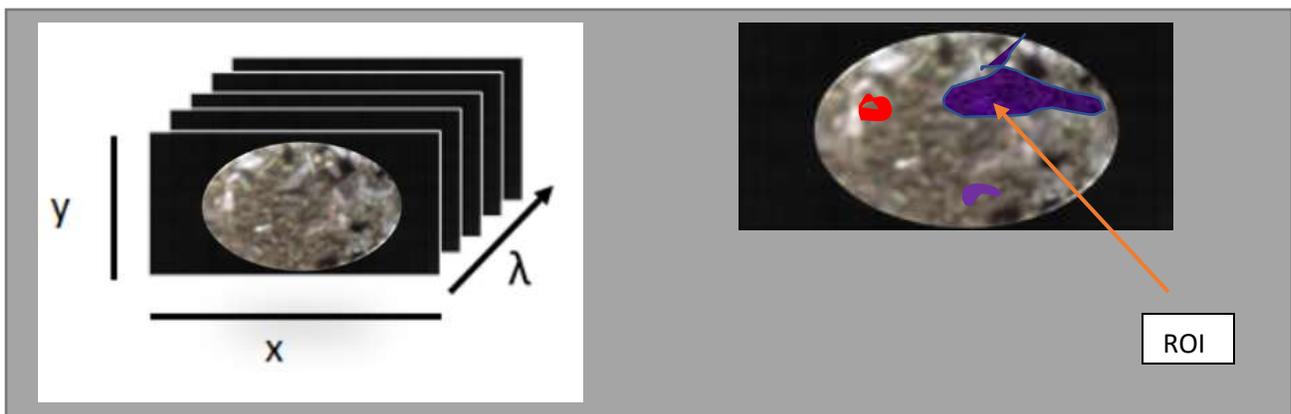
5.1.1. Procesamiento de las imágenes hiperespectrales

Para procesar las imágenes es necesario sobreponer hipercubos entre ellas. En el hipercubo (Figura 14) se juntan dos dimensiones espaciales X e Y y una dimensión espectral λ sin estos hipercubos sería imposible llegar a tener el espectro de la imagen.

Spectronon permite graficar el espectro asociado a un píxel, ubicación (muestra y número de línea) y enumera los valores de brillo rojo (R), verde (G) y azul (B). Es importante crear un grupo de píxeles dentro de la imagen de la muestra, la región de interés (ROI) que permite clasificar los diferentes objetos dentro de una imagen hiperespectral (Anexo 3), estas ROI se logran identificar a partir de las partículas de microplásticos y el suelo. Las ROI de diferentes muestras y se extrajeron las características espectrales de las ROI.

Figura 14

Representación de un hipercubo con muestra de suelo



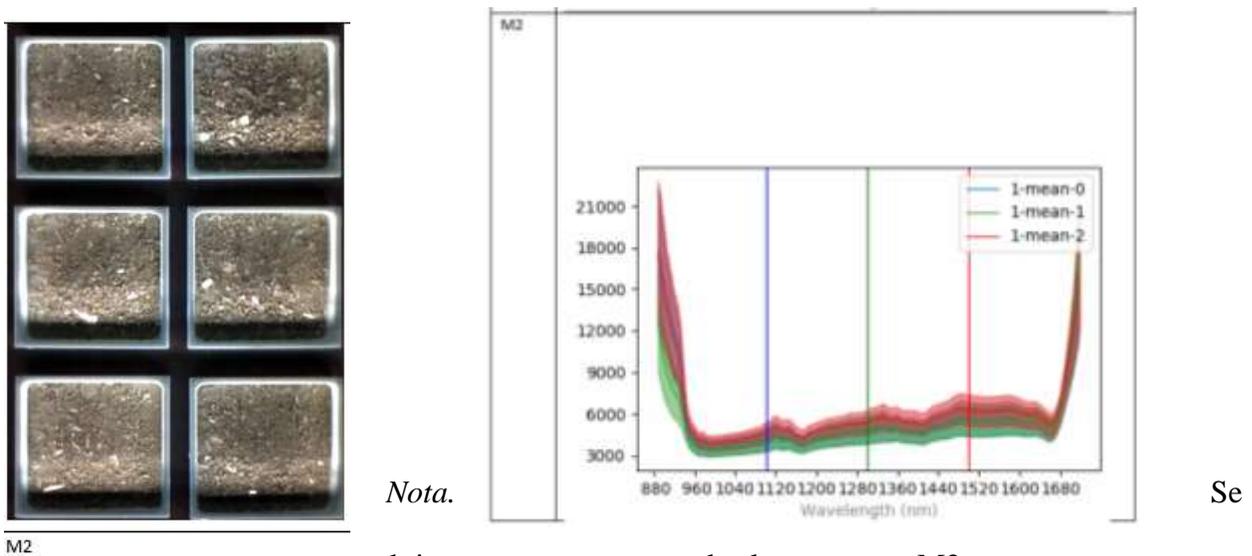
Nota. Para procesar las imágenes es necesario crear los hipercubos para obtener el espectro de cada pixel (izquierda), a la (derecha) se identifica las ROI de la muestra (rojo: PET, Morado: suelo, degradado: suelo +PET).

5.1. 2. Comparación espectral de MPs, suelo original y sus mezclas

Se recopiló la información espectral de cada muestra de suelo con microplásticos (PET y LDPE y la mezcla entre ambos) en tres distintas concentraciones 2%, 4% y 6% se realiza el análisis espectral a cada una de las muestras (Anexo 4) con su paralela, se puede observar que el pico de reflexión de las muestras se encuentra entre 1120 nm y 1520 nm., aquí se identifica la diferencia de concentración de las muestras (microplásticos), lo que indica que el proceso de pretratamiento ha sido el correcto y no existe una gran variación determinadas en el espectro (Figura 15).

Figura 15

Espectro del patrón de referencia y muestras de suelo



Nota.

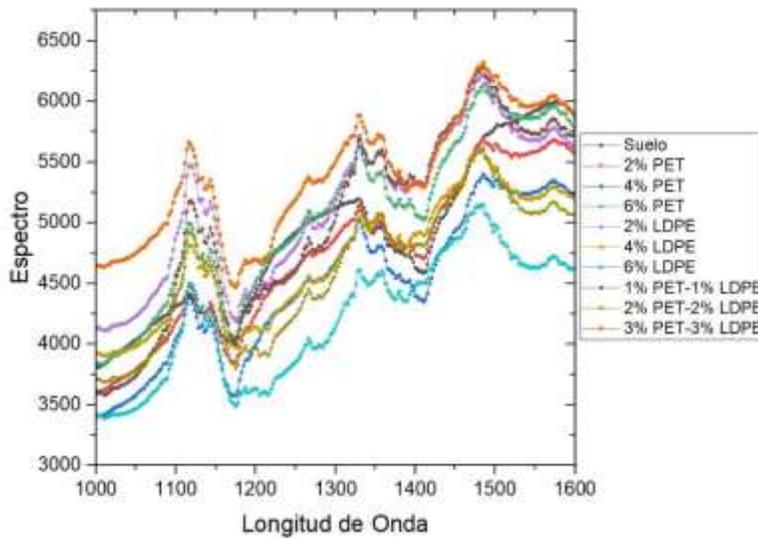
obtiene tres espectros de la muestra M2, que corresponde al suelo + PET 2% se compartió la muestra en tres porciones para una mayor visualización dentro del procesador de imágenes.

5.1.3. Curva espectral de muestras de microplásticos del suelo

Cada muestra selecciona tres regiones de interés (ROI) con un tamaño de píxel de 30×30 , y el valor espectral promedio de cada ROI se utilizó como datos espectrales brutos de la muestra (Figura 16).

Figura 16

Espectros NIR de microplásticos PET y LDPE en distintas concentraciones



Nota. Se presentan los espectros de 10 muestras diferentes en el rango de longitud de onda de 1000 a 1600 nm, los espectros presentan patrones similares.

Existen variaciones importantes en la intensidad de los espectros, estas diferencias reflejan variaciones en la composición de las muestras, posiblemente relacionadas con la cantidad y tipo de polímero añadido (PET, LDPE o PET+LDPE). El suelo + PET 2% (M2) presenta las mayores intensidades, mientras que el suelo + LDPE 6 % (M7) muestra los valores más bajos, sugiriendo diferencias significativas en la concentración de microplásticos o en las propiedades del suelo modificado. Como los tratamientos involucran suelo con adición de microplásticos (PET, LDPE,

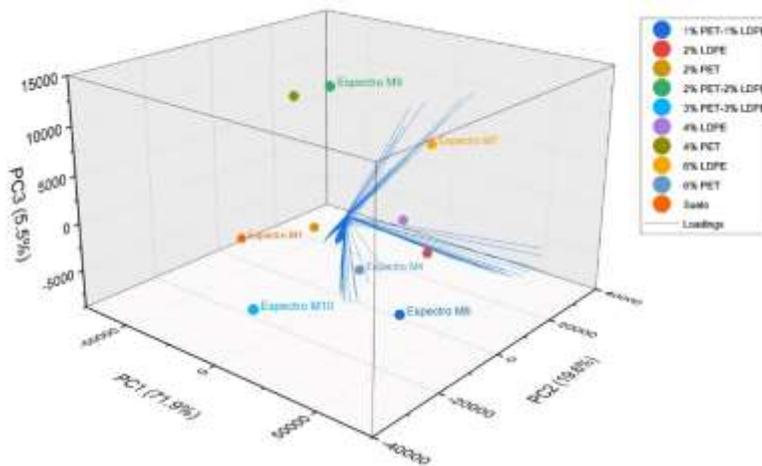
PET + LDPE), es probable que las diferencias de los espectros estén asociadas a la concentración de polímeros que podría generar mayor absorción, el tipo de polímero (PET y LDPE) que tienen características espectrales distintas y a las mezclas de polímeros, que pueden presentar un comportamiento intermedio o combinado.

5.1.4. Extracción de características de datos espectrales

Para la extracción de características espectrales se utilizó el algoritmo PCA que consta de una proyección lineal para mapear datos de alta dimensión en una representación espacial de baja dimensión y espera la máxima varianza de los datos, preservando al mismo tiempo las características originales de los puntos de datos (Salem y Hussein, 2019; Xu et al., 2023) (Figura 17).

Figura 17

Proyección lineal del algoritmo de componentes principales



Nota. Se muestra los tres primeros componentes principales analizados por PCA, donde el primer componente principal PC1 representa el 83.6% de la variabilidad, PC2 representa el 10.1% y PC3

el 5.7%. En total, los tres componentes representan un 99.4% de la variabilidad total de los datos, lo cual es muy alto y suficiente para un análisis robusto.

Las muestras se agrupan y separan en el espacio tridimensional, indicando diferencias claras en su composición espectral, la muestra 10 (suelo + PET+LDPE 3%) está claramente separada del resto, indicando que su espectro es diferente, la muestra M8 Muestra M8 (suelo+ PET+ LDPE 1%) también está separada negativamente en PC2 y PC3, lo que sugiere un comportamiento espectral único talvez relacionado con menor concentración o distinta combinación de microplásticos, las muestras M1, M5, M6 están más agrupadas cerca del centro, indicando que sus espectros son similares. Estos resultados evidencian que los tratamientos aplicados afectan notablemente las características ópticas del suelo modificado.

Este tipo de análisis es un método eficiente y rápido en la identificación y clasificación de distintos espectros, según Stroyuk et al., (2020) la identificación es confiable, no invasiva y no destructiva en la extracción de características de datos espectrales aplicando PCA. En la presente investigación se obtiene los tres primeros componentes; donde PC1 (83.6%) capta la mayor diferencia entre muestras probablemente relacionada con la cantidad total de microplásticos añadido, el PC2 (10.1%) y PC3 (5.7%) captan variaciones secundarias, como diferencias en el tipo de polímero (PET vs LDPE) o efectos de mezcla. Marchesi et al. (2023) logró reducción de los 200 datos espectrales de las 100 combinaciones de muestras obteniendo en los tres primeros componentes; M1: 83.63%, M2: 10.12 % y M3: 5.7%; logrando así el 99.45% de información espectral en la cotización.

Los primeros diez componentes principales se conservaron durante el proceso de extracción, y su tasa de contribución de componente principal correspondiente y la tasa de contribución acumulada (Tabla 6).

Tabla 6

Contribución del componente principal de muestras analizadas

NÚMERO DE COMPONENTE PRINCIPAL	VALOR PROPIO	VARIANZA (%)	VARIANZA ACUMULADA (%)
M1	99.9222	83.63052	83.63052
M2	18.6019	10.12428	93.7548
M3	36.9153	5.72649	99.48129
M4	0.00148	0.39306	99.87435
M5	99.9194	0.07899	99.95334
M6	0.00447	0.03487	99.98821
M7	11.1508	0.00621	99.99442
M8	0.01008	0.00415	99.99856
M9	11.0349	0.00144	100
M10	99.9766	1.39E-28	100

Nota. Se muestra la tasa de contribución de componente principal correspondiente y la tasa de contribución acumulada que contenían más del 99% de la información espectral total para el desarrollo posterior del modelo.

La reflectancia de las muestras de suelo con diferentes componentes de microplásticos (PET y LDPE) indica que la reducción hiperespectral es factible (Ai et al., 2022), se observa que en el primer componente (M1) 83.63%, segundo componente (M2) 10.12 % y tercer componente (M3) 5.7%; además los componentes 4, 5, 6, 7, 8 ,9 y 10 son inferiores al 1%. Además, la tasa de cotización acumulada de los tres primeros componentes alcanzó el 99.48%, representando la

mayor parte de la información de los datos originales. Por lo tanto, estos tres primeros componentes se utilizaron para reemplazar las bandas del espectro original para establecer un modelo de clasificación y servir como entrada del modelo.

5.1.5. Indicador de evaluación de la clasificación de datos espectrales

Las características espectrales extraídas anteriormente se dividieron en el conjunto de entrenamiento, éstas se utilizaron para realizar una validación cruzada y evaluar la eficacia del modelo y evitar el sobreajuste de los resultados de los datos (Xu et al., 2023).

Modelo máquina de vectores de soporte SVM.

Las características espectrales del PCA se ingresaron respectivamente en SVM, este clasificador sirve para realizar un conjunto de pruebas distintas, clasificando las proporciones y obteniendo resultados del conjunto de datos (Ai et al., 2022). Se selecciona la función kernel gaussiana para construir el clasificador, utilizando un espacio de características de mayor dimensión para hacer que los datos sean casi linealmente separables, el cuál controla la medida de similitud empleada durante la clasificación. Para evaluar el rendimiento de la clasificación, se utilizaron como indicadores de evaluación del modelo de clasificación la exactitud (A), la precisión (P), la recuperación (R) y la puntuación F1 (F1) (Wang y Song, 2019). Se muestra los resultados del rendimiento de clasificación. Los índices de clasificación P, R y F1 de PET, LDPE y PET + LDPE con diferentes concentraciones detectadas por SVM (Tabla 7).

Tabla 7*Resultados de la clasificación con cuatro concentraciones diferentes de MP*

Suelo +PET				
Muestras con distintas concentraciones	P	R	F1	
2%	0.8421	0.7647	0.9767	
4%	1.0000	0.9375	0.9687	
6%	1.0000	1.0000	1.0000	
0%	1.0000	0.9375	0.9677	
De precisión	0.9388			
Suelo + LDPE				
Muestras con distintas concentraciones	P	R	F1	
2%	0.8421	0.7647	0.9797	
4%	1.0000	0.9375	1.0000	
6%	1.0000	1.0000	0,8276	
0%	1.0000	1.0000	0.9697	
De precisión	0.9286			
Suelo + PET y LDPE				
Muestras con distintas concentraciones	P	R	F1	
2%	0,9333	0.8235	0.8333	
4%	1.0000	1.0000	1.0000	
6%	1.0000	1.0000	0.8570	
0%	1.0000	0.8125	0.8966	
De precisión	0.9388			

Nota. La clasificación del modelo empleado fue basada según la exactitud (A), precisión (P) recuperación (R) y la puntuación (F1) de todas las concentraciones de las muestras.

Se puede observar que los valores F1 de PET, LDPE y PET + LDPE varían de 0.9667 a 1.0000, 0.8276 a 1.0000, y 0.8570 a 1.0000 respectivamente, los cuales son mayores que 0.8. La precisión de clasificación general de SVM para diferentes concentraciones de PET, LDPE y PET + LDPE es 0.9388, 0.9286 y 0.9388 respectivamente. Además, los valores F1_score de SVM son todos mayores que 0.89 cuando la concentración de PET, LDPE y PET + LDPE fue del 0.0%, lo que indica mejores resultados de clasificación. Vale la pena señalar que SVM muestra resultados de clasificación superiores para concentraciones más bajas de MPs. Sin embargo, cuando la concentración de PET + LDPE es del 2%, el valor F1_score correspondiente a SVM es 0.8333, lo cual es menos efectivo en la clasificación. Esto puede deberse a la presencia de más grava, arena y raíces de cultivos en las muestras de suelo o al efecto de la mezcla del PET y LDPE en su reflectancia espectral. En general, los resultados experimentales muestran que el modelo SVM puede lograr una detección de clasificación eficaz de concentraciones más bajas de MP, con una precisión de clasificación superior a 0,93 para muestras con un 0%, 2%, 4% y 6%. Además, al realizar la matriz de confusión de clasificación de PET, LDPE, PET + LDPE en distintas concentraciones (Tabla 8).

Tabla 8

Clasificación de datos espectrales mediante SVM

suelo	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
suelo + PET 2%	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
suelo + PET 4%	0.00	0.00	0.74	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
suelo + PET 6%	0.00	0.00	0.00	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
suelo +LDPE 2%	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
suelo +LDPE 4%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.09	0.00	0.00
suelo +LDPE 6%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00
suelo + PET +LDPE 1%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.00
suelo + PET +LDPE 2%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00
suelo + PET +LDPE 3%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39
	suelo	suelo + PET 2%	suelo + PET 4%	suelo + PET 6%	suelo + LDPE 2%	suelo + LDPE 4%	suelo + LDPE 6%	suelo + PET + LDPE 1%	suelo + PET + LDPE 2%	suelo + PET + LDPE 3%

Nota. De los 100 datos espectrales se muestra una precisión de clasificación del 100 % tanto en suelo, suelo + LDPE 2%, éstos resultados de clasificación mediante el algoritmo SVM.

La matriz de confusión funciona muy bien en general, especialmente con concentraciones más altas de plástico (6%), las muestras al 2% son más difíciles de clasificar, probablemente porque los patrones no son tan distinguibles con baja concentración de contaminante, así se logró el reconocimiento de suelo, suelo +PET y suelo + LDPE al 6% , logrando el mejor efecto de clasificación para estas dos combinaciones, mientras que para suelo con bajas concentraciones se tiene una precisión de clasificación menor. Se muestra además la clasificación errónea del 14% del suelo + PET como suelo + LDPE 2% y el 9 % del suelo + LDPE 4% como suelo + PET + LDPE 1%. Esto puede deberse a la presencia algún residuo o mezcla de microplásticos en las muestras, puede ser además la interferencia de la materia orgánica en el suelo o a la reflectancia espectral del PET (Xu et al., 2023). En general podemos decir que el SVM pueden clasificar y detectar partículas de materia orgánica en suelos agrícolas, El SMV logró 100% de clasificación, tuvo un mejor alcance en muestras de suelo, de mayor concentración. Vidal y Pasquini (2021) logran la identificación de cinco polímeros (PA-6, PE, PP, PET y PS) a través de un modelo de HSI con la técnica SVM logra identificarlas por tamaño, colores, propiedades y meteorización, se demostró que es posible detectar e identificar rápidamente microplásticos en el rango de tamaño de 150-300 μm , incluidas partículas incoloras, directamente en la matriz de sedimentos, en una muestra de arena.

Análisis estadístico ANOVA y prueba TUKEY.

Se realizó un análisis estadístico comparativo ANOVA y prueba de Tukey con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$ utilizando el lenguaje de programación Python 3.11, para analizar los promedios de las características fisicoquímicas dentro de cada grupo de microplásticos (PET y LDPE) a distintas concentraciones (0%,1%,2%,3%,4% y 6%). Se evaluaron las diferencias entre ellos, denotando las disparidades significativas con letras distintivas (a, b, c, d, e).

Con los resultados obtenidos se plasmó los datos resumidos en las sumas de cuadrados, grados de libertad, cuadrados medios, el valor F y el p-valor (Tabla 9)

Tabla 9

Resultados de la Tabla ANOVA

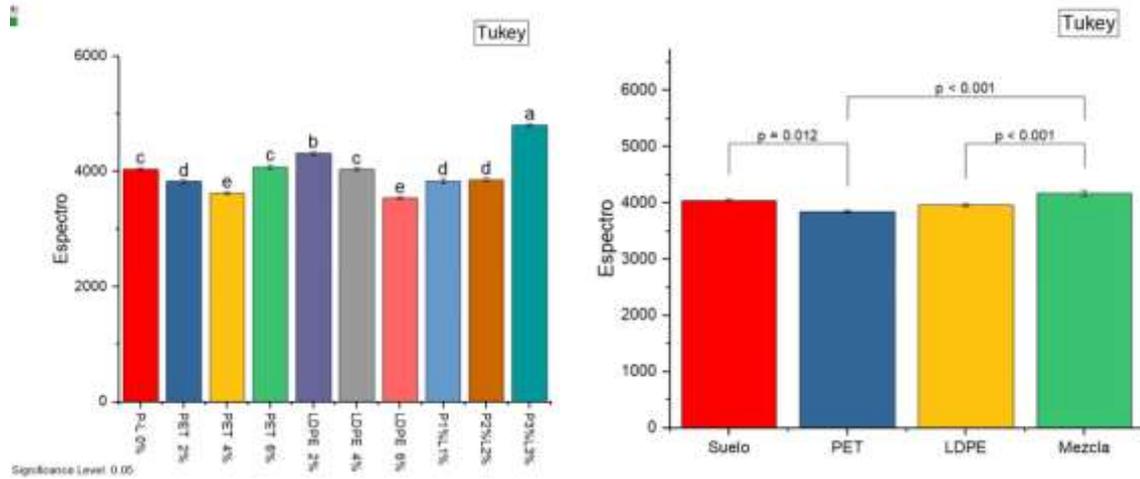
<i>Fuente de variación</i>	<i>SC</i>	<i>GL</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
<i>Entre grupos (tratamientos)</i>	66 090.0	3	22 030.0	77.2	< 0.001
<i>Dentro de grupos (error residual)</i>	2 283.3	8	285.4		
<i>Total</i>	68 373.3	11			

Nota. Se presenta los resultados aplicando la tabla Anova de los componentes principales de las muestras.

La suma de cuadrados del tratamiento (66 090) es mucho mayor que la suma de cuadrados del Error residual (2 283), indicando que la variación debida a los tratamientos explica la mayor parte de la variabilidad. El estadístico F calculado (≈ 77.2) es muy alto, lo cual implica una diferencia entre medias. Con un valor F tan elevado y $p < 0.001$, existe evidencia estadística fuerte de que al menos un grupo difiere significativamente de los demás. Por tanto, realizaremos la prueba TUKEY para ver entre que tratamientos están estas diferencias (Figura 18).

Figura 18.

Análisis estadístico de los tratamientos en muestras PET y LDPE



Nota. Se muestra las categorías (tratamientos) en el eje X y el valor del espectro (respuesta) en el eje Y además de las diferencias significativas indicadas por las letras (a, b, c, d, e) basado en 10 concentraciones de suelo, suelo + PET, Suelo +LDPE y Suelo +PET + LDPE.

El mayor valor de espectro ocurre cuando se mezcla el suelo con PET y LDPE al 3% cada uno, muestra también que añadir al suelo PET o LDPE individualmente reduce el valor de espectro en comparación con la mezcla, las concentraciones de polímeros individuales PET y LDPE (4%), disminuyen el valor del espectro notablemente, el suelo sin contaminantes (0%) tiene un espectro medio. Podemos decir que pequeñas cantidades combinadas (mezclas) pueden potenciar el valor de espectro y altas concentraciones individuales de los polímeros tienden a afectar negativamente el espectro.

En la figura (b), se comparan los valores de espectro para los tratamientos Suelo, PET, LDPE y Mezcla mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$). se observa que el tratamiento Mezcla es estadísticamente superior a los tratamientos individuales de PET y LDPE en cuanto al valor de espectro $p < 0.001$, el suelo solo tiene un valor de espectro mayor que PET ($p = 0.012$),

indicando que la adición de PET disminuye el valor de espectro en comparación al suelo puro, podemos decir que la adición combinada de polímeros (Mezcla) potencia el efecto sobre el espectro de forma significativa frente a la adición individual de PET o LDPE, además no se observa una diferencia significativa clara entre suelo y LDPE, lo cual podría indicar que el LDPE tiene un efecto más neutro comparado con PET.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Los resultados obtenidos evidencian que las imágenes hiperespectrales logran identificar microplásticos polímeros LDPE y PET en distintas concentraciones, mostrando las curvas espectrales similares lo que indica que comparten una base de composición similar (suelo), sin embargo, las diferencias en la intensidad del espectro entre las muestras indican variaciones en la cantidad o tipo de microplásticos presentes.
- El análisis PCA permite reducir la complejidad de los datos espectrales manteniendo más del 90% de la información original, las muestras no forman un único grupo compacto, sino que varían según el tratamiento aplicado (suelo solo, PET, LDPE, PET + LDPE), muestra el tratamiento 10 (muestra M10) como la más diferente, mientras que los tratamientos M1, M5 y M6 tienen composiciones similares, esto confirma que las diferencias espectrales observadas en el gráficos de espectros son reales y que los tratamientos aplicados tienen efectos diferenciables.
- El modelo de clasificación SVM logra 100% de clasificación y reconocimiento de éstas clases de polímeros en suelo, suelo + LDPE 2%), logrando el mejor efecto de clasificación para estas dos combinaciones, la precisión de clasificación general de SVM para diferentes concentraciones de PET, LDPE y PET + LDPE es de 93% indicando así un modelo óptimo y eficaz para clasificar datos espectrales según composición y concentración.
- El análisis estadístico de Tukey respalda que las diferencias observadas no son producto del azar ($p < 0.05$), se muestra que existe diferencia significativa entre los distintos tratamientos analizados, esto de acuerdo al tipo de polímero y su concentración son

factores determinantes en la respuesta del espectro, así como la adición combinada de polímeros (PET + LDPE) potencia el efecto sobre el espectro de forma significativa frente a la adición individual de PET o LDPE.

6.2. Recomendaciones

- El desarrollo tecnológico mediante el uso de tecnología hiperespectral unida a algoritmos de aprendizaje automático logran identificar contaminantes en el suelo, existiendo estudios científicos que avalan la identificación y clasificación de distintas clases microplásticos con diferentes concentraciones, además de ello el HSI se usa actualmente en distintos campos como investigación, control de calidad, seguridad alimentaria, servicios ecosistémicos entre otros; por ello es necesario enfocarnos en la búsqueda de nuevos algoritmos, métodos, tecnologías; plasmadas en investigaciones que permitan globalizar los límites de detección.
- Los datos espectrales identificados y clasificados incorporados a equipos de detección como drones, cámaras RGB e hiperespectrales aéreas servirán para la creación de sensores o la integración de información de otros tipos de fuentes y de diferentes entidades (locales, estatales, nacionales o internacionales).
- Enfocados en el campo de seguridad alimentarias, la HSI es una herramienta eficaz y sencilla de procesamiento de datos espectrales; por ello debemos explorar aplicaciones en la detección de peligros alimentarios, incluyendo residuos de medicamentos, contaminantes microbianos, metales, residuos de pesticidas, toxinas y adulterantes entre otras.
- La HSI demuestra que puede ser usada en distintos campos de investigación además de ser eficiente, de bajo costo operativo relativamente bajo en comparación con los métodos tradicionales que necesitan mayores tratamientos de muestreo y tiempo.

- Es de importancia realizar más investigaciones cualitativas y cuantitativas sobre la correlación entre el contenido de microplásticos de diferentes polímeros y los datos espectrales tanto en agua aire y suelo, recursos prioritarios para la vida.
- Los resultados de ésta investigación serán referenciados y servirán como línea de base en el estudio de microplásticos en plantas a través de la absorción de nutrientes del suelo o a través de la contaminación del aire, pues existe información sobre la presencia de éstos en la cadena trófica.

REFERENCIAS

- Ai, W., Liu, S., Liao, H., Du, J., Cai, Y., Liao, C., ... y Wang, J. (2022). Application of hyperspectral imaging technology in the rapid identification of microplastics in agricultural soil. *Science of The Total Environment*, 807, 151030. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151030>
- Aguilar, J.D. y Cubas, N. (2021). Contaminación de suelos por el uso de aguas residuales. *Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias ALFA*, 5 (14)
- Alcivar, K. (2020). *Diagnóstico del uso de plásticos no reutilizables en puestos de expendio de alimentos informales en el cantón Jipijapa*. [Tesis de Grado, Universidad Estatal del Sur de Manabí- Ecuador]. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2399>
- Álvarez, J. y Chávez, E. (2022). Microplásticos en el Antropoceno: Contaminación y efectos en el suelo. *CONACYT*, 14. 212–217 (6/octubre/2022). ISSN: 2395-8790.
- Avendaño, J., Gonzaga, K. y Ruiz J. (2013). *Análisis técnico de las radiaciones electromagnéticas emitidas por las antenas de las radiobases celulares en la ciudad de Guayaquil*. [Tesis profesional de Ingeniero en Sistemas Con Mención en Telemática, Universidad politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4232>
- Bollaín, C. y Agulló, D. (2020). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Revista Española de la Salud*, http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272019000100012&lng=es&nrm=iso>.
- Bustos, G. y González, C. (2021). *Formulación de una propuesta de gestión de residuos de polietileno de baja densidad*. Caso de estudio: empresa dedicada a la importación de

alimentos. Ciencia Unisalle. Universidad de La Salle.

https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1918

Casso, G., Acevedo, S., y Martínez, S. (2022). Contaminación del suelo por microplásticos: panorama actual. *Ciencias Básicas e ingeniería del ICBI*. 10 (19), 55-60

Castañeta, G., Gutiérrez, A., Fallón N., y Manzano C. (2020). Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, 37 (3), pp. 160-175.

Castillo, D. (2021). *Análisis e identificación de suelos a partir de imágenes hiperespectrales usando PPI, MNF y PCA*. [Tesis de Maestría en Ciencias en Física - Universidad Nacional de Ingeniería- Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22522>

Castro, S. (2019). *Estudio de películas co-extruidas de polietileno con nanopartículas metálicas foto-selectivas para aplicaciones en invernadero* [Tesis magisterial en tecnología de polímeros, Centro de investigación en química aplicada, México]. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/611>

Cifuentes, C. (2018). *Análisis de la exposición de Microplásticos en Lumbricus Terrestris*. [Tesis profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad de Concepción- Chile]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/3405/6/Tesis%20An%C3%A1lisis%20de%20la%20exposici%C3%B3n%20de%20micropl%C3%A1stico%20en%20Lumbricus%20terrestris.Image.Marked.pdf>

Chávez, I., (2018). *Análisis de imágenes hiperespectrales usando códigos de cadena*. [Tesis Magistral en Ciencias de la Computación, Universidad Autónoma de Aguas Calientes- México]. <http://hdl.handle.net/11317/1547>

- Delgado, A. (2019). *Desarrollo de algoritmos para la detección de objetos ópticamente camuflados utilizando cámaras hiperspectrales embarcadas* [Tesis profesional de Ingeniero de Tecnologías y servicios de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid- España]. <https://oa.upm.es/55575/>
- Defensores del Ambiente y Territorio (SPDA) (31/ 01/2024). Acuerdo global contra la contaminación por plásticos estaría listo a finales de este 2024.
- Díaz, R., Velarde, G. y Lino, G. (2020). Análisis de flujo de materiales de plásticos para la producción, consumo y comercio de envases rígidos del polietileno de tereftalato (PET) en Perú durante 2018. *La Saeta Universitaria*, 9(2) ,15-38
- Fiore, L., Serranti, S., Mazziotti, C., Riccardi, E., Benzi, M. y Bonifazi, G. (2022). Classification and distribution of freshwater microplastics along the Italian Po River by hyperspectral imaging. *Science and Pollution Research*.29:48588–48606. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18501-x>
- Flores, R. y Loro, H. (2019). Análisis de suelos contaminado con hidrocarburo de petróleo usando imágenes hiperspectrales en el infrarrojo cercano. *ISSSD (3)*, 66-86
- Flores, P. (2020). La problemática del consumo de plásticos durante la pandemia de la Covid -19. *South Sustainability*, 1(2), e016. DOI: 10.21142/SS-0102-2020-016.
- Fuller, E. y Gautam, A. (2016). Un procedimiento para medir microplásticos mediante extracción de fluidos a presión. *Tecnología de ciencia ambiental*. 50(1) doi: 10.1021/acs.est.6b00816
- García, G. (2022, 29 de agosto). Estudios de contaminación del suelo reavivan el debate sobre los microplásticos. *The Food Tech*. <https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/estudios-de-contaminacion-del-suelo-reavivan-el-debate-sobre-los-microplasticos/>

- Gastelo, C. (2018). *Estudio del sinterizado de materiales compuestos a partir de polietileno reciclado y madera capirona recuperada mediante moldeo por compresión* [Tesis Magistral en Ingeniería y Ciencia de los Materiales, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/11916>
- Geyer, R., Jambeck, J., Laverter L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 1-5. DOI: [10.1126/sciadv.1700782](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782)
- Gobierno regional de Cajamarca (GRC) (18/03/2019). Región Cajamarca Produce 390 toneladas de basura por día. [https://portal.regioncajamarca.gob.pe/noticias/regi-n-cajamarca-produce-390-toneladas-de-basura-por-d-](https://portal.regioncajamarca.gob.pe/noticias/regi-n-cajamarca-produce-390-toneladas-de-basura-por-d)
- Guo, J., Huang, P., Xiang, L., Wang, Z., Li, W., Li, H., Cai, Y., Mo, H., y Wong, H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment international*, 137, Article 105263.g
- Herrera, M., Estrella, C. y Porras, L (2019). Propuesta de Declaración del espectro electromagnético en Ecuador. *ResearchGate*.: <https://www.researchgate.net/publication/338702601>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017). http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/plan_gestion_recursos_hidricos_mashcon_chonta_0_0.pdf
- Hunt,CF, Lin, WH, Vaulvaulis,N. (2021). Evaluación de alternativas a las microesferas de plásticos en los cosméticos. *Nat. Sustain.* 4, 366-372.
- Huanaco, R. (2019). *Diagnóstico de la presencia de microplásticos en sedimentos laterales en la cuenca baja del río Rímac*. [Tesis magistral, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19416>

Huerta, E., Van, P., Corradini, F. y Geissen, V.(2020). Aplicación de lodos de depuradora como vehículo de microplásticos en el este Suelos Agrícolas Españoles. *Environmental Pollution*, 261 www.elsevier.com/locate/envpol

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (2020). *Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf

Kuka, E., Cirule, D. , Andersone, I , Vasiljevs, L., Merna, J. , Sarakovskis, A. , Kurnosova, N., Sansonetti, E. , Vevere.L. y Andersons, B. (2024). A step to microplastic formation: Microcracking and associated surface transformations of recycled LDPE, LLDPE, HDPE, and PP plastics exposed to UV radiation, *Polymer Degradation and Stability*. *Elsevier*. 229, 110967. ISSN 0141-3910, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110967>

León, J. (2021). Imágenes hiperespectrales y sus aplicaciones en estudios de suelos, cultivos y bosques, en la era de la cuarta revolución industrial. *Revista Ud y la Geomática*. 16, 40- 70.

López, R. A. (2023). *Técnicas de caracterización de materiales plásticos reciclados* [Tesis Profesional en Ingeniería Química Industrial, Universidad politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/63551101-a40c-4a73-8b13-0186119f0e38/content>

Marchesi, C., Rani, M., Federici, S., Alessandri, I., Ducoli, S., Zacco, A., Nunez, A. y Bontempi, E. (2023). Quantification of thermal mixtures of microplastics using an ultra-compact infrared spectrometer coupled to chemometric tools. *Environmental Research*.216. 3. ISSN 0013-9351,

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114632>

Mora, C. (2022). *Revisión sistemática: Evaluación de métodos para la identificación y cuantificación de los impactos ambientales generados por los microplásticos en el suelo* [Tesis Profesional, Universidad Cesar Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/104256/Mora_RCI%20-%20SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Moreno, D. (2018). *Biotransformación de polietileno de baja densidad (LDPE) y LDPE Oxo-biodegradable empleando Pleurotus ostreatus y residuos lignocelulósicos de pino (Pinus caribaea)* [Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Javeriana- Bogotá]. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.40333>

Meenambigai, P., Vijayarghavan, R., Gowri, R., Rajarajeswari, P., Paulraj, D. y Prabhavathi. (2016). Biodegradation of Heavy Metals – A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(4), 375-383.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO). (02/05/2018). *La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro*. <https://www.fao.org/newsroom/story/polluting-our-soils-is-polluting-our-future/es#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20suelo%20provoca,un%20desequilibrio%20de%20sus%20nutrientes>.

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014). La fiscalización ambiental en residuos sólidos.pp.8. Recuperado de: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=6471

Pizarro, I. (2022, 30 de junio). Leyes vs Plásticos: Dificultades para la implementación de la Ley de plásticos del Perú. *Métrica del cambio climático*.

[https://www.climetria.com/2022/06/30/leyes-vs-plasticos-dificultades-para-la-
implementacion-de-la-ley-de-plasticos-del-peru/](https://www.climetria.com/2022/06/30/leyes-vs-plasticos-dificultades-para-la-
implementacion-de-la-ley-de-plasticos-del-peru/)

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Programa para el Medio Ambiente. (2018). *Plásticos de un solo uso. Una hoja de ruta para la sostenibilidad*. Rev. (2) pp.9. [https://www.unep.org/es/resources/informe/plasticos-de-un-solo-uso-una-
hoja-de-ruta-para-la-sostenibilidad](https://www.unep.org/es/resources/informe/plasticos-de-un-solo-uso-una-
hoja-de-ruta-para-la-sostenibilidad)

Organización de las Naciones Unidas. (2021, 22 de diciembre). *Los microplásticos también están contaminando nuestros suelos*. [https://www.unep.org/es/noticias-y-
reportajes/reportajes/los-microplasticos-tambien-estan-contaminando-nuestros-
suelos#:~:text=Efectos%20t%C3%B3xicos&text=El%20pl%C3%A1stico%20clorad
o%20puede%20liberar.especies%20que%20beben%20el%20agua](https://www.unep.org/es/noticias-y-
reportajes/reportajes/los-microplasticos-tambien-estan-contaminando-nuestros-
suelos#:~:text=Efectos%20t%C3%B3xicos&text=El%20pl%C3%A1stico%20clorad
o%20puede%20liberar.especies%20que%20beben%20el%20agua).

Organización de las Naciones Unidas. (2019, 15 de marzo). Compromiso mundial para reducir los plásticos de un solo uso. *Mirada global Historias humanas*. <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution/?lang=ES>

Paoletti, M., Haut, J., Plaza, J., y Plaza, A. (2019). Estudio Comparativo de Técnicas de Clasificación de Imágenes Hiperespectrales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. (16), 129-137.

Peinado-López, F. (2023). *Sistemas de revalorización de poliolefinas procedentes de residuos sólidos urbanos* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/194553/Peinado%20-
%20Sistemas%20de%20revalorizacion%20de%20poliolefinas%20procedentes%20d
e%20residuos%20solidos%20urbanos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/194553/Peinado%20-
%20Sistemas%20de%20revalorizacion%20de%20poliolefinas%20procedentes%20d
e%20residuos%20solidos%20urbanos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Rivas, J., Gutiérrez, M., Cortés, G., y Gómez, J. (2023). Los plásticos y el daño a la salud de los seres vivos y a los ecosistemas. *Biocenosis*. 34 (1).
<https://doi.org/10.22458/rb.v34i1.4828>

Shan, J., Zhao, J., Zhang, Y., Liu, V., Fengchang, W. y Xue E.R. (2019). Simple and rapid detection of microplastics in seawater using hyperspectral imaging technology. *Analytica Chimica Acta*. 1050.2019. (pp.161-168).
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.11.008>

Stella, G. (2021). Tecnologías disruptivas: *Contexto político-jurídico, desafíos y oportunidades en Latinoamérica*. *LEX*.20. (33). pág. 43-74

Stroyuk, C., Buerhop, C., Vetter, A., y Hauch, J. (2020). Nondestructive characterization of polymeric components of silicon solar modules by near-infrared absorption spectroscopy (NIRA). *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 216. ISSN 0927-0248,
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110702>.

Schmid, T., Rodríguez, M., y Escribano, P. (2016). Caracterización de indicadores de erosión del suelo utilizando datos hiperespectrales de una región cultivada de secano en el Mediterráneo. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9 (2), 845-860

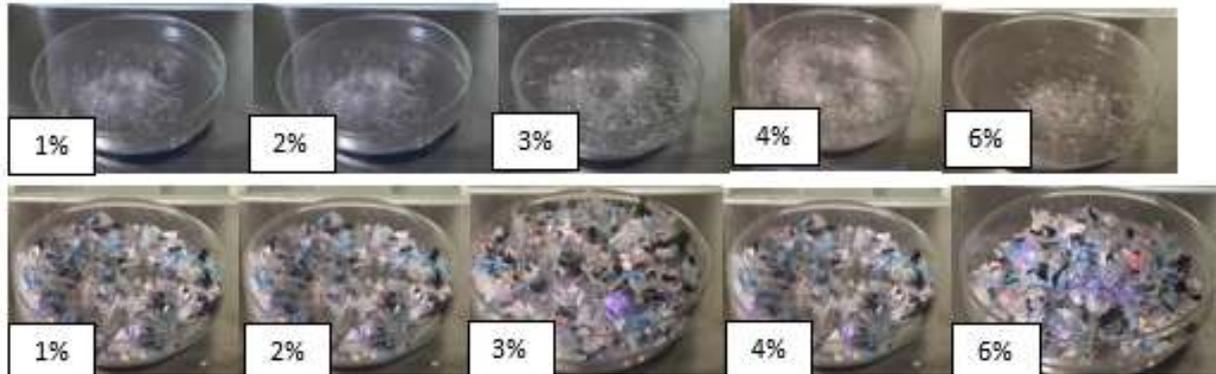
Verástegui, D. (29/12/2020). Demanda de PET en Perú es de 50 mil toneladas anuales. The food tech. <https://thefoodtech.com/historico/demanda-de-pet-en-peru-es-de-50-mil-toneladas-anuales/#:~:text=En%20Per%C3%BA%20la%20demanda%20del,de%20Coca%20Cola%2C%20Dennis%20Ver%C3%A1stegui.>

- Vidal, C., y Pasquini., C. (2021). Rapid and complete identification of microplastics based on hyperspectral infrared images (HSi-NIR) and chemometry. *Environmental Pollution*.285. ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117251>.
- Villalobos, A. (2017). *Procesamiento digital de imágenes hiperespectrales*. [Tesis Profesional en sistemas y telecomunicaciones, Universidad politécnica de Madrid - España]. <https://oa.upm.es/48425/>
- Xayachak, T., Haque, N., Lau, D., y Pramanik, B. (2024). The missing link: A systematic review of microplastics and its neglected role in life-cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 954,176513. ISSN 0048-9697.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176513>.
- Xu, L., Chen, Y., Shi, X., Yanqi. F., Yang, Y., Yuchao, R., Wu, Z., Youg Zou, Z., Wie, M., Él, Y., Yang, N., y Zhao, Y. (2023). Study on detection method of microplastics in farmland soil based on hyperspectral imaging technology. *Environmental Research*.232,116389,ISSN 0013-9351,<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116389>.
- Yunlong L., Ravi N., Cheng F. (2023). Accelerated transformation of plastic furniture into microplastics and nanoplastics by fire, *Environmental Pollution*, 317.120737. ISSN 0269-749. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120737>
- Zurita. M. (2019, 30 de noviembre). Botellas de plástico: ¿Qué frena la inversión en el reciclaje? *Diario el comercio*. <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/bebidas-botellas-de-plastico-que-frena-la-inversion-en-el-reciclaje-economia-circular-plastico-noticia/?ref=ecr>

ANEXOS

ANEXO 1

Muestra de referencias de los microplásticos a diferentes niveles de concentración



Se presenta las muestras de referencia a cinco niveles de concentración, con una máxima concentración de 6% y una mínima concentración de 1% de microplásticos tanto para PET como LDPE.

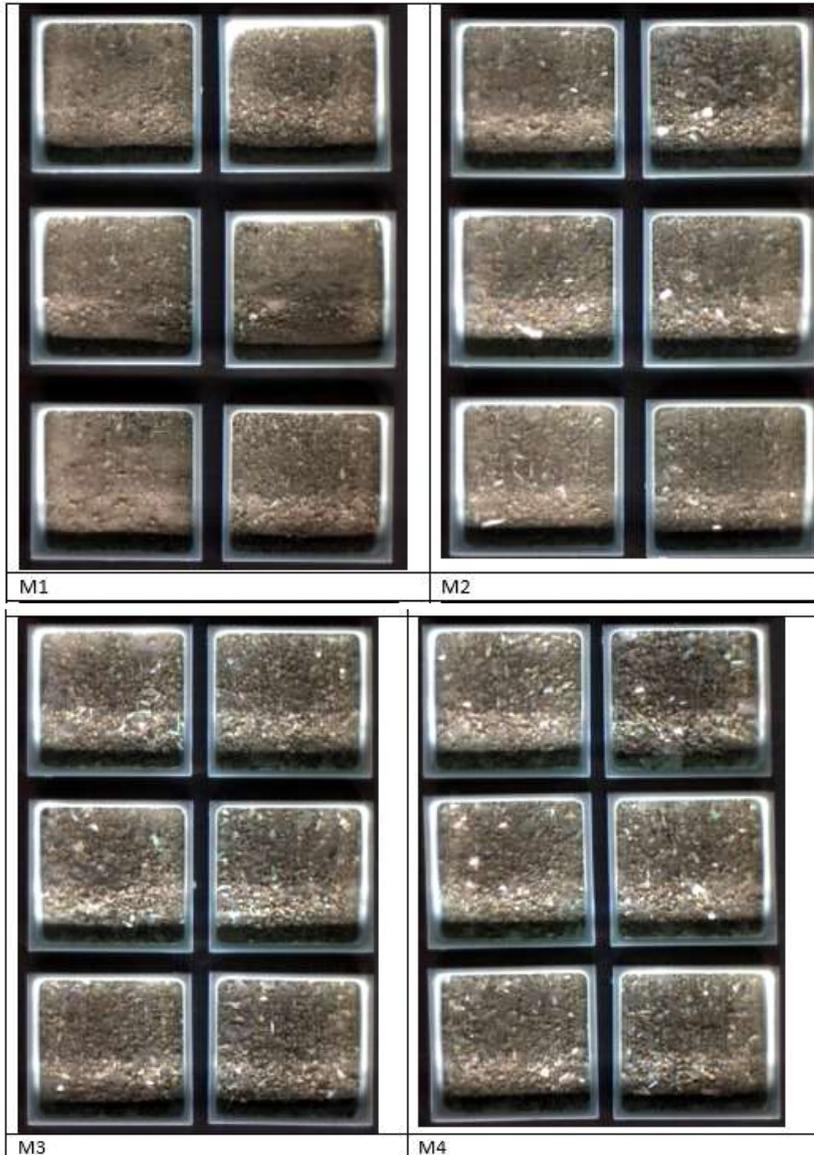
ANEXO 2

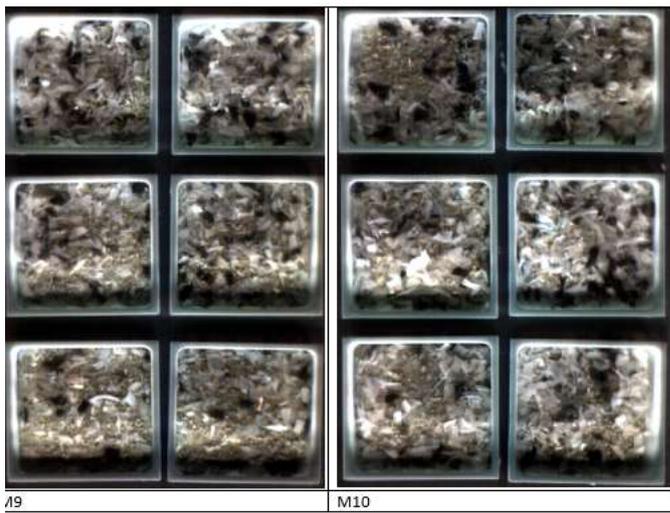
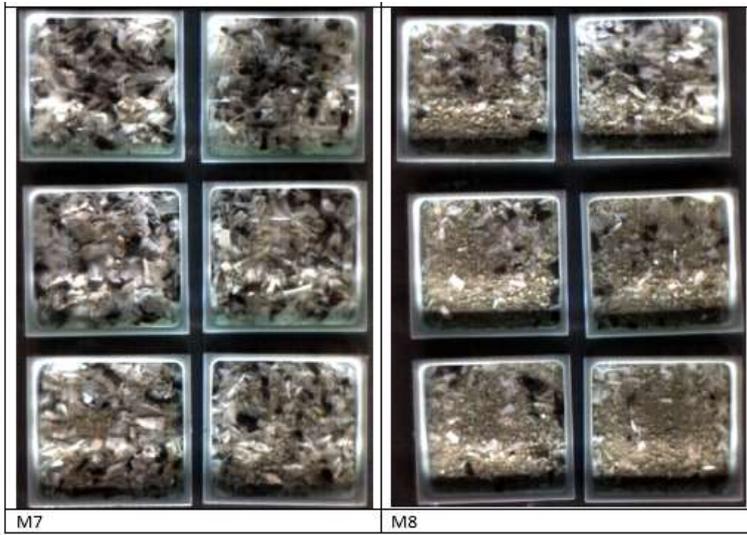
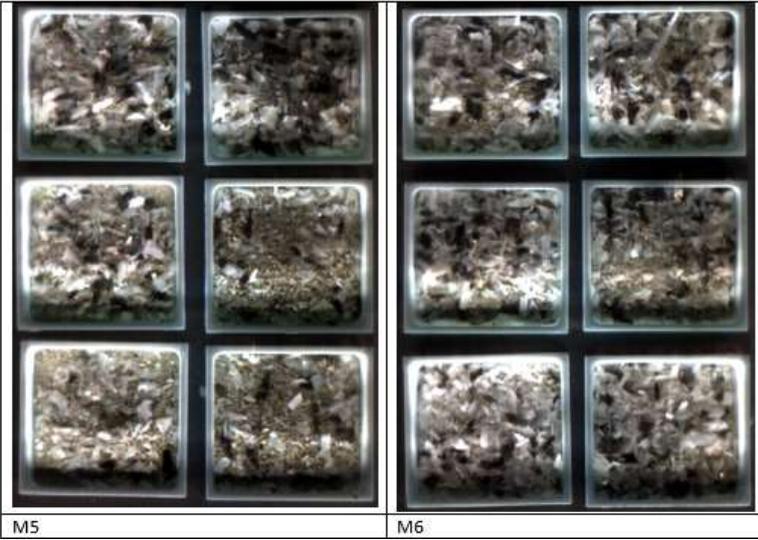
Pesado de suelo y microplásticos PET y LDPE



Anexo 3

Procesamiento de imágenes espectrales en muestras analizadas

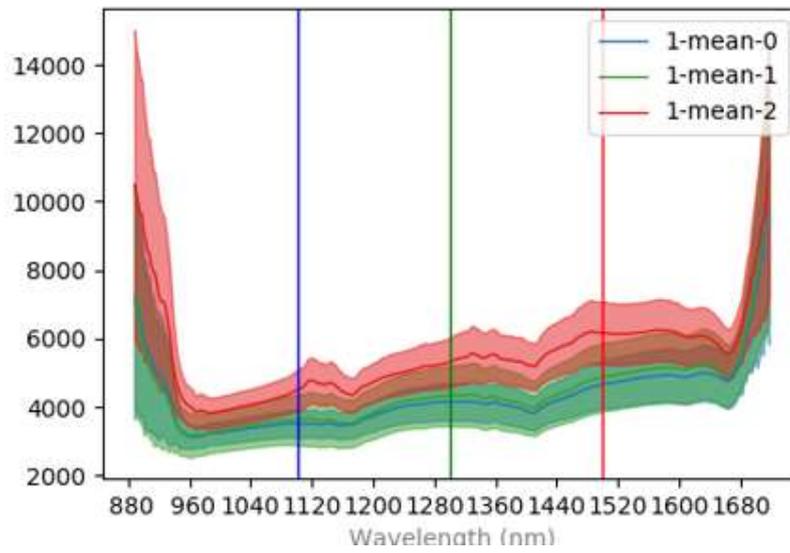




Anexo 4

Análisis espectral de las muestras analizadas

M1



M2

