

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LICENCIATURA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

TESIS

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA VEGETAL
AFECTADA POR DERRAME DE HIDROCARBUROS EN
SUELOS AGRÍCOLAS MEDIANTE NDVI EN LA
COMUNIDAD DE JUANDHÓ, HIDALGO, MÉXICO.**

**Para obtener el grado de:
Licenciada en Ingeniería en Geología Ambiental**

PRESENTA:

Deyanira Danae Mejía Díaz

Director:

Dr. Enrique Cruz Chávez

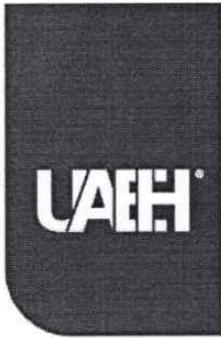
Comité tutorial:

L. C. C. José Alfredo Meneses Lugo

Dra. Ingrid Árcega Santillán

Dra. Laura Cano Salinas

Mineral de la Reforma, Hidalgo. 26 de junio 2024



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de junio de 2024

Número de control: ICBI-D/889/2024
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a la Egresada de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Deyanira Danae Mejía Díaz**, quien presenta el trabajo de titulación "**Análisis multitemporal de cobertura vegetal afectada por derrame de hidrocarburos en suelos agrícolas mediante NDVI en la comunidad de Juandhó, Hidalgo, México**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: L.C. José Alfredo Meneses Lugo

Secretario: Dra. Ingrid Arcega Santillán

Vocal: Dr. Enrique Cruz Chávez

Suplente: Dra. Laura Cano Salinas

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx,
acevedo@uaeh.edu.mx

GVR/YCC



Índice General

I. Agradecimientos.....	i
II. Dedicatorias.....	ii
1. Generalidades.....	1
1.1. RESUMEN	1
1.2. ABSTRACT	2
1.3. INTRODUCCIÓN	3
1.4. ANTECEDENTES	5
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	9
1.6. OBJETIVOS	10
1.7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
2. Marco Teórico.....	12
2.1. Teledetección	12
2.2. Características espectrales de la vegetación	19
2.3. Características espectrales de sustancias contaminantes en el suelo	23
2.4. Combinación de bandas espectrales (RGB)	24
2.5. Índices de vegetación	29
2.6. Imágenes satelitales	32
2.7. Fisiología de las plantas frente a un factor contaminante externo: Hidrocarburo	37
2.8. El suelo y su comportamiento	38

2.9.	Hidrocarburo; naturaleza y comportamiento.....	41
3.	Área de estudio	45
3.1.	Ubicación del área de estudio y vías de acceso	45
3.2.	Geología	47
3.3.	Edafología.....	50
3.4.	Clima	54
3.5.	Uso de suelo y vegetación	54
3.6.	Hidrografía	56
3.7.	Hidrogeología	56
3.8.	Infraestructura petrolera.....	58
4.	Marco Legal	63
4.1.	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	63
4.2.	Ley de Aguas Nacionales	68
4.3.	Normas Oficiales Mexicanas (NOM)	70
5.	Metodología.....	74
5.1.	Temporalidad y adquisición de imágenes satelitales	74
5.2.	Reconocimiento del área de estudio	78
5.3.	Análisis de cambios	80
5.4.	Delimitación del área de estudio.....	81
5.5.	Conversión de datos raster a puntos vectoriales.....	87

5.6.	Selección de la cubierta vegetal por valor de reflectancia	87
5.7.	Análisis estadístico	87
6.	Resultados y Discusión	93
6.1.	Temporalidad y adquisición de imágenes satelitales	93
6.2.	Análisis de cambio	95
6.3.	Delimitación del área de estudio	119
6.4.	Selección de la cubierta vegetal por valor de reflectancia	121
6.5.	Mapas de cambio – Análisis estadístico	126
6.6.	Mapas de pérdida y recuperación – Análisis estadístico	135
7.	Conclusiones.....	143
8.	Recomendaciones.....	144
9.	Referencias.....	145
10.	Anexos	152

Índice de figuras

Figura 1. Elementos de un sistema de teledetección. Elaboración Propia.....	13
Figura 2. Representación gráfica de los componentes de la longitud de onda, su frecuencia y velocidad de propagación. Recuperado de la Oficina Europea de Recursos para la Educación Espacial en España (ESERO Spain).....	14
Figura 3. Imagen representativa del espectro electromagnético y sus bandas principales. Recuperado de la Universidad de California en Davis.....	16
Figura 4. Firmas de reflectancia espectral de vegetación sana, suelo seco, hojarasca de hierba gris, agua y nieve. Recuperado y modificado de HUETE, A. R. (2004).....	18
Figura 5. Firma espectral de la vegetación sana. Recuperado de Chuvieco (2008)	20
Figura 6. Combinación de bandas para Infrarrojo (843) del año 2020. Las zonas con vegetación sana se presentan en tonalidades rojo brillante. Modificado de la escena Copernicus, 2020.....	26
Figura 7. Combinación de bandas para uso agrícola (11, 8a, 2) del año 2020. Las áreas en color verde brillantes representan los cultivos presentes en la zona. Modificado de la escena Copernicus, 2020.	27
Figura 8. Combinación de banda para color natural (4, 3, 2) para el año 2020. Modificado de la escena Copernicus, 2020.	28
Figura 9. Combinación de bandas para análisis de vegetación (8a, 11, 2) del año 2020. Las zonas en tonos naranja realzan las zonas con vegetación vigorosa. Modificado de la escena Copernicus, 2020.....	28
Figura 10. Configuración orbital del doble satélite SENTINEL-2. Recuperado y modificado de European Space Agency.	35
Figura 11. Mapa de localización de la localidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejia-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales Topografía de INEGI (2017).	46
Figura 12. Mapa de geológico de la localidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejia-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos Geológicos Vectoriales de INEGI (2003).	48

Figura 13. Mapa de edafológico de la localidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejia-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de Edafología del INIFAP y CONABIO (2008).	51
Figura 14. Mapa del USV de la localidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejia-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación del INEGI (2009)..	55
Figura 15. Ductos localizados en la localidad de Juandhó. En color morado podemos observar los poliductos Tula – Pachuca y Cab. Poza Rica – Ref. Tula que atraviesan la comunidad y en color rojo el oleoducto Poza Rica – Ref. Salamanca. Recuperado y modificado de CartoCritica, 2021.....	59
Figura 16. Oleoducto Poza Rica - Ref. Salamanca Recuperado y modificado de CartoCrítica, 2021	60
Figura 17. Poliducto Cab. Poza Rica – Ref. Tula y el Tula – Pachuca. Recuperado y modificado de CartoCrítica, 2021	61
Figura 18. Momento previo al derrame en combinación RGB de color natural (14-OCT-2019) Modificado de COPERNICUS, 2019.	76
Figura 19. Momento durante el derrame en combinación RGB de color natural (8-OCT-20) Modificado de COPERNICUS, 2020.	77
Figura 20. Momento posterior al derrame en combinación RGB de color natural (8-OCT-21) Modificado de COPERNICUS, 2021.	77
Figura 21. Delimitación general de la zona de estudio dentro de la escena Sentinel en color natural.	79
Figura 22. Puntos de referencia para observar el comportamiento de cambio de la cobertura vegetal. Modificado de la escena Copernicus, 2020.....	81
Figura 23. Sección 1 del estudio. Área afectada directamente por el derrame de hidrocarburo.	82
Figura 24. Sección 2 del estudio. Área previa al derrame de hidrocarburo	83
Figura 25. Sección 3 del estudio. Área posterior al derrame como punto de referencia al comportamiento del contaminante.....	84

Figura 26. Área final de estudio delimitada. Modificada de COPERNICUS 2020.....	85
Figura 27. Escenas NDVI recortadas. Modificado de COPERNICUS 2019, 2020 Y 2021.	86
Figura 28. Diagrama de flujo para la clasificación del suelo sin cobertura vegetal o escasa cobertura en el año 2020 con operaciones lógicas.	89
Figura 29. Diagrama de flujo para la extracción de datos de la cobertura vegetal que presentó pérdidas del año 2019 al 2020.....	90
Figura 30. Diagrama de flujo para la extracción de datos de la cobertura vegetal que presentó una recuperación en el año 2020 al 2021.	90
Figura 31. Ejemplo de valores de reflectancia espectral en la selección de cambios de cobertura vegetal	91
Figura 32. Comparación de la resolución espacial entre Sentinel 2A y Landsat 8 en NDVI. Modificado de la escena Copernicus, 2020 y USGS 2020.	94
Figura 33. Combinación de bandas RGB para Infrarrojo, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019,2020 y 2021.....	97
Figura 34. Combinación de bandas RGB para Uso Agrícola, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019, 2020 y 2021.....	99
Figura 35. Combinación de bandas RGB para Color Natural, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019, 2020 y 2021.....	101
Figura 36. Combinación de bandas RGB para Análisis de vegetación, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019, 2020 y 2021.....	105
Figura 37. Mapa de procesamiento de interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2019. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2020.....	111
Figura 38. Mapa de procesamiento de interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2020.....	115

Figura 39. Mapa de procesamiento de interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2021. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2021.....	117
Figura 40. Análisis NDVI de la sección 1 del estudio.	119
Figura 41. Análisis NDVI de la sección 2 del estudio.	120
Figura 42. Análisis NDVI de la sección 3 del estudio.	121
Figura 43. Análisis de cobertura vegetal de la sección 1 entre el año 2019 y 2020	122
Figura 44. Análisis de cobertura vegetal de la sección 1 entre el año 2020 y 2021	123
Figura 45. Análisis de cobertura vegetal de la sección entre el año 2019 y 2020	124
Figura 46. Análisis de cobertura vegetal de la sección 2 entre el año 2020 y 2021	125
Figura 47. Análisis de cobertura vegetal de la sección 3 entre el año 2019 y 2020	125
Figura 48. Análisis de cobertura vegetal de la sección 3 entre el año 2020 y 2021	126
Figura 49. Mapa de comparación de cobertura vegetal entre el año 2019 y 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos raster de Sentinel 2A (2019 y 2020).	127
Figura 50. Mapa de comparación de cobertura vegetal entre el año 2020 y 2021. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos raster de Sentinel 2A (2020 y 2021).....	131
Figura 51. Mapa de comparación de cobertura vegetal entre el año 2019 y 2021. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos raster de Sentinel 2A (2019 y 2021).....	133
Figura 52. Mapa de diferencia de la pérdida de vegetación del año 2019 al 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2019 y 2020.	137
Figura 53. Mapa de diferencia de la recuperación de vegetación del año 2019 al 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2020 y 2021.	141
Figura 54. Terreno de cultivo inundado con combustóleo en el poblado de Juandhó, municipio de Tetepango, Hidalgo, tras una fuga ocurrida durante trabajos de mantenimiento en un centro de bombeo de Petróleos Mexicanos. Fotografía de Juan Ricardo Montoya, 2020.	152

Figura 55. Combustóleo acumulado en una parcela aledaña a la unidad de rebombeo tras el derrame de hidrocarburo en la comunidad de Juandhó, Tetepango. Fotografía de Ian Lima, 2020.	153
Figura 56. Químico se vertido en un ramal del Canal Alto Requena de aguas negras que pasa por el lugar por lo que los residuos petroleros fueron conducidos a tierras de cultivo de riego. Fotografía del periódico La Jornada, 2020.	153
Figura 57. Combustóleo acumulado presente en el canal de aguas negras Alto Requena durante labores de limpieza en la comunidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Fotografía de Francisco Villeda, 2020.	154
Figura 58. Alrededor de 150 km de canales de riego se vieron afectados. Fotografía de Productores del Valle del Mezquital, 2020.	154
Figura 59. Combustóleo presente en cultivos agrícolas. Fotografía de Productores del Valle del Mezquital, 2020.....	155
Figura 60. Valores espectrales del NDVI de año 2019, sección 1.....	159
Figura 61. Valores espectrales del NDVI de año 2019, sección 2.....	160
Figura 62. Valores espectrales del NDVI de año 2019, sección 3.....	161
Figura 63. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 1.....	162
Figura 64. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 2.....	163
Figura 65. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 3.....	164
Figura 66. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 1.....	165
Figura 67. Valores espectrales del NDVI de año 2021, sección 2.....	166
Figura 68. Valores espectrales del NDVI de año 2021, sección 3.....	167

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Velocidad de propagación de la luz	15
Ecuación 2. Energía de un fotón	15
Ecuación 3. Energía de un fotón modificada	15
Ecuación 4. Índice de vegetación de diferencia normalizada	30

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros que influyen en el transporte de contaminantes en suelo. (Fuente: Ortíz et al., 2003).....	23
Tabla 2. Clasificación NDVI de Mejía et al. (2021).....	32
Tabla 3. Misiones Sentinel (Agencia Espacial Europea, s. f.).....	34
Tabla 4. Resolución espectral de las bandas de Sentinel 2A (European Space Agency, 2015).....	36
Tabla 5. Unidades cronoestratigráficas presentes en el municipio de Tetepango. (INEGI)	49
Tabla 6. Edafología del municipio de Tetepango (Gobierno Municipal Tetepango, Hgo., 2016).	51
Tabla 7. Características de oleoducto Poza Rica - Ref. Salamanca (CartoCrítica, 2021).....	60
Tabla 8. Características del poliducto Cab. Poza Rica - Ref. Tula (CartoCrítica, 2021).	62
Tabla 9. Características del poliducto Tula - Pachuca (CartoCrítica, 2021).	62
Tabla 10. Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante (DOF, 2013) ...	71
Tabla 11. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo (DOF, 2013).....	71
Tabla 12. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo (DOF, 2013)	72
Tabla 13. Número mínimo de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada (DOF, 2013)...	73
Tabla 14. Características de las imágenes Sentinel 2A adquiridas.	75
Tabla 15. Capas de puntos vectoriales de cada sección del estudio en los tres años de investigación. ...	87

Tabla 16. Comparación de fecha de adquisición de las imágenes satelitales, partiendo desde el 16 de agosto de 2020 como (día del derrame)	93
Tabla 17. Comparación de porcentaje de nubosidad en las escenas de Sentinel 2A y Landsat 8 (Fuente: COPERNICUS, 2019, 2020 y 2021, USGS, 2018, 2020 Y 2021).	94
Tabla 18. Valores de reflectancia espectral de los puntos de control en el NDVI del año 2020	108
Tabla 19. Estadísticas de producción de la hectáreas sembradas, cosechadas y siniestradas del municipio de Tetepango en los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Obtenido de SIAP (2018, 2019, 2020, 2021).....	156
Tabla 20. Estadísticas de producción en valor de producción del municipio de Tetepango en los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Obtenido de SIAP (2018, 2019, 2020, 2021).	157
Tabla 21. Estadísticas de producción en valor de producción del municipio de Tetepango en los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Obtenido de SIAP (2018, 2019, 2020, 2021).	158

I. Agradecimientos

Agradezco profundamente al Dr. Enrique Cruz, por la oportunidad, la paciencia y la confianza en mi desempeño en la elaboración del trabajo, pese a las ideas y vueltas, siempre tuvo la puerta abierta dispuesto a compartir de su tiempo y conocimiento motivándome a seguir creciendo profesional y personalmente. Al Lic. Alfredo Meneses por ser guía y escucha en el desarrollo de la investigación, sus conocimientos no solo aportaron a la metodología del trabajo, me mostró un nuevo panorama en el uso de los sensores remotos, alimentando mi interés y desempeño futuro en el área. Gracias Dr. Cruz y Lic., Meneses, su dedicación a la docencia fue de gran inspiración a lo largo de la carrera.

A la Dra. Ingrid Arcega, quien también fue parte de mi formación académica, gracias por su honestidad a la hora de evaluar la investigación, sus comentarios y preguntas directas me permitieron mejorar y reforzar mis conocimientos en el tema. Su honestidad siempre ha sido un impulso para mejorar la seguridad en uno mismo.

A la Dra. Laura Cano, gracias por el tiempo y la ayuda para mejorar este trabajo. Las críticas constructivas realizadas definitivamente han sido de gran valor en la investigación y en mi capacidad de redacción. Gracias por su honestidad en el cuestionamiento de este estudio, pues me ha permitido reforzar la importancia de este tipo de trabajos en el área de la geología ambiental.

Gracias.

II. Dedicatorias

A mis padres; Damian Mejía Ángeles y Elda Díaz Jiménez, no hay palabras suficientes para agradecer todo lo que me han brindado, ha sido toda una vida (mi vida) llena de apoyo, a lograr grandes cosas, a soñar en grande, este logro es producto de un gran esfuerzo, su esfuerzo. Dedico este trabajo a ustedes, porque sin la confianza y el cariño que han puesto en mí, esto no sería posible hoy.

A mis hermanos; Carol y Gerson Mejía, ser la hermana menor me ha permitido observar sus pasos, aprender de ustedes e inspirarme a estar a la par de las grandes personas en las que se han convertido, al final del día siempre seré la hermana chiquita queriendo ser tan grande como sus hermanos, siempre desde la admiración y la inspiración.

A mis sobrinos; Daniela, Ángel y Jimena, mi equipo 7. Crecer junto a ustedes ha sido una gran responsabilidad, pues, así como mis hermanos, igual me gustaría infundir en ustedes la motivación de lograr grandes cosas. Ser su tía me motiva a crecer y compartir con ustedes todo el éxito que venga.

A mi mejor amiga Ángeles Galván (Angie); crecer juntas a lo largo de la carrera ha sido una gran experiencia, tengo muy presente aquella conversación en Pabellón sobre lo mucho que deseábamos tener una amiga que estuviera a la altura de la palabra y sin saberlo poco a poco nos iríamos convirtiendo en esa amistad que mucho tiempo anhelamos. Se que juntas lograremos cada sueño que hemos compartido.

Hay muchas personas detrás de este trabajo, a cada una de ellas que en su momento me motivó y brindó palabras de apoyo y aliento. A quienes me acompañaron en este trayecto llevo una parte de ustedes en mí, recuerdos, lecciones, experiencias.

Culminar esta etapa significa cerrar un ciclo, abrir paso a nuevas oportunidades, pero cerrar ciclos no es decir adiós, es atesorar con cariño y recordar con nostalgia, esta etapa universitaria.

Gracias

1. Generalidades

1.1. RESUMEN

Este estudio pretende demostrar la utilidad de la teledetección y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la identificación y caracterización de la contaminación por derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas en la comunidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. La base del estudio fueron las imágenes satelitales Sentinel 2A, a partir de las cuales se obtuvo el NDVI en los años 2019 (fecha previa al derrame), 2020 (fecha del derrame) y 2021 (fecha posterior al derrame). Los valores se analizaron en tres secciones equidistantes con la finalidad de estudiar el comportamiento y el grado de afectación que tuvo el contaminante en la cobertura vegetal.

Cabe resaltar la importancia de la elaboración de mapas como resultado final siendo un primer antecedente de mapas de procesamiento basados en el NDVI de los años de estudio en el área de trabajo, estos permitieron observar el comportamiento y el grado de afectación de la vegetación en los tres escenarios del derrame de hidrocarburo. Así mismo se generaron mapas de cambio para los años 2019 – 2020, 2020 – 2021 y 2019 – 2021 de la cobertura vegetal del área que tuvo mayor grado de afectación. Para la categorización de las diferentes coberturas vegetales se clasificaron los píxeles mediante operaciones lógicas con base en los rangos de clasificación del NDVI. Por último, se elaboraron mapas de pérdida y recuperación de cobertura vegetal que evidencian las áreas afectadas reforzando los datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en cuanto a las hectáreas siniestradas y las pérdidas económicas del valor de producción, las parcelas agrícolas que presentaron una pronta recuperación del terreno en el año 2021 se atribuyeron al nivel de resiliencia que el suelo a desarrollado a raíz de los diferentes derrames en la zona.

1.2. ABSTRACT

This study aims to demonstrate the utility of remote sensing and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the identification and characterization of contamination from hydrocarbon spills in agricultural soils in the community of Juandhó, Tetepango, Hgo. The basis of the study was the Sentinel 2A satellite images, from which the NDVI was obtained for the years 2019 (pre-spill date), 2020 (spill date), and 2021 (post-spill date). The values were analyzed in three equidistant sections to study the behavior and the degree of impact that the contaminant had on the vegetation cover.

It is important to highlight the significance of map creation as the final result, being a first precedent of processing maps based on the NDVI of the study years in the work area. These maps allowed the observation of the behavior and the degree of impact on the vegetation in the three scenarios of the hydrocarbon spill. Additionally, change maps were generated for the years 2019-2020, 2020-2021, and 2019-2021 for the vegetation cover in the area with the highest degree of impact. For the categorization of the different vegetation covers, the pixels were classified through logical operations based on the NDVI classification ranges. Finally, maps of vegetation cover loss and recovery were created, highlighting the affected areas and reinforcing the data from the Agricultural and Fisheries Information Service (SIAP) regarding the damaged hectares and the economic losses in production value. The agricultural plots that showed prompt recovery of the land in 2021 were attributed to the level of resilience that the soil has developed due to the different spills in the area.

1.3. INTRODUCCIÓN

La teledetección es una herramienta multidisciplinaria que permite el estudio de un objeto, área o fenómeno sin tener un contacto físico directo con él, se basa en la captación y análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos o superficies de estudio a distancia, proporcionando datos importantes para la toma de decisiones y la gestión de recursos naturales. Una de las técnicas más comunes en el ámbito de la teledetección es el análisis multitemporal, el cual nos permite comparar y analizar imágenes o datos en diferentes momentos del tiempo para estudiar los cambios en un área determinada a lo largo del tiempo.

El uso conjunto de ambas herramientas abrieron paso para el estudio de la detección de cambios en la cobertura vegetal frente a un derrame de hidrocarburo en suelos agrícolas. La contaminación por hidrocarburos en zonas de cultivo puede causar graves daños ecológicos, económicos y a la salud pública debido a la toxicidad y persistencia de los hidrocarburos.

En este contexto, el estudio se enfoca en la aplicación del análisis multitemporal de imágenes satelitales para evaluar los efectos de la contaminación por hidrocarburos en la cobertura vegetal de parcelas agrícolas. Mediante la comparación de valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), obtenidos en diferentes periodos de estudio identificando áreas de pérdida o recuperación de la vegetación.

El NDVI es un indicador que permite cuantificar la densidad y condición de la vegetación en las bandas NIR y RED del espectro electromagnético de las imágenes satelitales, proporcionando una medida precisa del estado de salud en el que se encuentra la vegetación. El uso de NDVI en estudios multitemporales permite la identificación de áreas afectadas por contaminantes como los hidrocarburos. El análisis de los datos satelitales y el cálculo del NDVI se realizaron utilizando imágenes obtenidas de la plataforma Sentinel y los resultados obtenidos no solo contribuirán a la comprensión del impacto

ambiental de los hidrocarburos, sino que también proporcionarán información para la toma de decisiones en la gestión y remediación de suelos contaminados.

1.4. ANTECEDENTES

La contaminación por hidrocarburo en suelos destinados a uso agrícola demanda el análisis de un área de mayor extensión, misma que involucra diferentes estudios multidisciplinarios los cuales abarcan áreas como el análisis de la toxicidad en los cultivos, que se ven afectados en su crecimiento y desarrollo provocando una menor productividad y calidad. La persistencia y la bioacumulación del contaminante sobre cómo se debe maniobrar adecuadamente para evitar su estancamiento en el suelo a largo plazo, la movilidad que presenta el contaminante en la infiltración de aguas subterráneas, así como el impacto que representa para la población afectada en materia de salud y repercusiones económicas.

La aplicación de sensores remotos para la detección, monitoreo y remediación de fugas de petróleo o hidrocarburos en sitios contaminados se remonta a la década de 1970, inicialmente mediante el uso de fotografías aéreas (Casciello *et al.* 2007). Aún con sus numerosos avances y actualizaciones, en México sigue siendo una tecnología nueva con escasos estudios aplicados a nuestro recurso de interés, el suelo.

Para las investigaciones de carácter nacional, Marrufo Vázquez (2007) descubrió que mediante el uso de técnicas de percepción remota y modelos de migración bajo una plataforma georreferenciada (SIG) se puede lograr cuantificar la extensión y el volumen de un sitio contaminado por hidrocarburos. Empleando el uso de algoritmos para distinguir zonas contaminadas con hidrocarburos (crudo), vegetación y cuerpos de agua con el software ER Mapper 6.4, imágenes de tipo multiespectral cubriendo el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de la plataforma Landsat 7 (sensor ETM+), teniendo como resultado la delimitación de suelos contaminados por hidrocarburo en la refinería de Minatitlán en Veracruz, la refinería Francisco I. Madero en Tampico y la refinería 18 de Marzo en el Distrito Federal ahora, Ciudad de México.

Asimismo, Espinosa Hernández & Galván Pineda, (2013) desarrollaron una metodología para delimitar zonas de suelos contaminados por hidrocarburos. Emplearon imágenes satelitales Landsat (5 y

7) y Envisat. Para las imágenes ópticas de Landsat resaltaron la firma espectral del hidrocarburo con la combinación de las bandas 2, 3, 4 y 5,. Por otra parte, con imágenes tipo radar aplicaron una regresión lineal con base en el modelo MIMICS-IEM el cual estima la permitividad del suelo para identificar las zonas contaminadas. Aunado a eso, se realizó un muestreo para caracterizar la zona, a través de un análisis de laboratorio con las muestras colectadas mediante la técnica de hidrocarburo totales de Petróleo (HTP). Los análisis de las imágenes satelitales fueron comparados con el muestreo de campo para integrarlos en un Sistema de Información Geográfica y obtener una perspectiva general de las zonas contaminadas, analizar la fuente de origen y su posterior evolución.

Por último, Olvera Reyes y Hernández Mendoza (2016) identificaron sitios contaminados con hidrocarburos en el estado de Querétaro mediante la combinación de bandas de imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 con un intervalo de tiempo entre 5 y 6 años a partir de 1994. El proceso que realizaron fue mediante la combinación de las bandas del espectro visible (verde y rojo), así como las de infrarrojo cercano, medio y térmico. Por medio del software ArcGIS realizaron la rasterización de las imágenes para obtener como producto final un mapa dónde se puedan diferenciar las zonas asociadas a los sitios contaminados con el hidrocarburo. De igual forma se realizó la comparación de las 5 imágenes satelitales para llevar a cabo un análisis multitemporal y observar el incremento de la contaminación.

En el orden internacional, Adamu *et al.* (2013) analizaron los datos de reflectancia espectral de la vegetación que ha estado expuesta a la contaminación por hidrocarburos de los derrames de petróleo de los oleoductos, empleando el uso de una imagen Landsat 5 TM con la finalidad de vigilar fugas de hidrocarburos. Los espectros de vegetación extraídos se compararon para discernir entre sitios contaminados y no contaminados, posteriormente se realizó una clasificación supervisada para elaborar un mapa con los sitios contaminados por hidrocarburos. Los autores mencionan que los valles en la porción visible del espectro están dictados por los pigmentos de las hojas de las plantas, ya que la clorofila absorbe fuertemente la energía en las bandas de longitud de onda centradas en unos $0,4\mu\text{m}$ y $0,6\mu\text{m}$, si

la cantidad de clorofila disminuye significa que la planta está sometida a algún tipo de estrés, lo cual llega a indicar un foco de contaminación demostrando que existen variaciones espectrales entre los lugares contaminados y no contaminados. Siguiendo el trabajo de los autores, Adamu *et al.* (2016) en Nigeria agregaron la importancia que tiene el volumen de un derrame de petróleo y la diferencia de tiempo entre las fechas de adquisición de la imagen en la detección de los cambios en la vegetación utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) en un entorno contaminado por petróleo con base en un análisis de regresión. Su trabajo demostró que se requiere un mínimo de 225 bbl para que un derrame de petróleo sea detectable. En 2018, Adamu *et al.* emplearon el uso de cinco índices de vegetación, (1) índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), (2) índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), (3) índice de vegetación resistente ajustado 2 (ARVI2), (4) índice de infrarrojo verde (G-NIR) y (5) el infrarrojo verde de onda corta (G-SWIR) para detectar las zonas de pérdida de manglares vírgenes analizando la reflectancia espectral de la hoja y los índices de vegetación derivados discriminando espacialmente entre las zonas donde se registraron los derrames de petróleo y donde no hay presencia de derrames.

Pérez González y Rodríguez (2013) demostraron la importancia que tiene el uso y procesado de imágenes satelitales en los estudios de contaminación, pérdida de materia orgánica, salinización, movimientos de agua, sellado y erosión en el suelo. También resaltaron que el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) ofrece mejores resultados en los sensores TM y ETM+ del Landsat, ya que relaciona los canales rojos e infrarrojo próximo. Se destacan en tonos claros las áreas sanas con valores positivos y con colores oscuros la vegetación que ha sido afectada con los valores más bajos en la imagen satelital.

Arellano *et al.* (2015) investigaron posibles alteraciones bioquímicas en sitios contaminados por hidrocarburo en la región Amazónica del Ecuador, a través del uso de imágenes satelitales hiperespectrales del sensor EO-1 de Hyperion. Con un total de 3 sitios de interés, dos de ellos muestran

un nivel de contaminación menor o inexistente lo que sirvió de contraste al momento de analizar los datos y hacer las comparativas correspondientes. Una vez procesados los datos Hyperion aplicaron un total de 28 índices de vegetación solo 11 índices de vegetación (SG, NDVI, NDVI705, CTR2, GNDVI, LIC1, VOG1, OSAVI, MTCI, PSSRa y RS) registraron diferencias significativas y claras Finalmente, De los 11 índices solo 3 (SG, NDVI y NDVI705) explican el 83% de la capacidad para lograr discriminar la contaminación entre los sitios seleccionados que los índices de vegetación son sensibles a la detección de cambios en la actividad fotosintética de la vegetación, tales como el nivel de clorofila, la densidad del dosel o su vitalidad, siendo este de gran apoyo para la identificación y caracterización de sitios contaminados por hidrocarburo.

Así mismo Latorre Conde (2015), determinó la extensión de áreas afectadas por quema de crudo en Arauquita, Colombia. Para ello, estimó las zonas de afectación mediante un procesamiento de dos imágenes del Satélite Landsat, las imágenes datan del año 1996 para el pre-incendio y 1997 para el post incendio. Elaboró una serie de multitemporalidad en las imágenes para observar los cambios en diferentes índices de vegetación, entre ellos NDVI, SAVI Y GEMI, los cuales permitieron discriminar entre las coberturas vegetales con alta actividad fotosintética y las coberturas vegetales degradadas. Una vez identificadas las zonas afectadas, se aplicaron índices de quema para determinar las zonas quemadas, afectadas y vulnerables. Mediante una clasificación no supervisada en ENVI 5.0 y una clasificación supervisada de máxima verosimilitud se realizó un análisis comparativo cualitativo y cuantitativo que permitiera diferenciar los rasgos y diferencias espectrales contenidas en las imágenes procesadas. Dando como resultado un mapa temático de identificación del área afectada.

1.5. JUSTIFICACIÓN

La investigación propuesta surgió de la necesidad de analizar el nivel de cobertura vegetal afectado y/o contaminado cerca de la tubería de la unidad de rebombeo ubicada en la comunidad de Juandhó, municipio de Tetepango, a causa de un derrame de combustóleo en la zona el cual tuvo alcance hasta el canal de aguas negras Requena, mismo que es utilizado para el riego de cultivos de cinco municipios de la región. Ver anexo 1.

Búsquedas previas sugieren la escasez o nula investigación de estudios en el Estado de Hidalgo que adopten técnicas de percepción remota aplicada a la contaminación del suelo por hidrocarburos, siendo una herramienta que permitirá la optimización de recursos y genera precedentes en la implementación de técnicas de diagnóstico por medio de la percepción remota para contaminación de hidrocarburo en el suelo en el estado.

El presente estudio permitirá identificar el cambio de cobertura vegetal en los cultivos agrícolas mediante la elaboración de mapas de cambio en la zona. Es importante resaltar que nuestra área de estudio ha sido blanco de diferentes incidentes, en el año 2019 se reportaron al menos dos accidentes en la zona, una fuga de combustóleo y una explosión en el oleoducto. Lo anterior deja en claro la vulnerabilidad de los cultivos y el suelo de la zona afectada.

Es necesario dar visibilidad e importancia a este tipo de incidentes, ya que, si bien la zona es en su mayoría de productores agrícolas, el combustóleo tiene efectos perjudiciales tanto para el suelo como para los cultivos. Por tal motivo es indispensable contar con estudios en la zona para determinar las áreas afectadas y vulnerables en posibles futuros siniestros.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

Analizar la multitemporalidad de cobertura vegetal por derrame de hidrocarburos en suelos agrícolas mediante el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) para establecer su grado de afectación en la comunidad de Juandhó, Hidalgo, México.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar y seleccionar espacio temporalmente imágenes satelitales que cumplan con los criterios de aplicabilidad en la zona de estudio para un correcto procesamiento del NDVI.
- Cuantificar mediante el procesamiento de imágenes satelitales el análisis de cambio con bandas RGB, espectrales y NDVI evidenciando daños y pérdidas en la cobertura vegetal.
- Zonificar cultivos agrícolas mediante la selección del grado de afectación a partir del origen del derrame.
- Generar mapas de NDVI y vectorizar los resultados por medio de operaciones lógicas para obtener las estadísticas y representar los cambios de cobertura vegetal en las áreas afectadas por hidrocarburo.
- Generar mapas de pérdidas de cobertura vegetal y análisis de cambio por medio de QGIS para contar con una perspectiva espacial de la problemática estudiada que sirva de referencia en la toma de decisiones

1.7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El desarrollo intensivo de las actividades humanas ha provocado la degradación de los suelos, las principales causas son las prácticas inadecuadas de la agricultura y la contaminación por operaciones industriales; específicamente la industria petrolera mediante las labores de perforación, extracción, y transporte del hidrocarburo.

En el Estado de Hidalgo, el suelo se ve afectado principalmente por derrames negligentes y tomas clandestinas de hidrocarburo, a pesar de su magnitud menor, representan un daño ambiental que requiere ser atendido debido a la cantidad de situaciones que se presentan con cierta frecuencia. Además, el efecto de estos eventos puede generar un importante impacto ambiental a mediano plazo.

Un suelo contaminado por derrames de hidrocarburo conlleva a un deterioro en la estructura del recurso, la pérdida de materia orgánica y nutrientes minerales, retención del agua o mantenimiento de la cubierta vegetal, desafortunadamente la línea de contaminación no termina ahí, ya que el contaminante puede llegar a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos aumentando más el daño ambiental. Por otra parte, la afectación social provocada indirectamente, ocasiona a los productores un déficit económico por la disminución de la fertilidad, el bajo rendimiento de sus tierras o bien la pérdida de sus cosechas, incluso afecta la salud de la comunidad.

Por esta razón el estudio pretende identificar las zonas de afectación y pérdida que ocasiona un derrame de hidrocarburo en zonas agrícolas, mediante el uso de tecnologías de teledetección y la implementación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

2. Marco Teórico

2.1. Teledetección

Teledetección es el vocablo usado para referirse al término inglés “Remote Sensing”, que se traduce literalmente como percepción remota. Se refiere a la ciencia, técnica o, incluso “arte” para algunos, de obtener información (imágenes) de la superficie de nuestro planeta a distancia, sin entrar en contacto directo con él. (Labrador-García *et al.*, 2012). La teledetección no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación (Chuvienco, 1995).

Si hemos definido la teledetección espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una determinada aplicación (Chuvienco, 1995).

2.1.1. Elementos de un sistema de Teledetección

El fenómeno de la Teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. Estas tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado tanto por factores externos (ambientales) como por sus propias características fisicoquímicas en el momento de la toma de la imagen (Pérez-Gutiérrez, 2006).

El primer requerimiento supone disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía al objeto de interés (cultivo, bosque, mar, ciudad, etc.). El caso más habitual consiste en que esa fuente sea el Sol **(A)**. La radiación solar, en su “viaje” hacia la Tierra, atraviesa e interacciona con la atmósfera **(B)**. Una vez alcanza la superficie terrestre interactúa con los objetos que en ella se encuentran. La radiación reflejada dependerá de las características de esos objetos, permitiendo distinguir a unos de

otros **(C)**. Un sensor a bordo de un satélite recoge y graba esa radiación reflejada por la superficie terrestre y la propia atmósfera **(D)**. (Fig. 1)

La energía captada por el sensor se transmite a una estación de recepción y procesamiento donde los datos se convierten en imágenes digitales **(E)**. La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca de los objetos que fueron iluminados **(F)**.

El paso final del proceso de teledetección consiste en aplicar la información extraída de la imagen para conseguir un mejor conocimiento de la zona de estudio, revelando nuevas informaciones o ayudándonos a resolver un problema particular **(G)** (Labrador-García *et al.*, 2012).

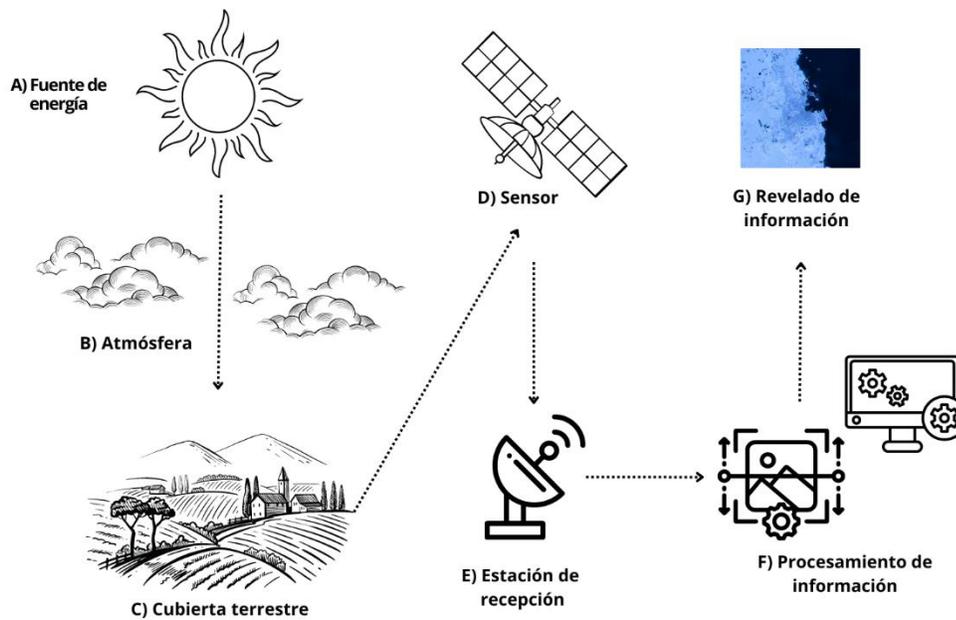


Figura 1. Elementos de un sistema de teledetección. *Elaboración Propia*

2.1.2. Principios físicos de la Teledetección

Chuvieco (1995), define la Teledetección como una técnica para obtener información a distancia sobre los objetos de la superficie terrestre, y para que ello sea posible es necesaria una interacción entre el sensor y el objeto percibido.

Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esta señal, además, no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que le ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir este árbol en plena oscuridad.

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética. Como es sabido, la energía térmica se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción y radiación (Chuvieco, 1995).

Se centrará principal atención en la radiación, ya que es parte fundamental dentro de los principios de la teledetección.

La radiación electromagnética puede ser explicada por dos teorías físicas, que en un principio parecían ser totalmente contrarias, pero actualmente han logrado compaginar.

La primera de ellas es la teoría ondulatoria donde la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio de propagación en el que actúan dos campos perpendiculares: el magnético y el eléctrico. Esta teoría se explica sobre la base de dos conceptos fundamentales que son: la longitud de onda (distancia entre dos crestas consecutivas) y la frecuencia (número de oscilaciones que realiza una onda en un punto fijo en determinada unidad de tiempo) (Fig. 2).

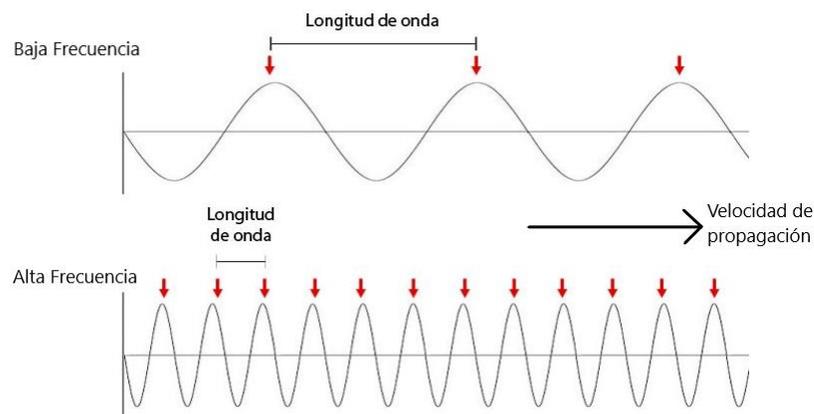


Figura 2. Representación gráfica de los componentes de la longitud de onda, su frecuencia y velocidad de propagación. Recuperado de la Oficina Europea de Recursos para la Educación Espacial en España (ESERO Spain)

La fórmula esencial en la que se sustentan estas teorías es la siguiente:

Ecuación 1. *Velocidad de propagación de la luz*

$$c = \lambda * F$$

Donde:

C = Velocidad de propagación de la luz ($3 \times 10^8 m/s$)

λ = Longitud de onda

F = Frecuencia.

De esta fórmula se deduce que longitudes de onda pequeñas tendrán altas frecuencias y viceversa (Pérez-Gutiérrez & Muñoz-Nieto, 2006).

La segunda, la teoría cuántica; nos explica el fenómeno de la radiación electromagnética basándose en sus propiedades energéticas siendo la fórmula esencial la siguiente:

Ecuación 2. *Energía de un fotón*

$$Q = h * F$$

Donde:

Q = Energía de un fotón (J)

h = Constante de Planck

F = Frecuencia.

Despejando F en la fórmula anterior y sustituyendo nos encontraríamos con la siguiente expresión (Pérez-Gutiérrez & Muñoz-Nieto, 2006):

Ecuación 3. *Energía de un fotón modificada*

$$Q = h \left(\frac{c}{\lambda} \right)$$

Lo que significa, en definitiva, que, a mayor longitud de onda o menor frecuencia, el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda larga es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran medios de detección más sofisticados (Chuvienco, 1995).

2.1.3. Espectro Electromagnético

De las fórmulas anteriores, se deduce que podemos describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes se le conoce como espectro magnético (Chuvieco, 1995) (Fig. 3).

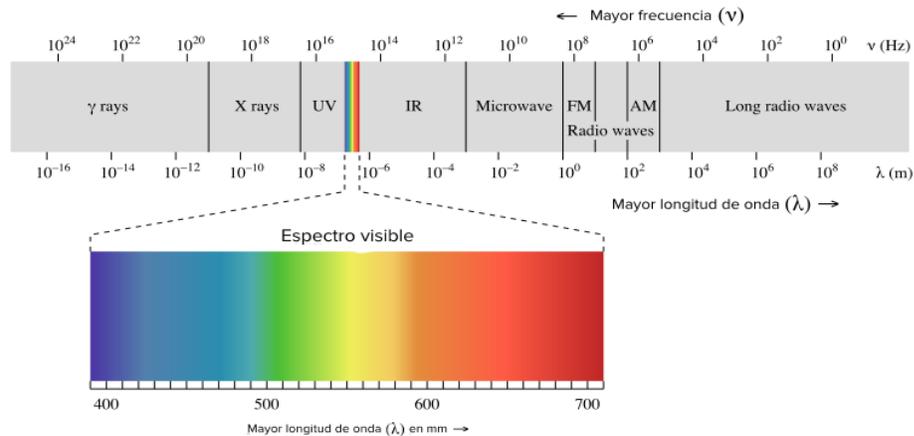


Figura 3. Imagen representativa del espectro electromagnético y sus bandas principales. Recuperado de la Universidad de California en Davis

Las principales bandas o regiones electromagnéticas que se utilizan en percepción remota son (Belward y Valenzuela, 1991):

- **Espectro visible** (0.4-0.7 μm). Se le denomina así por ser la única radiación electromagnética visible al ojo humano. En esta región, se distinguen tres bandas elementales: Azul (0.4–0.5 μm), Verde (0.5-0.6 μm) y Rojo (0.6-0.7 μm).
- **Infrarrojo cercano** (IRC, 0.7-1.3 μm). También conocido como infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo medio** (1.3 a 8 μm). En esta región se mezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Se divide en dos bandas, la primera se sitúa

entre 1.3 a 2.5 μm y se le denomina infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR) y la segunda comprendida entre 2.5 a 8 μm se le conoce como infrarrojo medio (IRM). Esta banda detecta la humedad atmosférica.

- **Infrarrojo Lejano o Térmico** (IRT, 8 a 14 μm). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres, siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (ej. incendios o volcanes activos).
- **Microondas** (M, por encima de 1 mm). Indica longitudes de ondas milimétricas. Esta banda es prácticamente transparente a la influencia atmosférica, es por ello por lo que se utilizan en zonas donde las cubiertas de nubes son frecuentes.

2.1.4. Reflectividad Espectral

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo con un patrón de respuesta espectral particular (Hernández & Montaner s. f.). Esta proporción de energía incidente que es reflejada por una superficie se le conoce como reflectividad espectral. Por lo tanto, es una magnitud adimensional que puede tomar valores entre 0 y 1 o porcentajes entre 0 y 100%. Para una determinada superficie este parámetro varía en función de la longitud de onda (Labrador-García *et al.*, 2012).

Es importante considerar que el flujo de energía recibido por el sensor no solo depende de la reflectividad de la cubierta, sino también de otros factores externos. Los más importantes son (Chuvieco, 1995):

- Las condiciones atmosféricas
- El emplazamiento ambiental de la cubierta
- La geometría de la observación.

Al gráfico de la reflectividad espectral frente a la longitud de onda se le denomina *firma espectral* (Labrador-García *et al.*, 2012). La cual hace referencia al modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda. (Fig. 4) Su forma característica de radiar energía sería la base para discriminar dicha cubierta, frente a otras (Chuvieco, 1995). La configuración de estas curvas permite extraer las características espectrales de una superficie y tiene una gran influencia sobre la elección de la región espectral en la cual los datos de teledetección se deben adquirir para una aplicación particular (Labrador-García *et al.*, 2012).

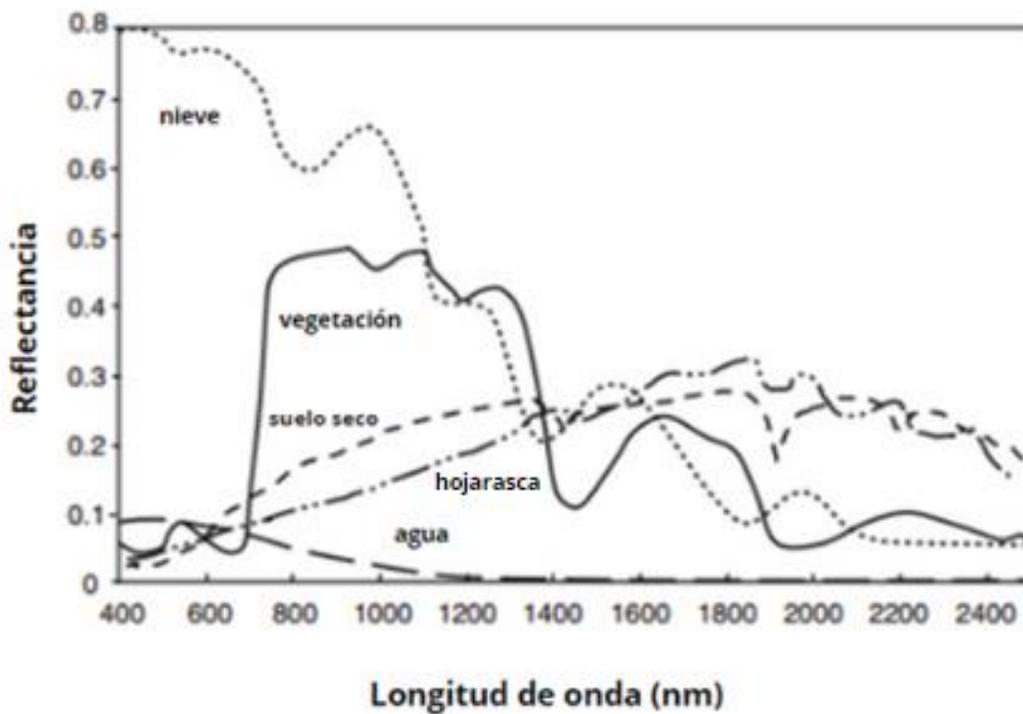


Figura 4. Firmas de reflectancia espectral de vegetación sana, suelo seco, hojarasca de hierba gris, agua y nieve. Recuperado y modificado de HUETE, A. R. (2004).

Una forma gráfica de estudiar este comportamiento es disponer los datos de reflectancia (%) en el eje Y y la longitud de onda λ en el eje X. Al unir los puntos con una línea continua se origina una representación bidimensional de la firma espectral.

Más allá del espectro visible, todos los materiales presentan respuestas espectrales características que se pueden detectar usando sensores óptico-electrónicos capaces de detectar energía

en la región infrarroja reflejada y térmica. Estos instrumentos pueden ser usados a nivel terrestre, en campo o en laboratorio, o montados en plataformas aéreas o satelitales (Hernández & Montaner, s. f.).

2.2. Características espectrales de la vegetación

La reflectividad (relación entre el flujo incidente y el flujo reflejado por una superficie) de cubiertas vegetales es una combinación de la reflectividad de las propias plantas y de la del suelo subyacente. Conforme una cubierta vegetal se desarrolla, la contribución del suelo disminuye progresivamente. Por ello, durante el crecimiento de las plantas, la reflectividad del visible y del IR medio disminuye en tanto que aumenta la del IR próximo (Ormeño-Villajos, 2006).

En primera instancia ha de considerarse la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. El comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a $0.55\mu\text{m}$). Por el contenido, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reproduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.

Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos fotosintéticos y del agua que almacenan las hojas. En concreto, la baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos (Chuvienco, 1995).

Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los $0.445\mu\text{m}$ (Fig. 5), mientras la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los $0.645\mu\text{m}$. Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los $0.55\mu\text{m}$, en donde el efecto absorbente es menor. Por dichas causas aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde de espectro visible, y causa el color con el que nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa.

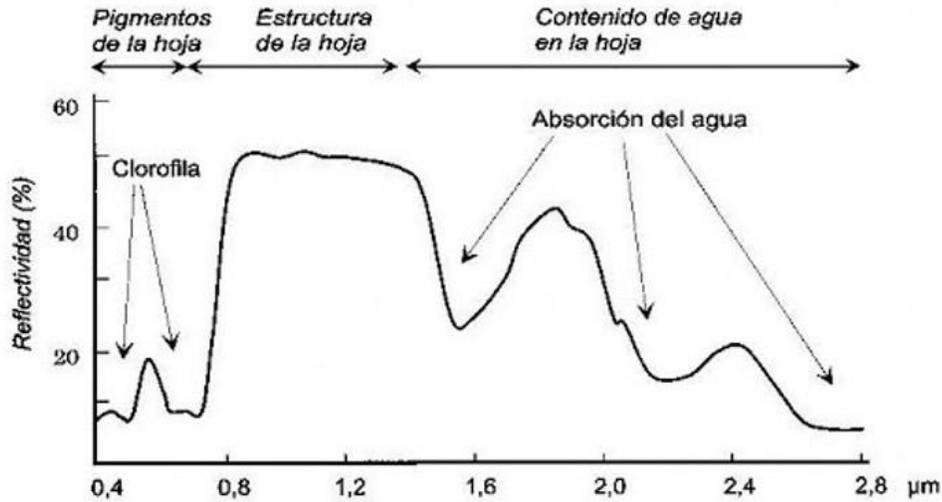


Figura 5. Firma espectral de la vegetación sana. Recuperado de Chuvieco (2008)

En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. En concreto, la capa esponjosa del mesófilo (tejido foliar donde se realiza la fotosíntesis), con sus cavidades de aire internas, ejerce un papel protagonista, al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación incidente en esa banda del espectro (Harris, 1987, en Chuvieco, 1995). Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (0,7 y 1,3 μm), en claro contraste con la baja reflectividad que ofrece en el espectro visible, especialmente con la banda roja. Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible (Chuvieco, 1995).

A partir de 1,4 μm , el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. Las medidas de laboratorio muestran una notable diferencia en esta región del espectro entre las hojas secas y las infiltradas con agua (Knippling, 1970; Curan, 1985, en Chuvieco, 1995). En experimentos con hojas de higuera, la reflectividad de la hoja seca lanzó hasta cuatro veces el valor de la hoja húmeda, para la banda situada en torno a 1,0 μm (Short, 1982, en Chuvieco, 1995) Entre estas bandas donde la absorción del agua es más clara, se sitúan dos picos relativos de reflectividad, en torno a 1,6 μm y 2,2 μm . El sensor no mide hojas aisladas, sino agrupaciones

de hojas formando masas de vegetación, por lo que intervienen otros elementos adicionales que complican el esquema previo (Chuvieco, 1995).

Pese a la complejidad final, es evidente que estas ideas nos sirven para centrar el estudio científico de la vegetación a partir de sensores espaciales. De ellas resulta evidente que el contraste más nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, especialmente el rojo (en torno a $0.645\mu\text{m}$), y el infrarrojo cercano (0.7 a $1.3\mu\text{m}$). De ahí que podemos enunciar como principio genérico, que cuando mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta (Chuvieco, 1995).

Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrará en un comportamiento espectral más o menos alejado del anteriormente expuesto. La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofílica y por consecuencia a ofrecer una menor absorptividad (relación entre el flujo incidente y el flujo que absorbe una superficie) en las bandas azul y roja del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en el verde, por lo que la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja. La curva espectral, por tanto, se hace más plana, menos cromática (Murtha, 1978; Knipling 1970).

Es importante destacar que el espectro de la reflectancia de las cubiertas vegetales estará influenciado por el suelo alrededor. Es decir, si la cantidad de vegetación es menor a la que ocupa el suelo en el espectro de reflectancia, las características que arrojará la reflectancia estarán asociadas en su mayoría al suelo que a las cubiertas vegetales (Reuter, 2009, como se citó en Latorre-Conde, 2015).

2.2.1. Radiación energética en el infrarrojo térmico

El infrarrojo térmico nos permite detectar el calor que procede de las distintas cubiertas. La radiación espectral que recibe el sensor no es el resultado de la reflexión de la energía solar sobre la superficie terrestre, sino de la propia emitancia de esta función de su temperatura.

La emitancia espectral (energía total radiada en diferentes direcciones desde un área y por cierta unidad de tiempo) de un objeto está directamente relacionada con su temperatura absoluta. A la vez, ésta se relaciona con su capacidad para absorber la radiación solar incidente. Es preciso tener en cuenta que la emisividad espectral de un objeto es equivalente a su ϵ , es decir a mayor absorción, mayor emisión.

La emisividad (radiación térmica emitida por una superficie o cuerpo debido a su temperatura) de un tipo de cubierta es una medida relativa, que pone en relación su emitancia con la de un cuerpo negro. Una alta emisividad (cercana a 1) indica que un objeto absorbe y radia una gran porción de la energía incidente, mientras una baja emisividad considerablemente inferior a 1, refiere a un objeto que absorbe y radia una pequeña porción de la energía incidente (Chuvienco, 1995).

2.2.2. Comportamiento espectral de la vegetación en el infrarrojo térmico

Las propiedades térmicas de la vegetación son bastante complejas, puesto que absorbe una gran cantidad de la energía solar que recibe para realizar la función clorofílica. La inercia térmica de la vegetación es alta gracias a su importante contenido de humedad, que supone un elemento básico para la vida de las plantas. Desde el punto de vista térmico uno de los procesos más destacados en la señal ofrecida por la vegetación, es la evapotranspiración, que supone una liberación de calor para realizar el tránsito del agua almacenada en las hojas al estado gaseoso.

Otro factor importante que afecta a la emisividad de la vegetación es su extensión y densidad. Las grandes superficies verdes producen una elevada radiación, que puede ser incluso 30 veces superior a la correspondiente a los suelos vecinos. Ello reduciría la temperatura de estas superficies, tanto durante el día como durante la noche.

Este comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación, que se basan en el contraste entre las bandas rojo e infrarrojo cercano del espectro. Se construyen a partir de la combinación lineal entre estas dos bandas, cuando disponemos de una imagen multispectral (Chuvieco, 1995).

2.3. Características espectrales de sustancias contaminantes en el suelo

La interacción entre los contaminantes y el suelo está en función de las características físicas y químicas del compuesto orgánico, suelo y otros parámetros externos como el clima descritos en la tabla 1. Por ejemplo, la presencia de arcillas en el suelo es un factor que aumenta persistencia de sustancias tóxicas en el suelo, mientras que la materia orgánica es importante en la adsorción de contaminantes orgánicos (Ortínez, 2003 como se citó en Reséndez-Hernández, 2008).

Tabla 1. Parámetros que influyen en el transporte de contaminantes en suelo. (Fuente: Ortínez et al., 2003)

Parámetros del contaminante	Parámetros del suelo	Parámetros ambientales
Solubilidad	Contenido y retención agua	Temperatura
Presión de vapor	Porosidad, densidad y permeabilidad	Precipitación
Número y tipo de grupos funcionales	Contenido de arcilla	Evapotranspiración
Polaridad	Contenido de materia orgánica Profundidad de agua subterránea	

2.3.1. Características espectrales de hidrocarburos

La aplicación de la percepción remota en la identificación de hidrocarburos ha sido utilizada como herramienta para establecer los límites de las manchas de contaminación tanto en agua como en suelo. La identificación se ha realizado con sensores pasivos y activos, siendo estos últimos muy utilizados en la identificación de derrames de crudo en mar.

En el estudio realizado por Ellis *et al.* (2001) en Reséndez-Hernández, (2008), se analizaron imágenes hiperespectrales en conjunto con las firmas espectrales de suelos donde existen micro fugas de hidrocarburos al sur de California, y concluyen que los sensores tienen la suficiente resolución para poder

detectar hidrocarburos que no estén excesivamente enmascarados o sean muy sutiles. Además, tanto Ellis *et al.* (2001) como Roper & Dutta (2006) citado en Reséndez-Hernández, (2008), coinciden en que existe una banda de fuerte absorción de hidrocarburos alrededor de 2.31 μm . Roper & Dutta menciona otra banda de fuerte absorción cercana a 1.73 μm , Salem *et al.* (2002) en Reséndez-Hernández, (2008), mencionan características de fuerte absorción alrededor de la banda de 0.67 μm para derrames de hidrocarburos crudo en agua, y consideran esta banda como un buen indicador para detectar altas concentraciones de hidrocarburos. Kühn *et al.* (2004) como se citó en Reséndez-Hernández, (2008), proponen la evaluación espectral de suelos con hidrocarburos a partir de un índice con base en la banda 1.73 μm obteniendo resultados favorables en la discriminación entre suelos limpios y contaminados por hidrocarburos. Esta banda coincide en uno de los rangos que menciona Workman (1998) en Reséndez-Hernández, (2008), en la que por procesos vibracionales del enlace C-H, se presenta una característica de absorción (Reséndez-Hernández, 2008).

2.4. Combinación de bandas espectrales (RGB)

Una de las potencialidades de la Teledetección aplicadas al estudio del medio que nos rodea, es la capacidad de discriminar diferentes cubiertas vegetales, usos de suelo, masas de agua, o la detección de fenómenos naturales o provocados por la actividad humana. Esto puede analizarse gracias a la existencia de las diferentes bandas multispectrales con las que cuentan los satélites de hoy día.

Podremos distribuir las bandas de las imágenes de satélite a través de tres canales: rojo, verde y azul (Red-Green-Blue, RGB). El paso de cada banda por estos canales dotará de diferentes tonalidades los elementos dependiendo de la respuesta de estos frente a las longitudes de onda.

La visualización de una imagen captada por un satélite es más representativa cuando se realiza con una composición de colores, ya que el ojo humano percibe mejor las diferencias de color que de niveles o tonos de gris.

El máximo de bandas que podemos emplear por composición es de tres y la apariencia dependerá de las bandas espectrales que asignemos a los canales rojo, verde y azul del monitor. El proceso permite visualizar, simultáneamente, información de distintas regiones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas.

Con la proliferación de sensores hiperespectrales, las posibilidades de realizar composiciones en color de bandas son prácticamente ilimitadas, aunque solo algunas tendrán un interés específico para una determinada aplicación y muchas de ellas serán casi idénticas. (Alonso, 2023).

Las bandas empleadas en el trabajo de investigación son las siguientes:

- Infrarrojo (RGB843)

Esta combinación está compuesta por las bandas Infrarrojo cercano (8), Rojo (4) y Verde (3).

La vegetación vigorosa se refleja fuertemente en el NIR y aparece en tonos de rojo brillante, permitiendo una fácil identificación entre la vegetación sana y la vegetación enferma o escasa (Fig. 6). Las diferentes variaciones en los tonos de la imagen indican diferentes condiciones de la cobertura vegetal:

- Rojo, indica una vegetación sana y bien desarrollada.
- Rosa, áreas vegetales menos densa o con vegetación menos desarrollada.
- Blanco, áreas con escasa o nula vegetación.
- Azul oscuro o negro indica la presencia de agua.
- Marrón, vegetación arbustiva muy variable.
- Beig-dorado, zonas de transición, prados secos asociados a matorral ralo.



Figura 6. Combinación de bandas para Infrarrojo (843) del año 2020. Las zonas con vegetación sana se presentan en tonalidades rojo brillante. Modificado de la escena Copernicus, 2020.

- Uso agrícola (RGB1182)

Esta combinación está compuesta por las bandas de onda corta infrarroja (11), visible e infrarrojo cercano (8A) y azul (2). Es particularmente efectiva para la agricultura de precisión, mostrando la vegetación saludable en tonos verdes brillantes debido a la alta reflexión en el NIR. Las parcelas con cultivos agrícolas resaltan de aquellas que no presentan una cosecha en tonos de verde brillante (Fig. 7).

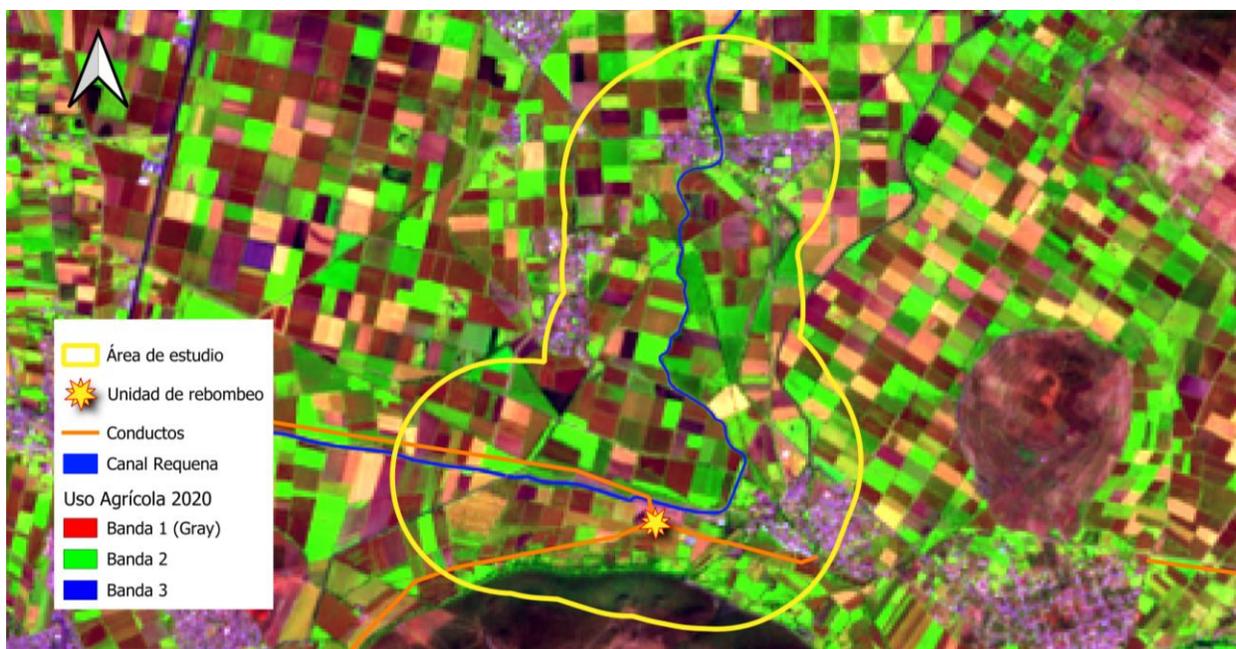


Figura 7. Combinación de bandas para uso agrícola (11, 8a, 2) del año 2020. Las áreas en color verde brillantes representan los cultivos presentes en la zona. Modificado de la escena Copernicus, 2020.

- Color natural (RGB432)

Esta combinación está compuesta por las bandas visibles Rojo (4), Verde (3) y Azul (2). Los colores en la imagen resultante son lo más parecido a lo que el ojo humano pudiera percibir observando la escena directamente. Facilita la interpretación a gran escala si hablamos de cambios en el entorno presentando una visión clara y comprensible de la superficie terrestre (Fig. 8).

- Análisis de vegetación (RGB8112)

Esta combinación está compuesta por las bandas visible e infrarrojo cercano (8A), onda corta infrarroja (11) y azul (2) (Fig. 9). La combinación está diseñada para un análisis avanzado de la vegetación que permite destacar características del suelo y la vegetación. Es útil para identificar áreas de estrés hídrico y variaciones en la salud de las plantas brindando información detallada sobre la salud de las plantas, el contenido de agua en el suelo y la identificación de áreas de estrés hídrico (Alonso, 2023).



Figura 8. Combinación de banda para color natural (4, 3, 2) para el año 2020. Modificado de la escena Copernicus, 2020.

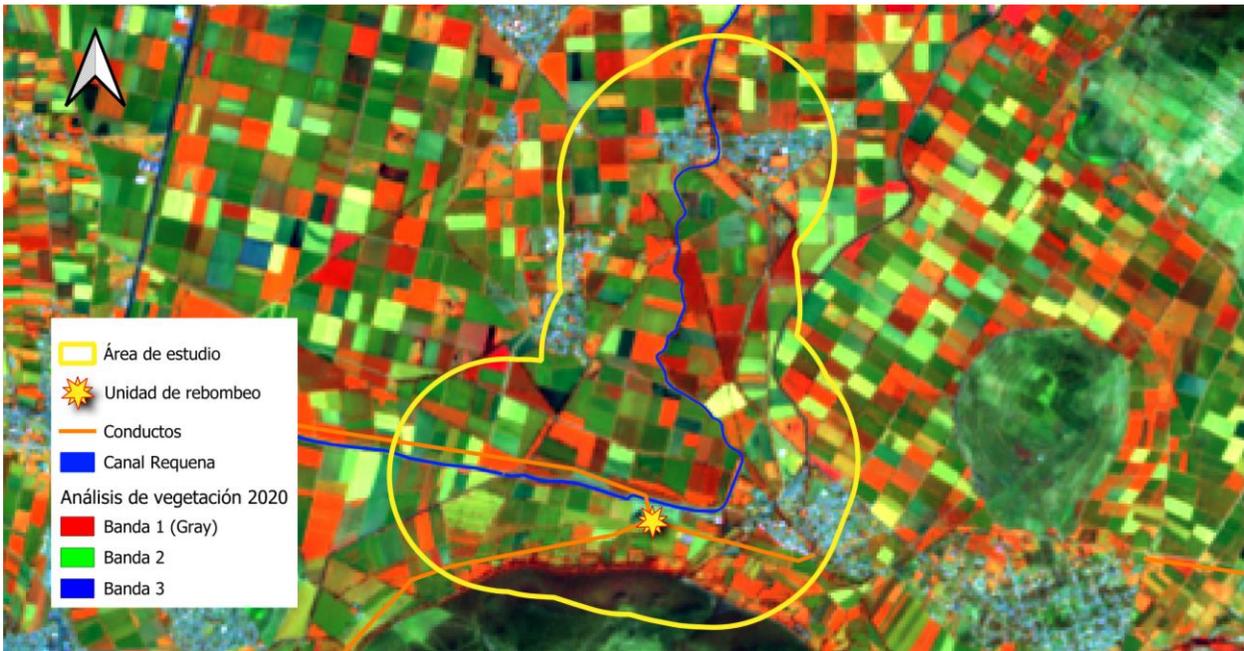


Figura 9. Combinación de bandas para análisis de vegetación (8a, 11, 2) del año 2020. Las zonas en tonos naranja realzan las zonas con vegetación vigorosa. Modificado de la escena Copernicus, 2020.

2.5. Índices de vegetación

Las imágenes multispectrales obtenidas de forma remota contienen una combinación de bandas que crea una imagen compuesta que se utilizará para interpretación y análisis. Con imágenes multispectrales, las bandas individuales en la composición de bandas se pueden transformar para lograr que ciertas características y patrones se destaquen mejor.

Las transformaciones de bandas de imágenes se han convertido en una práctica común para generar nuevas imágenes a partir de dos o más bandas de imágenes para la extracción de información. Las nuevas imágenes generadas de esta manera mejoran las representaciones de objetos terrestres como la vegetación (Xue y Su 2017, como se citó en Huang *et al.*, 2020).

A la combinación de bandas, se le como índice de vegetación (IV). Este índice es un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Navarro *et al.*, 1996). Existen más de 100 índices de vegetación, y la combinación de las bandas varía en función de la información que se pretende investigar. Los IV se pueden aplicar a diferentes áreas de estudio, en su mayoría están enfocados a múltiples factores de vegetación, tales como el estrés, contaminación, perdida, cambios de cobertura, áreas quemadas, entre otros. De igual forma se pueden aplicar a estudios atmosféricos, hídricos o edafológicos.

2.5.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada, mejor conocido como NDVI, se utiliza para estimar la biomasa relativa de la vegetación. La absorción en la banda roja se debe a la presencia de clorofila y la reflexión significativamente alta en el infrarrojo cercano se debe a la estructura interna de la hoja (Somvanshi & Kumari, 2020).

Kriegler *et al.* (1969) en Huang *et al.*, (2020), propusieron una transformación de banda simple: radiación del infrarrojo cercano (NIR) menos radiación roja dividida por radiación del infrarrojo cercano más radiación roja dando como resultado una imagen recientemente simplificada llamada Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, siendo sumamente atractivo debido a su capacidad para delinear rápidamente la vegetación y el estrés vegetativo, lo que tiene un gran beneficio en la agricultura comercial y los estudios de uso de la tierra.

El objetivo general del uso del NDVI es mejorar el análisis de la información sobre la vegetación con datos de detección remota. Los estudios han demostrado que el NDVI es eficaz y útil para diferenciar sabanas, bosques densos, campos no forestales y agrícolas y para estimar diversas propiedades de la vegetación, incluido el índice de área foliar, la biomasa, la concentración de clorofila en las hojas, productividad de las plantas, cobertura vegetal fraccionada y entrés en las plantas (Huang *et al.*, 2020).

2.5.2. Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Matemáticamente, el NDVI se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 4. Índice de vegetación de diferencia normalizada

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Donde:

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada.

NIR y RED = Mediciones de radiancia espectral (o reflectancia) registradas con sensores en las regiones roja (visible) y NIR respectivamente.

La radiancia (vatios estereorradián 1 m² μm⁻¹) es la medida del flujo de energía registrada por un sensor. Los valores de radiancia a menudo se resécala a números digitales (DN) como enteros sin signo de 6 o 7 bits (MSS), 8 bits (TM, ETM+) o 12 bits (Landsat8). La reflectancia es una medida sin unidades de la relación entre la radiación reflejada por un objeto y la radiación incidente sobre el objeto. Los valores

de NDVI varían de -1 a 1 independientemente del uso de radiancia, reflectancia o DN como entrada (Huang *et al.*, 2020).

2.5.3. Interpretación de valores del NDVI en una imagen satelital

La interpretación de clases y detección de cambios en la cobertura vegetal de áreas extensas son actividades que se viabilizan mediante el uso de tecnologías y métodos asociados a la Percepción Remota. Imágenes satelitales de media y alta resolución espacial y espectral constituyen herramientas fundamentales para la ejecución de proyectos que tienen como objetivo principal la clasificación de la cobertura vegetal y la detección de sus variaciones temporales (Jaramillo & Antunes, 2018).

Los valores de NDVI oscilan entre $+1,0$ y $-1,0$. Las áreas de roca estéril, arena o nieve suelen mostrar valores de NDVI muy bajos (por ejemplo, $0,1$ o menos). La vegetación escasa, como arbustos y pastizales o cultivos senescentes, puede dar lugar a valores moderados de NDVI (aproximadamente $0,2$ a $0,5$). Los valores altos de NDVI (aproximadamente $0,6$ a $0,9$) corresponden a una vegetación densa como la que se encuentra en los bosques templados y tropicales o en cultivos en su etapa máxima de crecimiento (NDVI, The Foundation For Remote Sensing Phenology | U.S. Geological Survey, 2018).

Para la elaboración de este trabajo se toma en cuenta los cultivos agrícolas como cobertura principal debido a que nuestra área de estudio está dedicada únicamente a la agricultura. Para ello es necesario la búsqueda de una clasificación que se adecue a las necesidades del estudio.

Con base a la información de Mejía *et al.* (2021) logramos obtener un mejor detalle en cuanto a los valores de las cubiertas vegetales en comparación con otras bibliografías donde (1) su manejo de valores era estándar y (2) la cobertura vegetal no era la adecuada para el estudio. Teniendo como resultado una clasificación con 5 categorías descritas en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación NDVI de Mejía et al. (2021)

Categoría	Rango	Tipo	Descripción
1	-n - 0,2	Sin vegetación, agua, sombras	Gran parte de estos suelos corresponden principalmente a zonas oscuras y vinculadas a ríos
2	0,2 - 0,45	Suelo sin cobertura o escasa vegetación	Se ha visto que este suelo coincide con las áreas urbanas
3	0,45 - 0,55	Vegetación escasa	Gran parte de estos suelos corresponden a suelos en procesos de transformación, pastizales
4	0,55- 0,65	Vegetación dispersa	Suelos vinculados con actividades agrícolas y vegetación arbustiva y herbácea
5	0,65- 1	Bosque	Suelo con abundante vegetación arbustiva

2.6. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales también conocidas como imágenes de observación de la Tierra, fotografías desde el espacio o simplemente fotografías de satélite son el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial, mediante la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo, que posteriormente se transmite a estaciones terrenas para su visualización, procesamiento y análisis. (Axessnet, 2023)

El uso principal de las imágenes satelitales es la observación y estudio de la Tierra, por lo tanto, existe una amplia gama de aplicaciones, tales como la cartografía, el ordenamiento territorial, la monitorización del clima o desastres naturales, la minería, la gestión de recursos naturales, entre otros. También permiten el seguimiento de cambios en el tiempo, como la evolución de los patrones climáticos, la deforestación o el crecimiento urbano. Además, gracias a los avances tecnológicos, las imágenes satelitales han mejorado en términos de resolución espacial y espectral, lo que permite una mayor precisión y detalle en la información que proporcionan.

2.6.1. Satélite Sentinel

La Agencia Espacial Europea por sus siglas en inglés ESA, desarrolló una serie de misiones de observación de la Tierra de próxima generación en conjunto con la Comisión Europea Copernicus (European Space Agency, s. f.). Misiones diseñadas para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana (Instituto Geográfico Nacional, s. f.).

En el año 2014 la ESA implementó una serie de misiones denominada Sentinels. Cuyo objetivo principal es reemplazar las misiones de observación de la Tierra más antiguas que se han retirado, como las misiones ERS y Envisat, o que actualmente se acercan al final de su vida operativa (European Space Agency, s. f.). La constelación Sentinel consta de 7 misiones en operación donde cada misión cumple con un objetivo de observación diferente (Tabla 3).

Tabla 3. Misiones Sentinel (Agencia Espacial Europea, s. f.)

Misión	Objetivo	Fecha de lanzamiento
Sentinel -1	Monitoreo terrestre y oceánico	abril de 2014.
Sentinel -2	Monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre y apoyar el seguimiento de los cambios en la superficie de la Tierra.	junio de 2015.
Sentinel -3	Observación marina y estudio de la topografía de la superficie del mar, la temperatura de la superficie del mar y la tierra, así como el color de la tierra y el océano.	-
Sentinel -4	Monitorear aerosoles y gases traza clave para la calidad del aire en Europa en apoyo del Servicio de Monitoreo Atmosférico de Copernicus (CAMS) con alta resolución espacial y con un tiempo de revisión rápido.	-
Sentinel -5	Proporcionar un seguimiento continuo de la composición de la atmósfera terrestre, así como proporcionar datos de cobertura global de amplia franja para monitorear la calidad del aire en todo el mundo.	-
Sentinel -5P	Es una misión satelital precursora encargada de realizar mediciones atmosféricas, con alta resolución espaciotemporal, relacionadas con la calidad del aire, el forzamiento climático, el ozono y la radiación ultravioleta.	13 de octubre de 2017.
Sentinel -6	Monitorear los cambios globales en el nivel del mar y garantizar un registro completo del nivel del mar para las próximas décadas.	24 de noviembre de 2020.

2.6.2. Sentinel 2

Sentinel-2 es una misión de observación de la Tierra del Programa Copernicus de la UE que adquiere sistemáticamente imágenes ópticas de alta resolución espacial (10 m–60 m) sobre tierra y aguas costeras. La misión es una constelación con dos satélites gemelos (Sentinel-2A y Sentinel-2B). Ambos satélites llevan todos los instrumentos multiespectrales (Zhang *et al.*, 2018, citado en Somvanshi & Kumari, 2020), en fase de 180° entre sí. La misión respalda una amplia gama de servicios y aplicaciones, como monitoreo agrícola, gestión de emergencias, clasificación de la cobertura terrestre y calidad del agua (Somvanshi & Kumari, 2020).

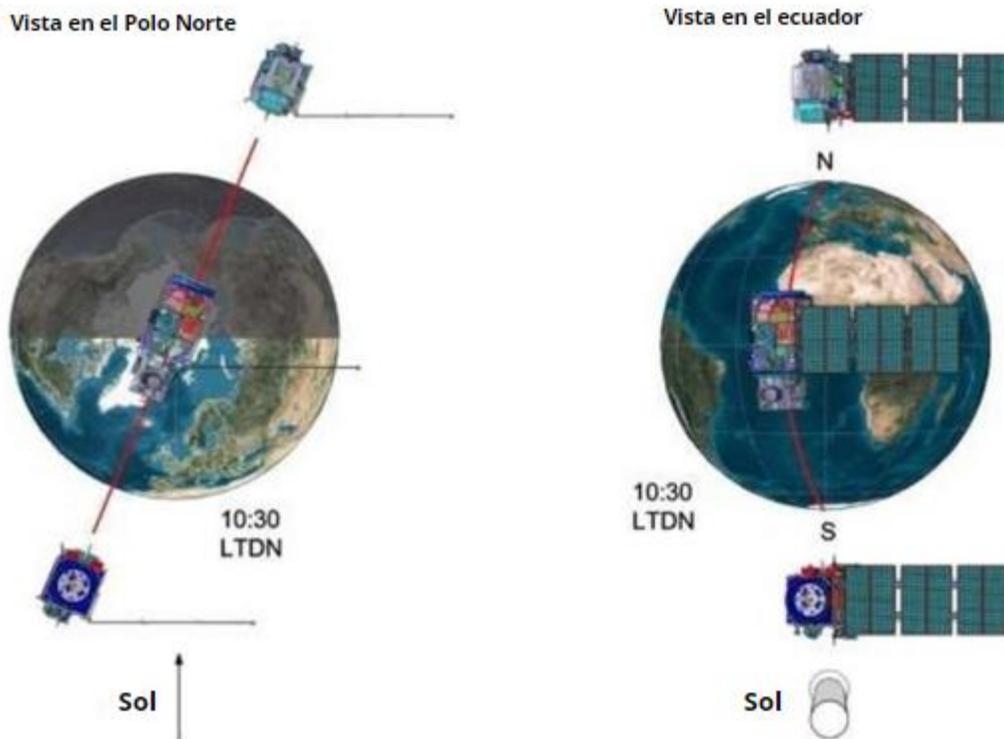


Figura 10. Configuración orbital del doble satélite SENTINEL-2. Recuperado y modificado de European Space Agency.

2.6.3. Resolución de una imagen Sentinel-2

- Resolución espacial: Sentinel muestrea un total de 13 bandas espectrales: cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m de resolución espacial. La anchura de la franja orbital es de 290 km.
- Resolución espectral: Los datos de SENTINEL-2 se adquieren en 13 bandas espectrales en V-NIR (visible e infrarrojo cercano) y SWIR (infrarrojo de longitud corta) descritas en la tabla 4.

Tabla 4. Resolución espectral de las bandas de Sentinel 2A (European Space Agency, 2015)

Banda	Resolución Espectral	Resolución Espacial
1 – Azul (Costa y Aerosol)	443nm	60m
2 – Azul	490nm	10m
3 – Verde	560nm	10m
4 – Rojo	665nm	10m
5 – Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	705nm	20m
6 – Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	740nm	20m
7 – Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	783nm	20m
8 – Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	865nm	20m
8b – Visible e Infrarrojo cercano (VNIR)	842nm	10m
9 – Onda corta infrarroja (SWIR – Vapor de agua)	940nm	60m
10 – Onda corta infrarroja (SWIR – Cirrus)	1375nm	60m
11 – Onda corta infrarroja (SWIR)	1610nm	20m
12 – Onda corta infrarroja (SWIR)	2190nm	20m

- Resolución radiométrica: La resolución radiométrica del instrumento MSI es de 12 bits, lo que permite adquirir la imagen en un rango de 0 a 4 095 valores potenciales de intensidad de luz (European Space Agency, 2015). Recordemos que entre más grande sea la resolución radiométrica mejor podrá ser nuestra interpretación debido a la precisión de la imagen.
- Resolución temporal: La frecuencia de revisita de cada satélite es de 10 días y la revisita combinada de la constelación es de 5 días (European Space Agency, 2015).

2.6.4. Correcciones y preprocesamiento de una imagen Sentinel-2

Para el procesamiento de imágenes satelitales es importante su tratamiento y procesamiento de datos previos, es decir que de los datos obtenidos deben pasar por una serie de correcciones para la depuración de los valores y tener un mejor tratamiento de la información a la hora de trabajar con ella.

Los productos Sentinel-2 de la misión 2A incluyen diferentes niveles de procesamiento donde los datos se han corregido y calibrado para la corrección de la radiometría, la geometría y la eliminación de efectos atmosféricos. Los datos son reflectancias de superficie Top of Atmosphere (TOA), es decir, datos que representan la cantidad de luz reflejada por la superficie de la Tierra sin considerar los efectos atmosféricos. Correcciones útiles y ya incluidas para aplicaciones que requieren una corrección

atmosférica y análisis cuantitativos de la superficie terrestre, como la monitorización de la vegetación, la gestión agrícola y la detección de cambios en el uso del suelo.

2.7. Fisiología de las plantas frente a un factor contaminante externo: Hidrocarburo

Los derrames de hidrocarburos de petróleo ocasionan perturbaciones en los ecosistemas al afectar su estructura y bioprocesos. Este tipo de contingencias ambientales originan efectos directos sobre la biota, ya que el petróleo contiene compuestos químicos tóxicos que producen daños a las plantas, pero principalmente sobre las poblaciones de microorganismos, los cuales representan parte importante del ecosistema y son claves para los procesos biogeoquímicos (Vasudevan y Rajaram, 2001, en Zamora *et al.*, 2012).

Los derrames de petróleo en el entorno natural inmediato pueden provocar estrés en la vegetación natural circundante (Freedman 1995; Li, Ustin y Lay 2005 como se citó en Adamu *et al.* (2018)). La vegetación natural sirve como medio para el intercambio atmosférico de agua y gas, fuente y sumidero en los ciclos biogeoquímicos (Castell, Terradas y Tenhunen 1994; Schulze, Beck y Hohenstein 2005; Schulze 1986 en Adamu *et al.* (2018)). Por lo tanto, cualquier alteración en el ciclo biogeoquímico de la planta debido al impacto del petróleo, la vegetación puede usarse como un indicador para detectar la presencia de contaminación. La contaminación conduce a la defoliación y deformación de las hojas, cambios en la densidad de la vegetación y distribución de las plantas (Hoff *et al.* 2002 en Adamu *et al.* (2018)).

La salud y el vigor de la vegetación pueden verse afectados por los hidrocarburos a través del derrame sobre raíces, tallos, hojas y suelo (UNEP 2011; Van Der Meijde *et al.* 2009; Lin *et al.* 2002). Simonich y Hites (1995) en Adamu *et al.* (2018)), explicaron que la sedimentación de partículas de hidrocarburos y su contenido gaseoso en las hojas y la ingesta a través de los estomas de las hojas pueden afectar la vegetación. (Noomen (2007) en Adamu *et al.* (2018)) ha demostrado que los hidrocarburos pueden tener un efecto negativo en las plantas y que la falta de oxígeno en el medio ambiente del suelo

junto con el aumento de dióxido de carbono (CO₂) son algunos de los factores responsables del estrés en las plantas. En respuesta a la concentración del derrame de petróleo, el color de las hojas de las plantas cambia con la pérdida de pigmentos de fotosíntesis ((Pezeshki *et al.* 2000; Yang *et al.* 2000) como se citó en Adamu *et al.* (2018)).

2.8. El suelo y su comportamiento

Los suelos constituyen una cubierta delgada en la superficie terrestre, de unos pocos centímetros a varios metros. Como cuerpo natural, el suelo constituye una interfase que permite intercambios entre la litosfera, la biosfera y la atmósfera.

Los suelos permiten el enraizamiento de las plantas (anclaje), con lo que estas pueden obtener agua, oxígeno y nutrientes. Gracias al suelo y la radiación solar, las plantas, por medio de la fotosíntesis, producen alimentos, forrajes, fibras, masas forestales, y energías renovables. Los suelos son la base de todos los ecosistemas terrestres por lo que hacen posible la vida en el planeta (Porta *et al.*, 2012).

Como productor de alimentos, el suelo es la base para la vida humana y animal; permite la implantación de las raíces de las plantas, y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas (Flores-Puente *et al.*, 2004).

2.8.1. Clasificación de suelos

Por su origen se clasifican en:

- Suelos residuales: Se forman en el mismo punto donde las rocas son desintegradas por los agentes físicos, químicos y biológicos.
- Suelos sedimentarios: Se forman por la acumulación de partículas y restos provenientes de otros sitios que han sido arrastrados por agua o viento.

Por su composición se clasifican en:

- Suelos arenosos: Compuestos principalmente de arena. Son muy permeables, y de color gris.
- Suelos arcillosos: Compuestos en su mayoría por arcilla. Son pesados y compactos, y además poco permeables. Son de color rojizo. Son aptos para la agricultura.
- Suelos magros o limosos: Son una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla; son muy aptos para la agricultura.
- Suelos humíferos: Poseen gran cantidad de humus, y debido a su alto contenido de materia orgánica resultan aptos para cualquier actividad agrícola. Son de color negruzco.
- Suelos calcáreos: En ellos se cultiva maíz y cebada. Requieren ser abonados y regados con abundante agua. Las sales calcáreas les da un color blanquecino (Flores-Puente *et al.*, 2004).

2.8.2. Consecuencias de la degradación del suelo por contaminación de hidrocarburos

En los suelos contaminados por hidrocarburos se alteran las características físico-químicas y biológicas; en México se tienen afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas (Cavazos-Arroyo, 2014, citado en Díaz-Vega *et al.*, 2023); la contaminación del suelo por hidrocarburos afecta la flora, fauna y microorganismos del suelo (Martínez y López, 2001 en Díaz-Vega

et al., 2023); cuando los hidrocarburos cubren la superficie del suelo, interrumpen la interacción electrostática entre la superficie de las partículas del suelo y el agua, reduciendo su capacidad de retención de agua (Díaz-Vega *et al.*, 2023).

Principales consecuencias de la contaminación por derrame de hidrocarburo:

- Pérdida de nutrientes (N, P, S, K, Ca, Mg): Puede ser de manera directa, bien al ser eliminados por las aguas que se infiltran en el suelo, o bien por erosión a través de las aguas de escorrentía, o de la forma indirecta, por erosión de los materiales que los contienen o que podrían fijarlos.
- Modificación de las propiedades fisicoquímicas: Acidificación, desbasificación y bloqueo de los oligoelementos que quedan en disposición no disponible.
- Deterioro de la estructura: La compactación del suelo produce una disminución de la porosidad; genera un encostramiento superficial; por tanto, aumenta la escorrentía.
- Disminución de la capacidad de retención del agua: Por degradación de la estructura o por pérdida del suelo. Esta consecuencia es especialmente importante para los suelos andaluces sometidos a escasas precipitaciones anuales.
- Pérdida física de materiales: Erosión selectiva (parcial, de los constituyentes más lábiles, como los limosos), o masiva (pérdida de la capa superficial del suelo, o en los casos extremos de la totalidad del suelo).

La contaminación por presencia de sustancias tóxicas al modificarse las propiedades del suelo, y una disminución de la masa del suelo tienen dos consecuencias generales:

- A corto plazo: Disminución de la producción y aumento de los gastos de explotación (cada vez, el suelo necesita mayor cantidad de abonos y cada vez produce menos).
- A largo plazo: Infertilidad total, abandono, desertización del territorio.

- Es por ello por lo que se debe tener en cuenta que es algo real, y que en la actualidad grandes porciones de suelo están siendo afectadas por hidrocarburos y demás sustancias peligrosas (Flores-Puente *et al.*, 2004).

2.9. Hidrocarburo; naturaleza y comportamiento

En un contexto de suelos agrícolas es importante diferenciar entre el suelo superficial y el subsuelo. La porción del suelo de importancia agrícola es la zona donde se acumulan las raíces (rizósfera); es decir, los primeros 30cm para la mayoría de los cultivos, y hasta 1-1,5m para algunos árboles frutales (Porta *et al.*, 1999 en Adams. *et al.*, 2008). El suelo debajo de esta zona de raíces es de poca importancia agrícola para la mayoría de los cultivos, y el aporte de nutrientes y humedad de esta zona a las plantas es mínimo, sin embargo, que la zona por debajo de las raíces puede considerarse como una fuente de contaminación al agua subterránea (Adams. *et al.*, 2008).

Los Hidrocarburos son un grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno. Son los compuestos orgánicos más simples y pueden ser considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos.

Pueden encontrarse de forma líquida natural (petróleo), líquida por condensación (condensados y líquidos del gas natural), gaseoso (gas natural) y sólido (en forma de hielo como son los hidratos de metano) (Secretaría de Energía, 2015).

2.9.1. Derrames de hidrocarburo

Las etapas que componen el procesamiento del petróleo son: explotación, transporte, refinamiento, almacenamiento y uso. Las alteraciones ambientales que cada una provoca varían, y son responsabilidad de diferentes sectores de la población y zonas donde se producen.

La etapa más importante en torno a este estudio es la del transporte de petróleo. Hay dos formas de transportar el combustible por vías terrestres o por vías marítimas (Flores-Puente *et al.*, 2004).

En cuanto al transporte terrestre, el hidrocarburo se desplaza mediante el uso de ductos, los cuales están sujetos a diversos accidentes ocasionados por diferentes causas, ocasionando así incendios, explosiones, fugas y derrames.

Los derrames de hidrocarburo son cualquier descarga, liberación, rebose, achique o vaciamiento de hidrocarburos u otras sustancias peligrosas en estado líquido, que se presenten en tierra y/o en cuerpos de agua (NOM-EM- 138-ECOL-2002). Los efectos que tienen los derrames de hidrocarburos en el suelo van más enfocados a las propiedades físicas del suelo, dañando la estructura original debilitándola y disminuyendo la porosidad, trayendo como consecuencia una baja capacidad de retención de agua y de retención de nutrientes para las plantas.

2.9.2. Consecuencias de la presencia de hidrocarburo en el suelo

Los hidrocarburos del petróleo pueden afectar la fertilidad a través de varios mecanismos: toxicidad directa a los organismos en el suelo, reducción en la retención de humedad y/o nutrientes, compactación, así como cambios en pH y salinidad (Adams. *et al.*, 2008).

Diferentes autores como Zavala *et al.*, 2005, Bohn *et al.*, 2001, Porta *et al.*, 1999, Roy y McGill, 1998, Martínez y López, 2001; Adams *et al.*, 2002 en Adams. *et al.*, 2008 definen o puntualizan algunos elementos como:

- Toxicidad en el suelo

Aunque los hidrocarburos meteorizados que quedan de derrames antiguos y en sitios remediados son de baja toxicidad o de muy corta duración, sí pueden afectar al rendimiento de forrajes y cultivos debido a alteraciones que no están relacionados con la toxicidad (Zavala *et al.*, 2005).

- Reducción en la retención de humedad

Las partículas del suelo contienen fracciones de arcillas y materia orgánica. Estos componentes generalmente imparten a la superficie de las partículas del suelo una carga eléctrica negativa que permite al suelo retener humedad por su interacción electrostática con el agua debido a su característica polar y

a la carga parcial positiva del átomo de hidrógeno en la molécula (Bohn *et al.*, 2001). De manera contraria, los hidrocarburos son esencialmente no polares o tienen una polaridad muy baja. Cuando los hidrocarburos cubren la superficie del suelo, interrumpen la interacción electrostática entre la superficie de las partículas del suelo y el agua, reduciendo su capacidad de retención de agua.

- Reducción en la Retención de Nutrientes

Muchos nutrientes de importancia para las plantas y microorganismos son catiónicos, tales como el NH_4^+ , K^+ , y Ca^{++} . Estos nutrientes catiónicos son retenidos en el suelo, aún en áreas con precipitaciones altas, debido a la interacción electrostática de las partículas de suelo con carga negativa (Porta *et al.*, 1999). Cuando los hidrocarburos, poco polares y sin carga, cubren esta superficie, se interrumpe la interacción entre las partículas del suelo y los cationes, reduciéndose la capacidad del suelo para retenerlos (Roy y McGill, 1998). En temporada de lluvia con precipitaciones altas los nutrientes suelen lixiviarse al suelo debido a la baja capacidad de retención.

- Compactación

Al ocurrir un derrame de petróleo en un suelo mineral, inmediatamente disminuye la densidad aparente del suelo debido al incremento de carbono orgánico en el suelo (Zavala *et al.*, 2005). Sin embargo, después de algunos meses los hidrocarburos residuales, sobre todo los muy meteorizados, reducen la capacidad del suelo de volver a su situación natural luego de una compresión temporal. Esto se debe al carácter parcialmente oxidado de los hidrocarburos residuales, consecuencia de los procesos naturales de recuperación o debido al tratamiento del suelo mediante programas de remediación. La estructura química de los hidrocarburos residuales presenta "terminales pegajosas", las cuales incrementan su viscosidad y adherencia en el suelo.

Esta situación reduce la permeabilidad del suelo y la percolación del agua a través de este, provocando mayor escurrimiento superficial y menos retención de humedad. Además, puede reducir la

aireación interna del suelo, produciendo condiciones de anegamiento que no son toleradas por muchos cultivos. Los suelos arcillosos están especialmente dispuestos a presentar este problema de anegamiento y reducción en la respiración (Martínez y López, 2001; Adams *et al.*, 2002). Por otra parte, el suelo puede endurecerse e impedir la penetración y desarrollo de las raíces, reduciendo la capacidad de las plantas para obtener suficiente humedad y nutrientes del suelo, y reduciendo su capacidad de tolerar lluvias o vientos fuertes, que son comunes en tormentas tropicales (Adams. *et al.*, 2008).

3. Área de estudio

3.1. Ubicación del área de estudio y vías de acceso

La comunidad de Juandhó se localiza en las coordenadas geográficas 20°09'05.376"N y 099°11'02.210"W al noroeste del municipio de Tetepango (Fig. 11), perteneciente a la región Tepeji. El acceso al municipio se realiza por la Carretera México 85 en la desviación a Tula en el km 17 a una distancia de 57 km de la capital hidalguense; Pachuca de Soto con una altitud de 2,100 msnm. (Gobierno Municipal Tetepango, Hgo., 2016).

Colinda con los municipios de Mixquiahuala de Juárez y Francisco I. Madero al norte, Tlahuelilpan y Tlaxcoapan al oeste, Ajacuba al este y Atitalaquia al sur.

El municipio ocupa una superficie territorial de 56.50 km² dentro del estado de Hidalgo, con dos localidades principales; Ulapa de Melchor Ocampo y nuestra área de estudio, Juandhó.

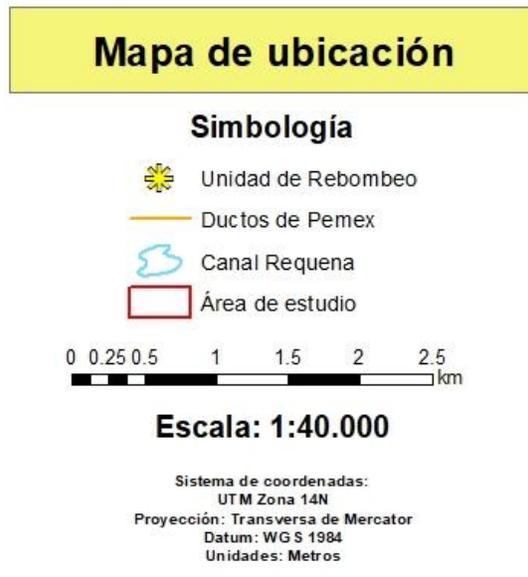
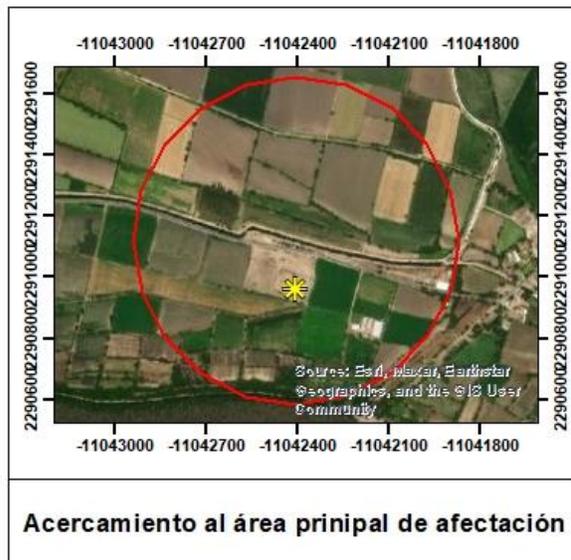
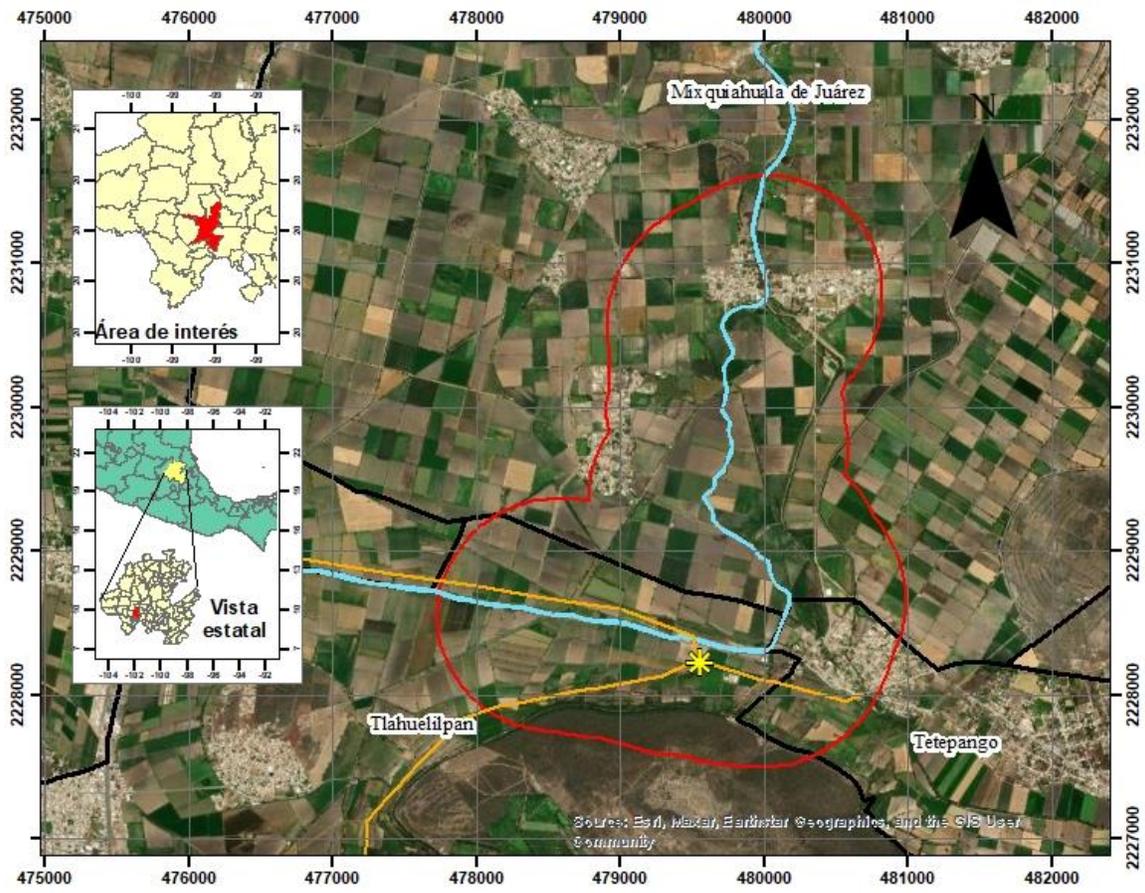


Figura 11. Mapa de localización de la localidad de Juandó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales Topografía de INEGI (2017).

3.2. Geología

3.2.1. Geología Regional

La localidad de Juandhó queda comprendida al 100% por la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, así como el municipio de Tetepango. Respecto al sistema de topoformas el área de estudio no presenta desniveles, mostrando un territorio llano, así como 54.8% del municipio, el 45.32% restante son sierras (Fig. 12).

- **Eje Neovolcánico**

Esta provincia cubre también una gran porción del estado de Hidalgo, sobre todo en el sur, y está constituida predominantemente por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos), de composición y textura variada, las cuales forman en conjunto un extenso y grueso paquete que, en algunas localidades, alcanza varios miles de metros de espesor. Este conjunto ha sido superpuesto a las rocas sedimentarias mesozoicas por los fenómenos de volcanismo. De estas últimas se encuentran algunos afloramientos que sobresalen en forma de cerros aislados en medio del dominio de las rocas ígneas, como en las localidades de Tula de Allende y Atotonilco de Tula, donde afloran cerros de caliza que tienen un uso industrial. La morfología de esta provincia es variada, se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, como son: conos cineríticos, volcanes compuestos, volcanes escudo y calderas, además de extensos flujos piroclásticos y derrames lávicos basálticos, que tienen forma de mesetas y planicies sobre las que se han originado algunos lagos, debido al cierre de las cuencas. La interacción entre el clima y la composición litológica de las rocas volcánicas se hace más evidente en las zonas húmedas, donde afloran extensos derrames de rocas basálticas que han sido alteradas profundamente por el intemperismo fisicoquímico y han desarrollado suelos residuales, de color rojizo, que indican una fuerte oxidación de minerales férricos contenidos en las rocas ígneas y en el agua (INEGI, 1992).

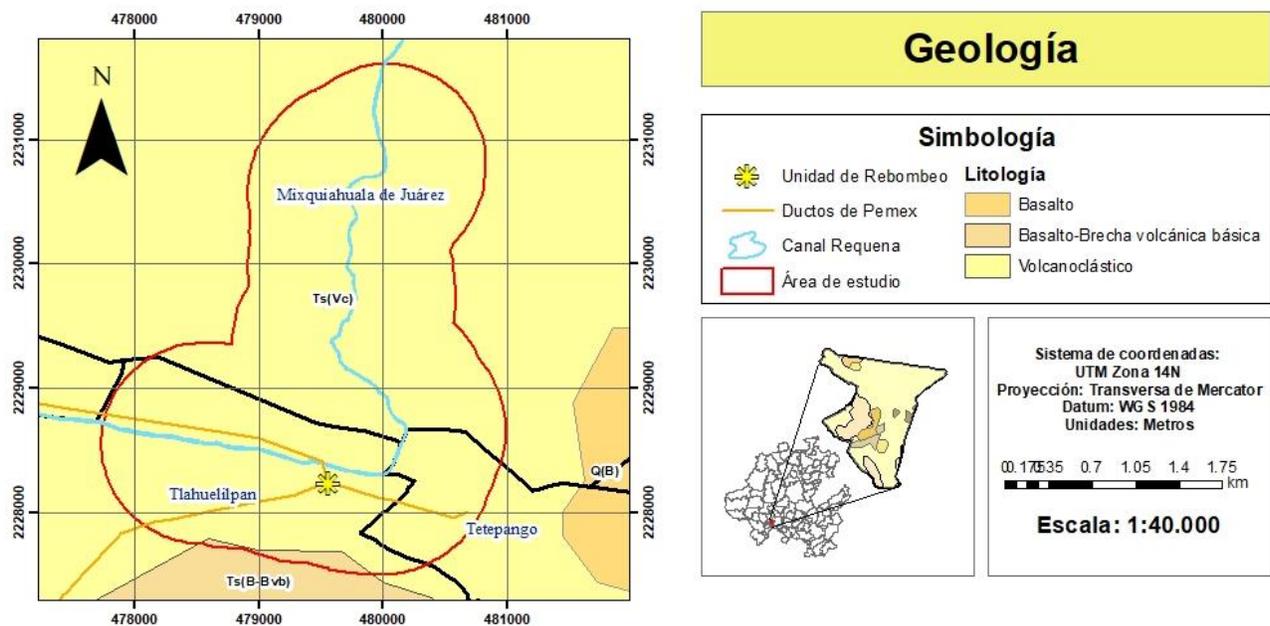


Figura 12. Mapa de geológico de la localidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos Geológicos Vectoriales de INEGI (2003).

3.2.2. Geología Local

Con base a la información adquirida en la plataforma del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el conjunto de datos geológicos vectoriales F1411, escala 1:250,000 la geología del municipio de Tetepango se comprende por una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias del Cenozoico (Tabla 5), siendo la roca volcánica la que predomina en el municipio. Sus edades datan del periodo Neógeno (79.53%) y Cuaternario (3.29%), para la localidad de Juandhó su terreno se conforma al 100% de material volcanoclástico.

Tabla 5. Unidades cronoestratigráficas presentes en el municipio de Tetepango. (INEGI)

ENTIDAD	ERA	SISTEMA	TIPO	CLASE	CLAVE
Unidad cronoestratigráfica	Cenozoico	Neógeno	Volcanoclástico	Ígnea extrusiva	Ts (Vc)
			Basalto-Brecha volcánica básica		Ts (B-Bvb)
			Caliza	Sedimentaria	Ts(cz)
		Cuaternario	Brecha volcánica básica		Ts(Bvb)
			Basalto	Ígnea extrusiva	Q(B)
			Brecha volcánica básica		Q(Bvb)
Suelo		Aluvial	N/A	Q(al)	

A continuación se describen algunas de las unidades cronoestratigráficas presentes en el municipio.

Terciario Superior (Ts)

- **Volcanoclástico (Vc).**

Esta unidad pertenece al Terciario Superior, es de origen continental y está constituida por alternancia de tobas, arenas y paleosuelos; depositados en cuencas lacustres. Presentan pseudoestratos masivos y delgados, algunos muestran estratificación cruzada. La unidad es de color crema e interperiza en tonos ocres. Pertenece a la Formación Tarango, sobreyace discordantemente a calizas cretácicas y subyace de igual forma a las rocas volcánicas terciarias, morfológicamente constituye grandes extensiones de lomeríos bajos. Aflora entre algunas localidades como Progreso, Doxey, Actopan, Acayuca y Tepeji de Ocampo.

- **Basalto-brecha volcánica básica (B-Bvb).**

Unidad ígnea extrusiva perteneciente al Terciario Superior, constituida por la alternancia rítmica de derrames de basalto vesicular color negro y brecha volcánica color gris y rojo oscuro. La unidad

pertenece a la Formación San Cristóbal y yace discordante sobre las rocas ácidas del Terciario Superior y las rocas sedimentarias del Cretácico Su expresión morfológica es de mesetas, algunas veces coronadas por conos cineríticos. Aflora al oeste de Tetepango y al sur de San Juan Tapa.

Cuaternario (Q)

- **Basalto (B).**

Unidad ígnea extrusiva del Terciario Superior, constituida por coladas basálticas de olivinos, piroxenos y andesitas, generalmente acordonadas y vesiculares. Son de color gris claro a negro y cuando se intemperizan cambian a pardo rojizo. El grado de fracturamiento e intemperismo va de moderado y somero a intenso y profundo. Pertenece a las Formaciones Atotonilco el Grande y Tarango, sobreyace en forma discordante, a las rocas clásticas terciarias. Morfológicamente está representada por mesetas disectadas y en ocasiones coronadas por conos cineríticos. Aflora en las localidades de La Salitrera Atotonilco el Grande, Xochitlán, Mixquiahuala y otras, así como en el cerro La Paila (INEGI, 1992).

3.3. Edafología

Es importante tener conocimiento del tipo de suelo que se presenta en el área de estudio, ya que dependiendo de sus características físicas y geológicas podemos tener una mejor perspectiva de cómo se puede comportar el contaminante y cuáles son las medidas apropiadas para contrarrestarlo (Tabla 6).

Tetepango tiene una extensión territorial donde el tipo de suelo predominante es el Vertisol pélico, el cual se asocia con diferentes suelos que le dan valor agrícola, el más importante es el grupo que se asocia con Rendzina (E) y Feozem haplico (Hh), que dominan gran parte de la llanura aluvial del noroeste desde la localidad de Tetepango hasta Ulapa de Melchor Ocampo (Gobierno Municipal Tetepango, Hgo., 2016). En la localidad de Juandhó el suelo predominante es el Vertisol pélico, con más del 70% de la superficie. (Fig. 13)

Tabla 6. Edafología del municipio de Tetepango (Gobierno Municipal Tetepango, Hgo., 2016).

Municipio	Localidades	Tipo de suelo	Clave cartográfica
Tetepango	Ulapa de Melchor Ocampo, Espiritu Santo, Barrio Nuevo, Rojo Gómez, el Xitri	Feozem	H
	Juandhó y Rojo Gómez	Vertisol y Regosol	V-R
	Rojo Gómez	Rendzina y Regosol	E-R
	Ulapa de Melchor Ocampo, Espiritu Santo, Barrio Nuevo, Barrio Nicolás Bravo	Litosol	I

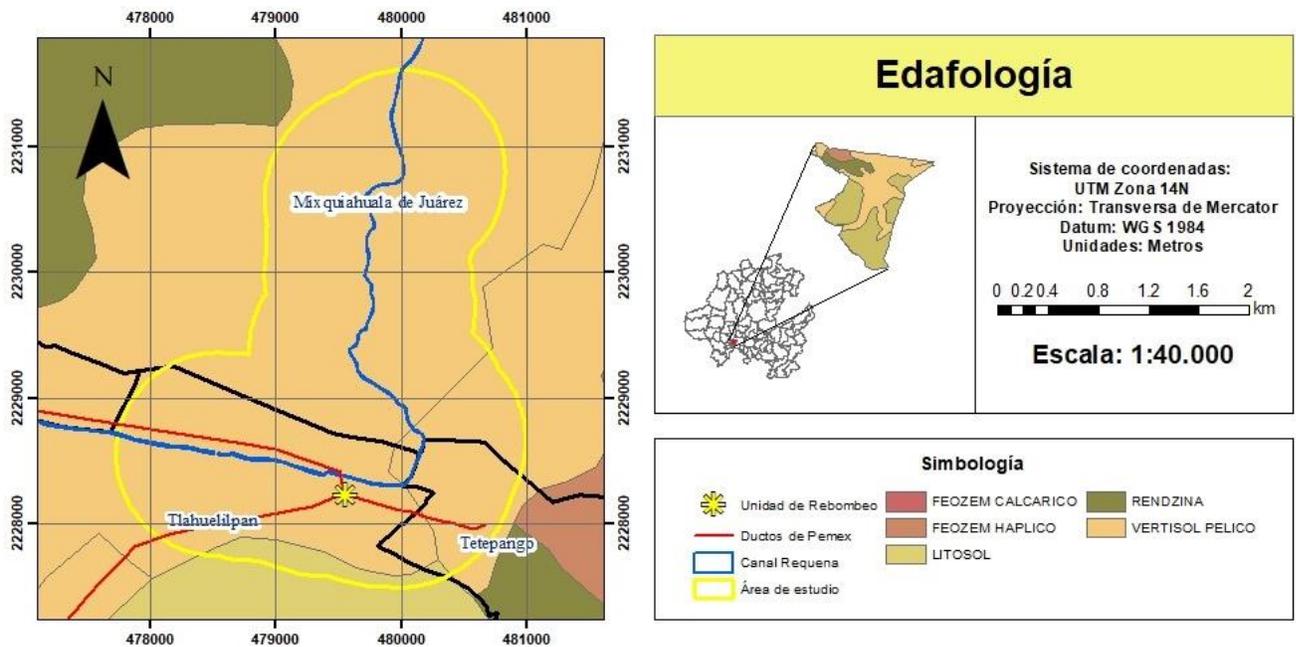


Figura 13. Mapa de edafológico de la localidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de Edafología del INIFAP y CONABIO (2008).

Con base en los metadatos geográficos de edafología del Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en escala 1:250000 en el municipio de Tetepango se registran cuatro tipos de suelo, los cuales se describen a continuación.

- Feozem háplico

Suelos con un horizonte A mólico, no 56 % muy duro cuando se seca, con grado de saturación de más de 50% y con relativamente alto nivel de contenido de carbono orgánico; tiene una proporción muy baja de bases, por lo que carece de horizontes cálcico (acumulación de carbonato de calcio) y gípsico (acumulación de yeso) y no es calcáreos; posee un grado de saturación del 50% como mínimo en los 125 cm superiores del perfil; asimismo, carece de propiedades sálicas y gleicas (alta saturación con agua) al menos en los 100 cm superficiales (CONABIO, 2017). En México, cubren aproximadamente 22.5 millones de hectáreas que se distribuyen, entre otras regiones, en porciones de la Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre Occidental, la península de Yucatán, Guanajuato y Querétaro, principalmente (INEGI, 2007).

- Litosol

Suelos muy someros, menores de 10 cm de profundidad, sobreyace directamente a la roca o a una fase dura, continua y coherente, y presentan bastantes afloramientos rocosos. Son de color grisáceo oscuro, con textura media y pH ligeramente alcalino; por lo general se asocian con regosoles, rendzinas y feozems (INEGI, 2000).

Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difíciles de trabajar. Aunado a ello, el calcio que contienen puede inmovilizar los nutrientes minerales, por lo que su uso agrícola es limitado si no se utilizan técnicas apropiadas, por ello, es preferible mantenerlos con la vegetación original (SEMARNAT, s. f.).

- Rendzina

Son suelos poco profundos y desarrollo moderado, tienen limitante física a menos de 50 cm de profundidad, lítica o petrocálica (caliche), así como un horizonte superficial (horizonte A mólico) que descansa sobre material calcáreo. Presentan color oscuro o pardo rojizo, con alto contenido de materia orgánica y pH ligeramente alcalino, con predominio de la textura fina (arcillosa) y algunos con textura media. Estos suelos, en las zonas donde el clima húmedo juega un papel muy importante para su formación por la mayor temperatura y precipitación, se derivan del alto intemperismo tanto físico como químico de la roca caliza, por tanto, son de origen residual y coluvial. Tienen potencialidad productiva para las actividades pecuarias y forestales. La asociación es, por lo general, con feozems, litosoles, regosoles y, en algunas ocasiones, con vertisoles (INEGI, 2000).

- Vertisol pélico

Los Vertisoles pélicos se caracterizan por presentar en la matriz del suelo, de los 30 cm superiores, una intensidad de color en húmedo de 3.5 o menos y una pureza de 1.5 o menor. El material original de este tipo de suelos lo forma sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmecticas. Suele encontrarse en depresiones de áreas llanas o suavemente onduladas donde el clima suele ser tropical, semiárido a subhúmedo o mediterráneo con estaciones contrastadas en cuanto a humedad. La alternancia entre el hinchamiento y la contracción de las arcillas genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales. Los Vertisoles se vuelven muy duros en la estación seca y muy plásticos en la húmeda (*Perfil de suelo, s. f.*).

3.4. Clima

Con base en la clasificación climática adaptada de Enriqueta García, el municipio de Tetepango presenta un clima semiseco templado (BS1kw(w)) en el 100% de su territorio, con un rango de temperatura media que oscila entre 13 – 15°. En la zona norte, donde se localiza el área agrícola de riego, se presenta una mayor oscilación térmica, dado que es una zona llana donde no existe vegetación que ayude a regular la temperatura.

Por su ubicación presenta una precipitación anual entre los 400 - 600 mm, el régimen de lluvias en toda la zona es de verano, ya que se concentra en más del 70% entre junio y octubre, el mes más lluvioso es julio y el más seco es febrero (Gobierno Municipal Tetepango, Hgo., 2016).

3.5. Uso de suelo y vegetación

El uso principal que se le da a las tierras del municipio de la localidad de Juandhó es de uso agrícola. Se emplea una agricultura mecanizada continua en un 59.40% del territorio ya que el 40.60% restante no es apto para la actividad agrícola. Se cultiva maíz, trigo, frijol, nopal, alfalfa, haba, cebada, avena, nabo, chile y en menor proporción árboles frutales dentro de pequeños huertos familiares. En cuanto al uso pecuario un 59.40% se destina para el establecimiento de praderas cultivadas con maquinaria agrícola, un 23.42% para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal mientras que el 17.18% no es apto para este uso (Fig. 14).

De acuerdo con las estadísticas de producción agrícola del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en el municipio de Tetepango, en el año 2020 se registran las mayores pérdidas de cosechas en cultivos como frijol (6.15ha), avena (33ha) y maíz (4ha) al igual que las pérdidas monetarias. Si bien las estadísticas son para todo el municipio en general, dentro de ella se encuentran las pérdidas que se generaron a raíz del derrame de hidrocarburo para la comunidad de Tetepango, siendo notorio el cambio en las cifras frente a los años 2019 – 2020 y 2020 – 2021. Ver anexo 2.

Así mismo el municipio, cuenta con pastos naturales, unas pequeñas tierras de riego y algunos cultivos de temporales.

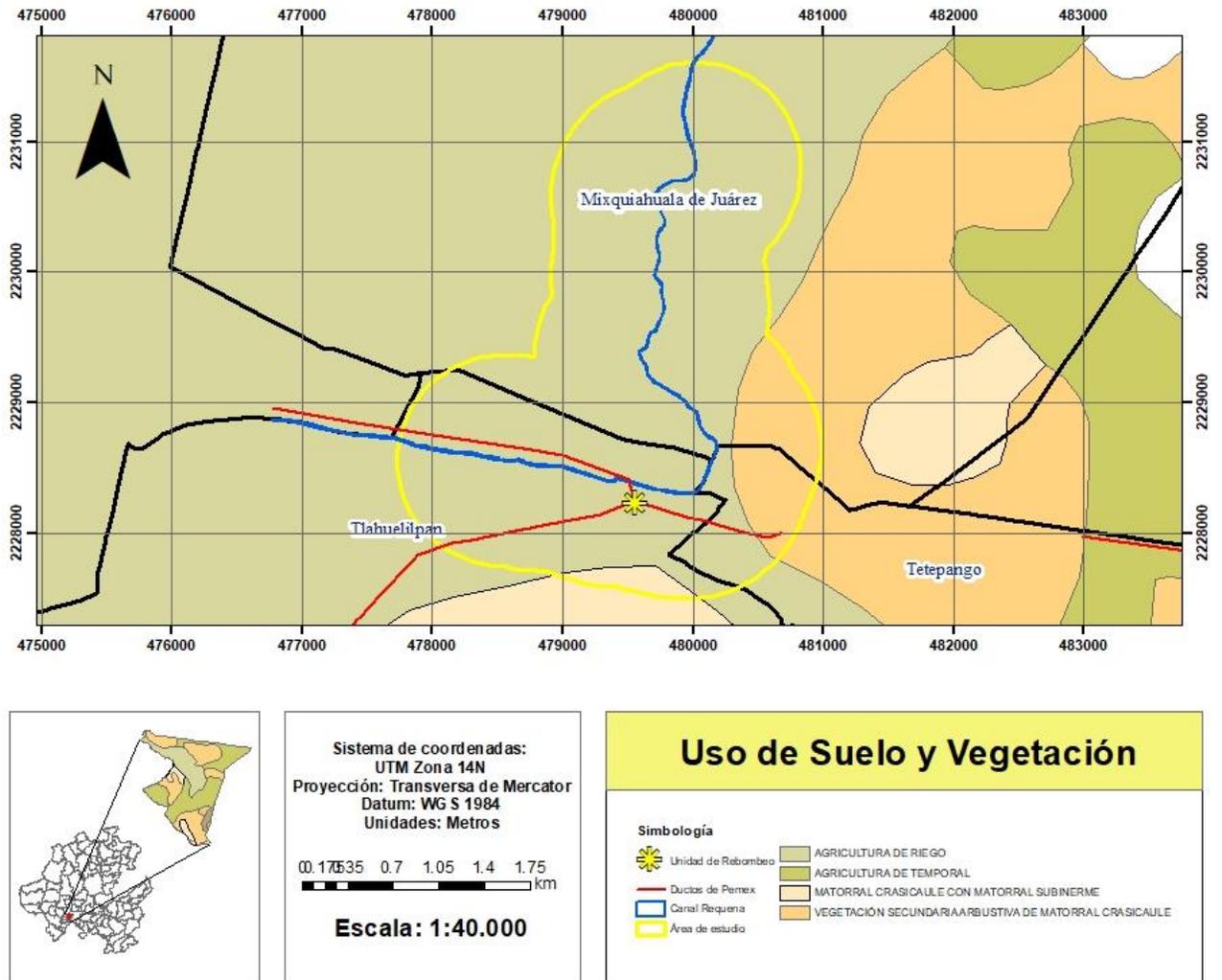


Figura 14. Mapa del USV de la localidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de Uso del suelo y vegetación del INEGI (2009)

3.6. Hidrografía

El municipio de Tetepango se localiza dentro la cuenca Río Moctezuma, la cual se subdivide en dos; el Río Salado que se localiza al suroeste abarcando un 16.09% del territorio municipal colindando con el municipio de Tlaxcoapan y una pequeña parte de Atitalaquia. La segunda subcuenca es el Río Tula, predomina en el municipio con un 83.91% del territorio, el Río Tula se considera una cuenca de inundación con una pendiente en dirección hacia el noroeste, sin embargo, las zonas urbanas del municipio no presentan vulnerabilidad por riesgo de inundación (Gobierno Municipal Tetepango, Hgo., 2016).

Tetepango cuenta con algunos manantiales y pozos que son abastecidos con agua de lluvias. El Municipio pertenece a la región del Pánuco en el 100% de su territorio y lo conforman 44 cuerpos de agua y un río.

Sitios hidrológicos importantes del municipio:

- Presa del Muchacho
- Presa de los 3 cerritos
- El manantial
- El salitre
- El pozo de la noria
- El pozo del parque

3.7. Hidrogeología

El municipio de Tetepango abarca parcialmente dos acuíferos. En dirección hacia el oeste abarca el acuífero Valle del Mezquital y en dirección este el acuífero Ajacuba en menor porción. Nuestra zona de estudio se encuentra dentro del acuífero Valle del Mezquital.

Acuífero Valle del Mezquital - Clave 1310

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica (RH) No. 26 Pánuco, Subregión Hidrológica Río Tula, en la cuenca del Río Moctezuma. La mayor parte del flujo hidrográfico drena desde

la porción suroeste, la corriente principal es el Río Tula; otros ríos importantes son Salado, El Salto, Rosas, San Jerónimo, así como numerosos arroyos que forman parte de la red hidrográfica.

Como parte de la infraestructura hidráulica existen canales de agua superficial en los distritos de riego, acueductos e importantes presas como la Presa Endhó y la Presa Requena, ubicadas en la porción sur, en los límites con el acuífero Tepeji del Río y la presa Santa Elena, localizada en los límites con el acuífero Polotitlán, del Estado de México.

La geología superficial está representada principalmente por rocas volcánicas de ambiente geotectónico asociado a un arco continental y en menor proporción por rocas sedimentarias del Cretácico y de ambiente geotectónico relacionado al orógeno de la Sierra Madre Oriental.

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero libre a semiconfinado; heterogéneo y anisótropo constituido, en su porción superior, por una alternancia de materiales granulares aluviales, rocas volcánicas y sedimentos piroclásticos, que en conjunto presentan permeabilidad media y espesor promedio de 400 m; en su porción inferior está conformado por rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2020b).

Acuífero Ajacuba – Clave 1311

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica (RH) 26 Pánuco, Subregión Hidrológica Río Tula, en la cuenca del Río Moctezuma. La mayor parte del flujo hidrográfico drena desde la porción sureste a través de arroyos intermitentes, de poca importancia, los cuales escurren con dirección general de sur a norte y hacia la planicie, sin reconocer alguna corriente principal dentro del territorio del acuífero.

En el área, la infraestructura hidráulica existente para aprovechar los recursos hídricos superficiales es mínima, existen algunos canales y obras de extracción como algunos pozos y norias. Dentro del área se localiza el Distrito de Riego 003A Ajacuba, con una superficie sembrada de 2,900 ha; abastecido a través del canal del mismo nombre.

La geología superficial está representada principalmente por rocas volcánicas de ambiente geotectónico asociado a un arco continental y en menor proporción por rocas sedimentarias del Cretácico y de ambiente geotectónico relacionado al orógeno de la Sierra Madre Oriental.

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero libre a semiconfinado; heterogéneo y anisótropo constituido, en su porción superior, por una alternancia de materiales granulares aluviales, rocas volcánicas y sedimentos piroclásticos, que en conjunto presentan permeabilidad media y espesor promedio de 400 m; en su porción inferior está conformado por rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2020a).

3.8. Infraestructura petrolera

El principal constructor de ductos a lo largo del país ha sido Petróleos Mexicanos (Pemex). Tiene ductos para la recolección del petróleo crudo y gas provenientes de los pozos de extracción, el transporte a las refinerías, petroquímicas y complejos procesadores de gas, y para la distribución de productos finales a las terminales de almacenamiento y consumidores finales. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) es también una importante constructora de ductos para abastecer de gas a las plantas generadoras de energía eléctrica del país.

A diferencia de otras instalaciones industriales peligrosas, los ductos no están dentro de un complejo industrial con características de seguridad; por el contrario, se despliegan a lo largo y ancho de tierras propiedad de terceros, entre ciudades y carreteras, o en tierras agrícolas, ríos y parajes naturales, incluyendo propiedades privadas, núcleos agrarios, áreas naturales protegidas y territorios indígenas. Por lo que, en caso de fuga de hidrocarburos, el riesgo de derrames, contaminación y explosiones es sumamente alto.

El transporte por ductos puede ser sumamente complejo, para entenderlo, se puede catalogar por empresa, tipo de hidrocarburo, diámetro, función desempeñada, estado actual de operación, entre otros (CartoCrítica, 2023).

En el municipio de Tetepango, se localizaron 2 tipos diferentes de ductos, los cuales atraviesan únicamente en la localidad de Juandhó.



Figura 15. Ductos localizados en la localidad de Juandhó. En color morado podemos observar los poliductos Tula – Pachuca y Cab. Poza Rica – Ref. Tula que atraviesan la comunidad y en color rojo el oleoducto Poza Rica – Ref. Salamanca. Recuperado y modificado de CartoCritica, 2021.

3.8.1. Oleoducto

Los oleoductos transportan el petróleo crudo desde las áreas de extracción hasta las refinerías, petroquímicas y complejos procesadores de gas. Un total de 10,006.53 kilómetros de oleoductos se encontraron en 340 proyectos. En la localidad de Juandhó atraviesa el oleoducto de Poza Rica – Ref. Salamanca descritos en la tabla 7.



Figura 16. Oleoducto Poza Rica - Ref. Salamanca Recuperado y modificado de CartoCrítica, 2021

Tabla 7. Características de oleoducto Poza Rica - Ref. Salamanca (CartoCrítica, 2021)

Ducto	Poza Rica – Ref. Salamanca
Tipo	Oleoducto
Empresa	PEMEX Refinación
Longitud (km)	49.556977 km
Origen	Poza Riza
Destino	Refinería Salamanca
Estatus	Operando

3.8.2. Poliducto

Los poliductos transportan todo tipo de combustibles ya procesados, principalmente gasolinas y diésel, en estos ductos ocurren con mayor frecuencia las tomas clandestinas para el robo de combustibles. Existen en el país 9,098.53 km de poliductos, en un total de 161 proyectos. En la localidad de Juandhó atraviesan dos poliductos, el poliducto Cab. Poza Rica – Ref. Tula y el Tula – Pachuca descritos en la tabla 8 y 9.



Figura 17. Poliducto Cab. Poza Rica – Ref. Tula y el Tula – Pachuca. Recuperado y modificado de CartoCrítica, 2021

Tabla 8. Características del poliducto Cab. Poza Rica - Ref. Tula (CartoCrítica, 2021).

Ducto	Cab. Poza Rica – Ref. Tula
Tipo	Poliducto
Empresa	PEMEX Refinación
Longitud (km)	66.56891 km
Origen	Cab. Poza Riza
Destino	Refinería Tula
Estatus	Operando

Tabla 9. Características del poliducto Tula - Pachuca (CartoCrítica, 2021).

Ducto	Tula – Pachuca
Tipo	Poliducto
Empresa	PEMEX Refinación
Longitud (km)	66.155904 km
Origen	Tula
Destino	Pachuca
Estatus	Operando

4. Marco Legal

En México existen diferentes leyes y normas en materia de hidrocarburos en suelo y agua. Diseñadas para la protección del medio ambiente y la salud pública, las cuales regulan cada aspecto de este recurso desde su extracción, calidad, uso o transporte, estableciendo los criterios necesarios para la prevención, control y remediación del contaminante.

En cuanto al marco legal ambiental se ha realizado la recopilación de la legislación vigente correspondiente en el tema de protección frente a contaminación ambiental, en específico a los derrames de hidrocarburos.

4.1. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

Establece las bases para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como para la protección del medio ambiente, regulando las actividades que puedan causar daños en el incluyendo aquellas relacionadas con hidrocarburos.

Publicada en el año de 1988 y actualizada en abril del 2024, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) de México, aborda varios artículos sobre la contaminación de hidrocarburos en suelo y agua.

Como señala el DOF (2024), título primero, **artículo 1°** de la sección I, Normas Preliminares:

La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I. Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar;
- II. Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III. La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV. La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas;
- V. El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;
- VII. Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;
- VIII. El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, las entidades federativas, los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, bajo el principio de concurrencia previsto en el Artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución; Fracción reformada DOF 19-01-2018
- IX. El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y las Instituciones académicas y de investigación, los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental; Fracción reformada DOF 11-04-2022

- X. El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

Como señala el DOF (2024), título primero, **artículo 28°** de la sección V, Evaluación del Impacto Ambiental:

La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente.

Las actividades realizadas por la industria petrolera pueden estar expuestas a causar dicho “desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos” durante las actividades de extracción, producción, y transporte, un ejemplo de ello, son los derrames de hidrocarburo en zonas marítimas, agrícolas o rurales.

El título 4° de la LGEEPA, está dedicado a la prevención y control de la contaminación del suelo, enfocado a materiales o residuos peligrosos. De acuerdo con la LGEEPA, un material o residuo peligroso por sus características, representa un peligro para el ambiente, la salud y los recursos naturales. Para calificar a un material o residuo como peligroso, se debe aplicar el análisis conocido como *CRETIB*. Su nombre resulta de las siglas que corresponden a cada una de las características del material como sigue: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico infeccioso (Flores Puente *et al.*, 2004). Es por ello por lo que se han descrito los siguientes artículos.

Como señala el DOF (2024), título cuarto, **artículo 109 BIS** de la sección I, Disposiciones Generales:

La Secretaría, las entidades federativas, los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, deberán integrar un registro de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos de su competencia, así como de aquellas sustancias que determine la autoridad correspondiente. La información del registro se integrará con los datos y documentos contenidos en las autorizaciones, cédulas, informes, reportes, licencias, permisos y concesiones que en materia ambiental se tramiten ante la Secretaría, o autoridad competente del Gobierno de las entidades federativas y en su caso, de los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México.

Como señala el DOF (2024), título cuarto, **artículo 134** de la sección IV, Prevención y Control de la Contaminación del Suelo:

Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:

- I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;
- II. Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;
- III. Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes; Fracción reformada DOF 13-12-1996
- IV. La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar sus efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar; Fracción reformada DOF 13-12-1996

- V. En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

Como señala el DOF (2024), título cuarto, **artículo 136** de la sección IV, Prevención y Control de la Contaminación del Suelo:

Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

- I. La contaminación del suelo
- II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos
- III. Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación.
- IV. Riesgos y problemas de salud.

Como señala el DOF (2024), título cuarto, **artículo 139** de la sección IV, Prevención y Control de la Contaminación del Suelo:

Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

4.2. Ley de Aguas Nacionales

En la Ley de Aguas Nacionales (LAN) de México, varios artículos abordan la contaminación de los cuerpos de agua, incluyendo la contaminación por hidrocarburos sobre la protección de las aguas nacionales, la prevención y el control de su contaminación.

Como señala el DOF (2023), título séptimo, **artículo 86 BIS 2** de la sección I, Prevención y Control de la Contaminación del Agua:

Se prohíbe arrojar o depositar en los cuerpos receptores y zonas federales, en contravención a las disposiciones legales y reglamentarias en materia ambiental, basura, materiales, lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales y demás desechos o residuos que, por efecto de disolución o arrastre, contaminen las aguas de los cuerpos receptores, así como aquellos desechos o residuos considerados peligrosos en las Normas Oficiales Mexicanas respectivas. Se sancionará en términos de Ley a quien incumpla esta disposición.

Como señala el DOF (2023), título séptimo, **artículo 89** de la sección I, Prevención y Control de la Contaminación del Agua:

Cuando la descarga de las aguas residuales afecte o pueda afectar fuentes de abastecimiento de agua potable o a la salud pública, "la Autoridad del Agua" lo comunicará a la autoridad competente y dictará la negativa del permiso correspondiente o su inmediata revocación, y, en su caso, la suspensión del suministro del agua, en tanto se eliminan estas anomalías.

Como señala el DOF (2023), título séptimo, **artículo 92** de la sección I, Prevención y Control de la Contaminación del Agua:

"La Autoridad del Agua" ordenará la suspensión de las actividades que den origen a las descargas de aguas residuales, cuando:

- I. No se cuente con el Permiso de Descarga de aguas residuales en los términos de esta Ley;
- II. La calidad de las descargas no se sujete a las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, a las condiciones particulares de descarga o a lo dispuesto en esta Ley y sus reglamentos;
- III. Se omita el pago del derecho por el uso o aprovechamiento de bienes nacionales como cuerpos receptores de descargas de aguas residuales durante más de un año fiscal;
- IV. El responsable de la descarga, contraviniendo los términos de Ley, utilice el proceso de dilución de las aguas residuales para tratar de cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas respectivas o las condiciones particulares de descarga;
- V. Cuando no se presente cada dos años un informe que contenga los análisis e indicadores de la calidad del agua que descarga, y Fracción reformada DOF 08-05-2023
- VI. No se presente el informe mensual de las descargas a que se refiere la fracción V BIS del artículo 88 BIS de la presente Ley.

La suspensión será sin perjuicio de la responsabilidad civil, penal o administrativa en que se hubiera podido incurrir.

Cuando exista riesgo de daño o peligro para la población o los ecosistemas, "la Autoridad del Agua" a solicitud de autoridad competente podrá realizar las acciones y obras necesarias para evitarlo, con cargo a quien resulte responsable.

4.3. Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

Como señala la **NOM-001-SEMARNAT-2021** (2022):

Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Como señala la **NOM-117-SEMARNAT-2006** (2009):

Que establece las especificaciones de protección ambiental durante la instalación, mantenimiento mayor y abandono, de sistemas de conducción de hidrocarburos y petroquímicos en estado líquido y gaseoso por ducto, que se realicen en derechos de vía existentes, ubicados en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.

Como señala la **NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012** (2013):

Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. Publicada en el DOF como norma definitiva el 29 de marzo de 2005.

El apartado 6 de la NOM-138 describe los límites máximos permisibles para diferentes situaciones.

- I. Especifica el tipo de hidrocarburo que deberá analizarse respecto al producto contaminante derramado. Es decir, si nuestro producto contaminante es combustóleo se analizarán los hidrocarburos de fracción pesada e hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP).

Tabla 10. Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante (DOF, 2013)

Producto contaminante	Hidrocarburos				
	Fracción Pesada	Fracción Media	HAP	Fracción ligera	BTEX
Mezcla de productos desconocidos derivados del petróleo	x	x	x	x	x
Petróleo crudo	x	x	x	x	x
Combustóleo	x		x		
Parafinas	x		x		
Petrolatos	x		x		
Aceites	x		x		
derivados del petróleo					
Gasóleo		x	x		
Diesel		x	x		
Turbosina		x	x		
Queroseno		x	x		
Creosota		x	x		
Gasavión				x	x
Gasolvente				x	x
Gasolinas				x	x
Gas nafta				x	x

- II. Especifica la fracción de hidrocarburo máxima permisible por mg/kg con base al uso de suelo ya sea agrícola, forestal, pecuario, residencial y recreativo o industrial y comercial. Por ejemplo, el derrame se dio en una zona agrícola el suelo no debe contener más de 200mg de hidrocarburo ligero por kg de suelo. Además de que propone el método analítico a desarrollar.

Tabla 11. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo (DOF, 2013)

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE (mg/kg BASE SECA)			MÉTODO ANALÍTICO
	Agrícola, forestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial	
Ligera	200	200	500	NMX-AA-105-SCFI-2008
Media	1 200	1 200	5 000	NMX-AA-145-SCFI-2008
Pesada	3 000	3 000	6 000	NMX-AA-134-SCFI-2006

Nota: Para usos de suelo mixto, deberá aplicarse el límite máximo permisible más estricto, para los usos de suelo involucrados.

- III. Establece los hidrocarburos específicos máximos permisibles como Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos entre otros por mg/kg con base al uso de suelo predominante ya sea agrícola, forestal, pecuario, residencial y recreativo o industrial y comercial. Por ejemplo, en un suelo de uso industrial no puede haber más de 100gr de Tolueno por kg de suelo.

Tabla 12. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo (DOF, 2013)

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	USO DE SUELO PREDOMINANTE (mg/kg BASE SECA)			MÉTODO ANALÍTICO
	Agrícola, forestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial	
Benceno	6	6	15	NMX-AA-141-SCFI-2007
Tolueno	40	40	100	NMX-AA-141-SCFI-2007
Etilbenceno	10	10	25	NMX-AA-141-SCFI-2007
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	NMX-AA-141-SCFI-2007
Benzo[a]pireno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Dibenzo [a, h] antraceno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo [a] antraceno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[b]fluoranteno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[k]fluoranteno	8	8	80	NMX-AA-146-SCFI-2008
Indeno (1,2,3-cd) pireno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008

Nota: Para usos de suelo mixto deberá aplicarse el límite máximo permisible más estricto, para los usos de suelo involucrados.

- IV. En el apartado 7 podemos observar los lineamientos dictados por la NOM – 138 correspondiente al plan de muestreo de la caracterización del sitio contaminado, en caso de derrames o fugas siempre y cuando ya se hayan realizado las medidas urgentes de aplicación.

A muestra de resumen el plan debe contener como mínimo las siguientes características:

1. Características del sitio y descripción del evento.
2. Descripción del método de muestreo a aplicar.
3. Descripción del plan de muestreo.

Respecto al inciso 2 la NOM – 138 nos establece el mínimo de puntos de muestreo por hectárea con base a las características del sitio descrito en la siguiente tabla.

Tabla 13. Número mínimo de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada (DOF, 2013).

Área contaminada (ha)	Puntos de muestreo	Área contaminada (ha)	Puntos de muestreo
Hasta		Hasta	
0.1	4	3.0	27
0.2	8	4.0	30
0.3	12	5.0	33
0.4	14	10.0	38
0.5	15	15.0	40
0.6	16	20.0	45
0.7	17	30.0	50
0.8	18	40.0	53
0.9	19	50.0	55
1.0	20	100.0	60
2.0	25		

5. Metodología

5.1. Temporalidad y adquisición de imágenes satelitales

El análisis multitemporal de cambios en la superficie terrestre en los diferentes momentos en el tiempo se realizó bajo los parámetros de acuerdo con Adamu et al. (2018) y Latorre-Conde (2015).

Realizando el comparativo de valores espectrales de las coberturas vegetales, Se plantean los siguientes escenarios.

Temporalmente, la vegetación afectada por derrames de petróleo cerca de la unidad de rebombeo responderá espectralmente de manera diferente en el año 2019/2020 y 2020/2021

Las parcelas agrícolas cerca del canal de aguas negras previo a la unidad de rebombeo responderán espectralmente de manera indiferente en los años 2019/2020 y 2020/2021

Las parcelas agrícolas cerca del canal de aguas negras posterior a la unidad de bombeo mostrarán mayor cambio en valores espectrales en comparación a las que se encuentran previo a la unidad de bombeo.

Tomando en cuenta que tanto los sitios contaminados en 2020 como en sitios no contaminados se utilizaron como puntos de control en este análisis.

5.1.1. Planteamiento temporal

El derrame fue reportado el 16 de agosto del 2020 a la Dirección de Protección Civil del municipio de Tlahuelilpan, por lo tanto, se tomó como prioridad la obtención de una imagen satelital posterior al 16 de agosto del mismo año (agosto, septiembre u octubre) para analizar los valores de reflectancia del área una vez ocurrido el derrame, observando los primeros cambios en los valores espectrales y en las cubiertas vegetales.

Para realizar la comparativa partiendo que en 2020 ocurrió el siniestro, se necesitaron dos momentos más para el análisis; previo al derrame y posterior al derrame. Obteniendo una imagen satelital del año 2019 (previo) para analizar los valores de reflectancia del área antes del derrame, es decir observar

cómo se comportan los valores espectrales de los cultivos sin presencia del contaminante y el año 2021 (posterior) para analizar los valores de reflectancia posterior al derrame, es decir observar cómo el contaminante afectó los cultivos debido al daño que sufrió el suelo y por ende el cambio de las coberturas vegetales.

Al trabajar con cultivos agrícolas se tomaron en cuenta los periodos de cultivo, si bien estos se realizan por temporadas y, dependiendo el mes y la estación las coberturas vegetales pueden cambiar sin necesidad de un factor contaminante, es por ello por lo que las imágenes satelitales deben tener la mayor similitud temporalmente posible. Si el derrame ocurrió en agosto del 2020, lo ideal sería obtener una imagen del mes de agosto en los años 2019, 2020 y 2021 o bien meses próximos a la fecha del derrame eliminando así un factor importante a la hora de realizar el análisis.

5.1.2. Descarga de imágenes satelitales.

Las imágenes multiespectrales que se emplearon fueron adquiridas de la plataforma de datos satelitales de acceso abierto de Copernicus, gestionada por la ESA (Agencia Espacial Europea, por sus siglas en inglés). Las imágenes corresponden a tres escenas de los satélites gemelos Sentinel-2A y Sentinel-2B de la misión Sentinel-2 (Tabla 14).

Tabla 14. Características de las imágenes Sentinel 2A adquiridas.

ID	Fecha de adquisición	Nivel de Procesamiento
S2A_MSIL2A_20191014T170251_N0213_R069_T14QMH_20191014T210736	14 de octubre del 2019	Sentinel – 2A
S2A_MSIL2A_20201008T170211_N0214_R069_T14QMH_20201008T212350	8 de octubre del 2020	Sentinel – 2A
S2B_MSIL2A_20211008T170119_N0301_R069_T14QMH_20211008T213625	8 de octubre del 2021	Sentinel – 2A

Dichas imágenes ya se encuentran geométricamente corregidas, con un nivel de procesamiento S2MSI-2Ap, es decir; que ya recibieron un tratamiento previo de corrección radiométrica que minimiza los efectos atmosféricos en las escenas proporcionándonos una imagen satelital mejorada para su tratamiento digital.

Las fechas corresponden al 14 de octubre de 2019 momento previo al derrame (Fig. 18), 8 de octubre del 2020 momento del derrame (Fig. 19) y 8 de octubre del 2021 momento posterior al derrame (Fig. 20) con una resolución espacial de 10 m en y un porcentaje de nubosidad menor al 1.5% en las tres imágenes.

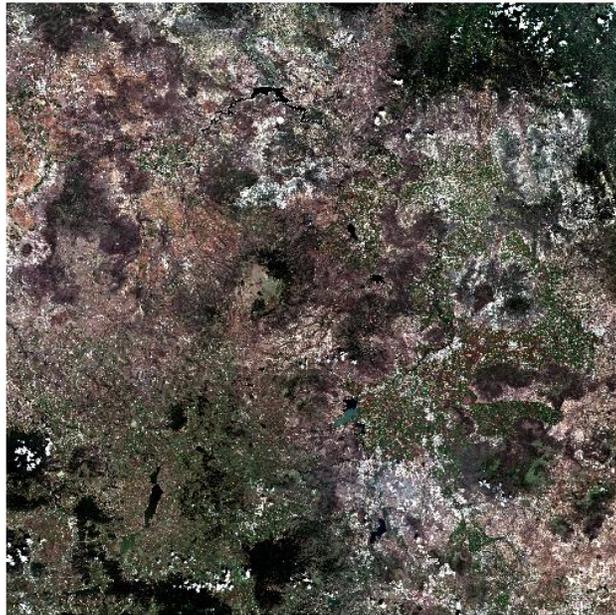


Figura 18. Momento previo al derrame en combinación RGB de color natural (14-OCT-2019) Modificado de COPERNICUS, 2019.



Figura 19. Momento durante el derrame en combinación RGB de color natural (8-OCT-20) Modificado de COPERNICUS, 2020.



Figura 20. Momento posterior al derrame en combinación RGB de color natural (8-OCT-21) Modificado de COPERNICUS, 2021.

5.2. Reconocimiento del área de estudio

Para la delimitación del área de interés, se realizó un primer acercamiento general de la zona que se desea estudiar partiendo de la localización de la unidad de bombeo en el municipio de Tetepango como principal punto de interés, para ello se utilizó un mapa satelital base para la georreferenciación del sitio en el programa Quantum GIS (QGIS).

Se generó una composición en color natural utilizando el RGB: 432 porque comprende las bandas espectrales del visible con la finalidad de reconocer la superficie del terreno.

De la carta topográfica Mixquiahuala F14C89B, escala 1:20,000 se ingresaron las capas vectoriales del canal y los conductos (hidrocarburo) cercanos a la unidad de bombeo para identificar el punto de origen del derrame (Fig. 21).

Inicialmente se realizó un análisis general de la zona en cuestión para obtener la perspectiva espacial adecuada para el estudio. Una vez que se detectaron los cambios se delimitó el área en secciones equidistantes para un análisis homogéneo de la cubierta vegetal.

El área de interés se manejó de forma general debido a que primero se realizó una comparación visual del terreno, es decir; para profundizar mejor en las secciones a trabajar se debe demostrar que existe un cambio en el terreno. Una vez que se detectaron los cambios se delimitó el área en secciones equidistantes para un análisis equitativo de la cubierta vegetal.

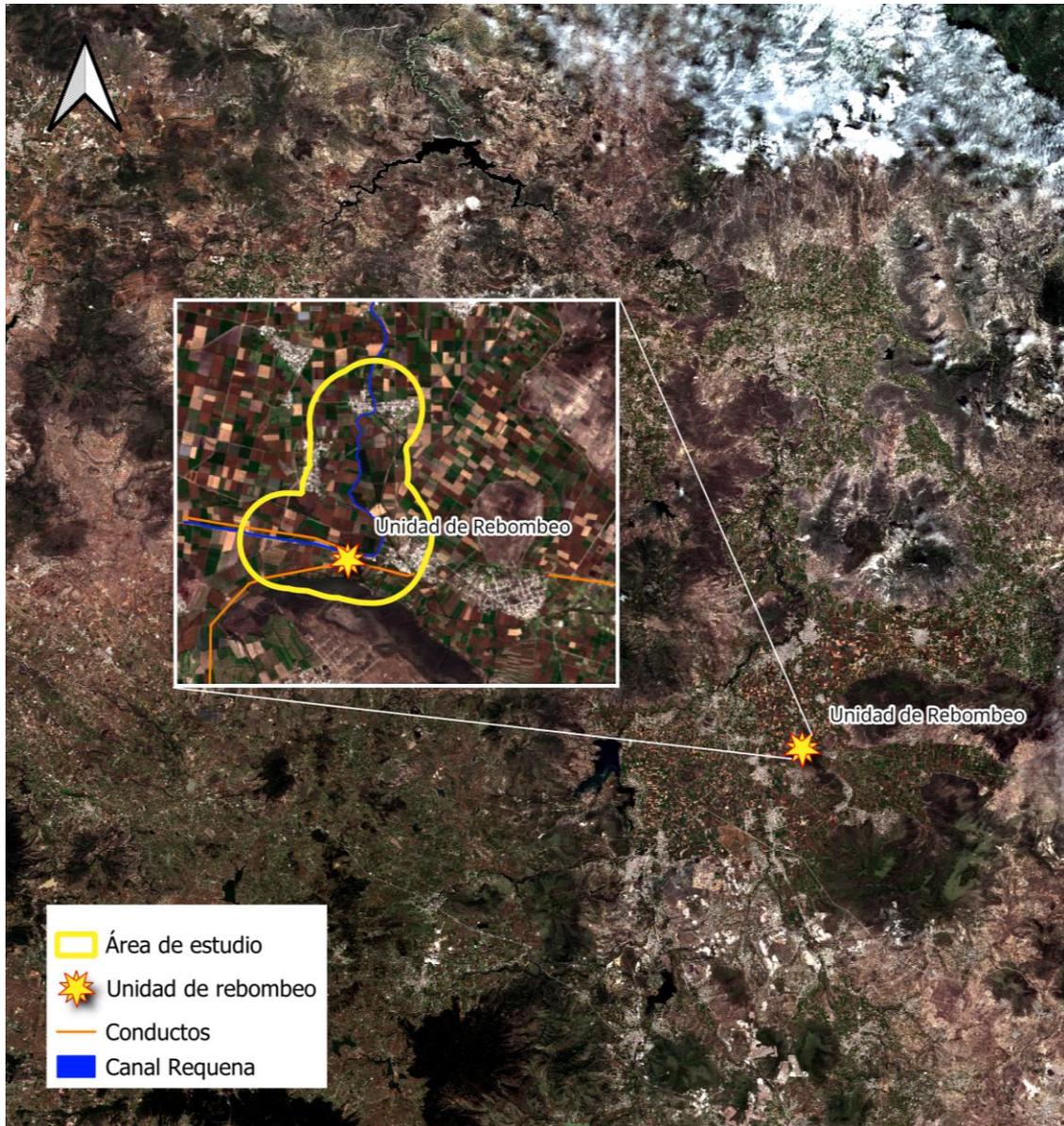


Figura 21. Delimitación general de la zona de estudio dentro de la escena Sentinel en color natural.

5.3. Análisis de cambios

La comparación entre los diferentes tiempos se realizó mediante un análisis visual de combinaciones de banda RGB (Infrarrojo, Uso Agrícola, Color Natural y Análisis de Vegetación) para la selección y discriminación de imágenes satelitales con mayor afectación. La identificación de las alteraciones se realizó conforme a los cambios de tonalidad de colores resultado de la reflectancia, lo que indica el vigor de la vegetación.

5.3.1. Índice de vegetación; Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El cálculo se realizó con las bandas espectrales 8 Y 4 (RED y NIR respectivamente) en cada imagen satelital para los años 2019, 2020 y 2021 con la ecuación 4 del apartado 2.4.2. con el programa QGIS versión 3.30.0. Se realizó la selección de 10 puntos de referencia dentro del perímetro de afectación principal siguiendo la línea del canal y la unidad de rebombeo en las parcelas agrícolas más cercanas, para observar las variaciones espectrales en los 3 momentos del derrame (Fig. 22).



Figura 22. Puntos de referencia para observar el comportamiento de cambio de la cobertura vegetal. Modificado de la escena Copernicus, 2020.

5.4. Delimitación del área de estudio

5.4.1. Delimitación de secciones

Para la selección de los puntos de muestro se redujo el área de estudio en tres secciones equidistantes, se colocó un punto de referencia inicial en la línea del canal, a la altura de la unidad de rebombeco, el punto de referencia se encuentra dentro del shape del canal Requena mismo sobre el cual se creó un buffer de 500mts de radio, teniendo como resultado la sección 1 (SCC1), área afectada directamente por el derrame de hidrocarburo (Fig. 23).

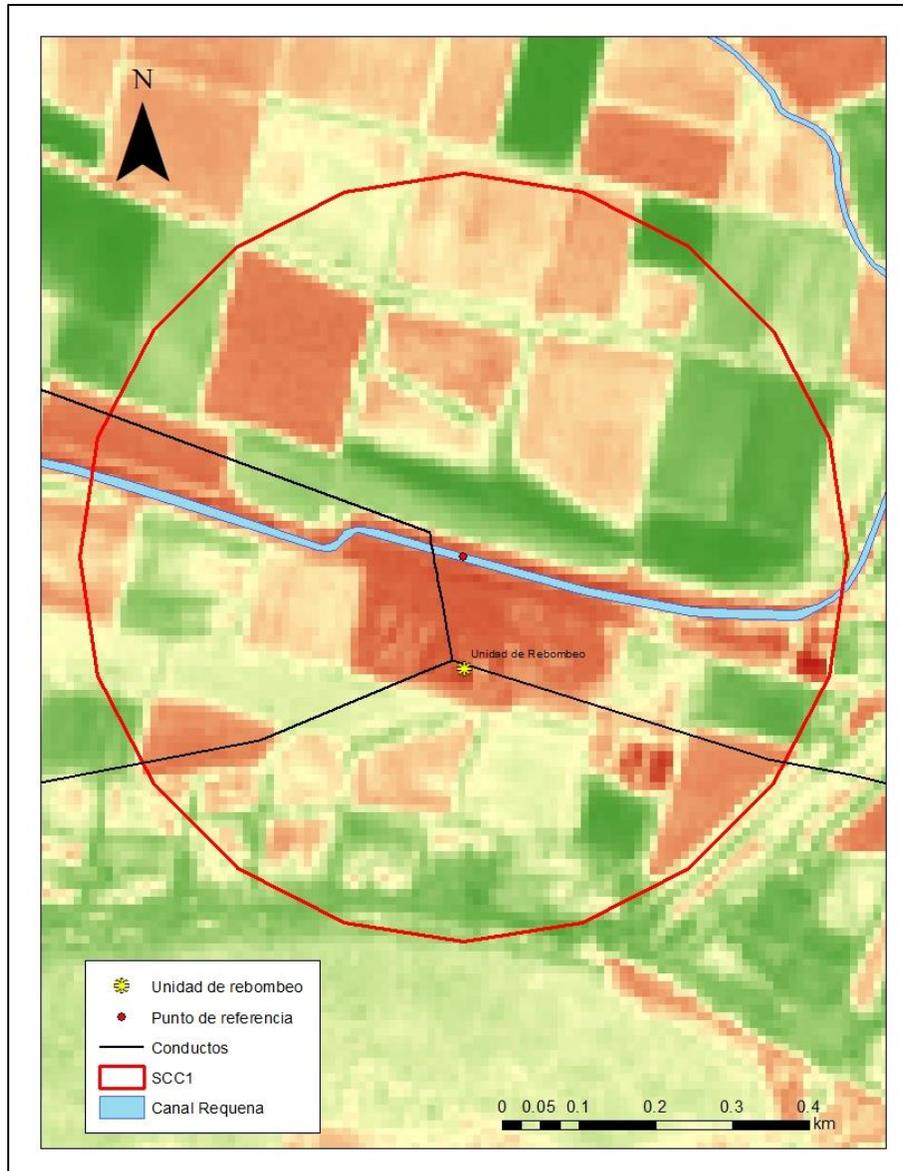


Figura 23. Sección 1 del estudio. Área afectada directamente por el derrame de hidrocarburo.

Para la segunda sección se midió un km en dirección noroeste sobre la línea del canal desde el punto de referencia inicial, en el lugar donde se cumpla la medida exacta se creará un segundo punto de referencia, mismo que servirá de base la creación del segundo buffer de 500mts, teniendo como resultado la sección 2 (SCC2), área previa al derrame (Fig. 24). Para la tercera sección se siguió la misma metodología, pero ahora en dirección noreste teniendo como resultado la sección 3 (SCC3) (Fig.25).

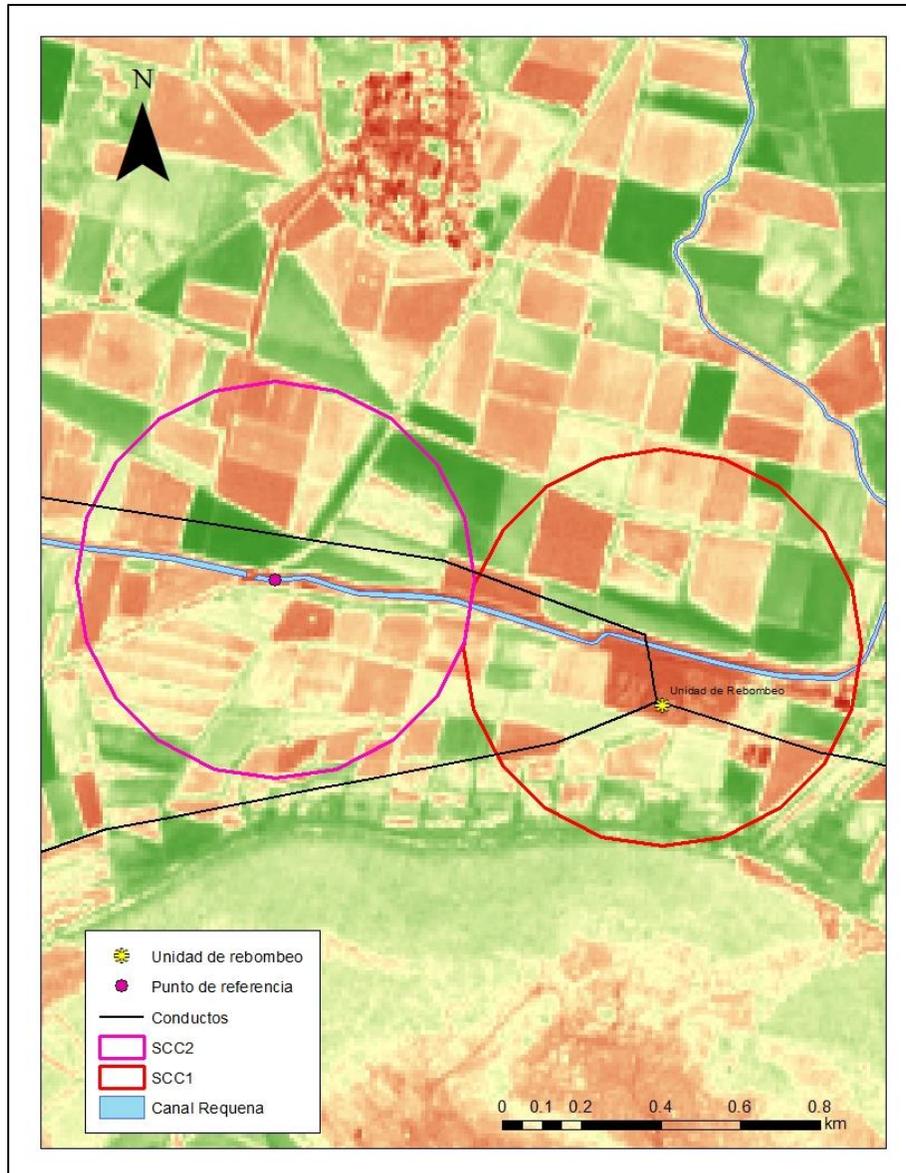


Figura 24. Sección 2 del estudio. Área previa al derrame de hidrocarburo

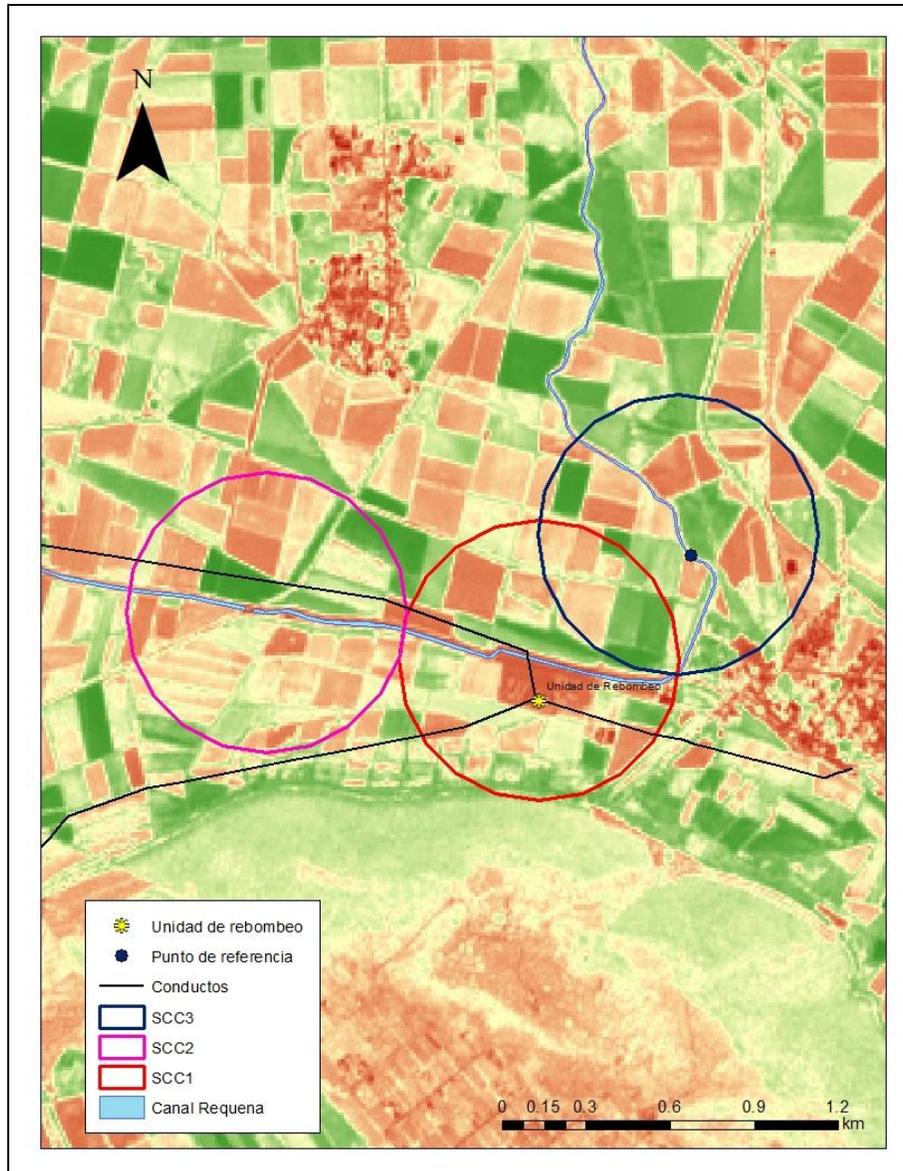


Figura 25. Sección 3 del estudio. Área posterior al derrame como punto de referencia al comportamiento del contaminante.

Los valores de reflectancia que se analizarán serán los píxeles dentro de cada sección de estudio para observar los cambios de la cobertura vegetal y por ende el estado en el que se encuentra la vegetación.

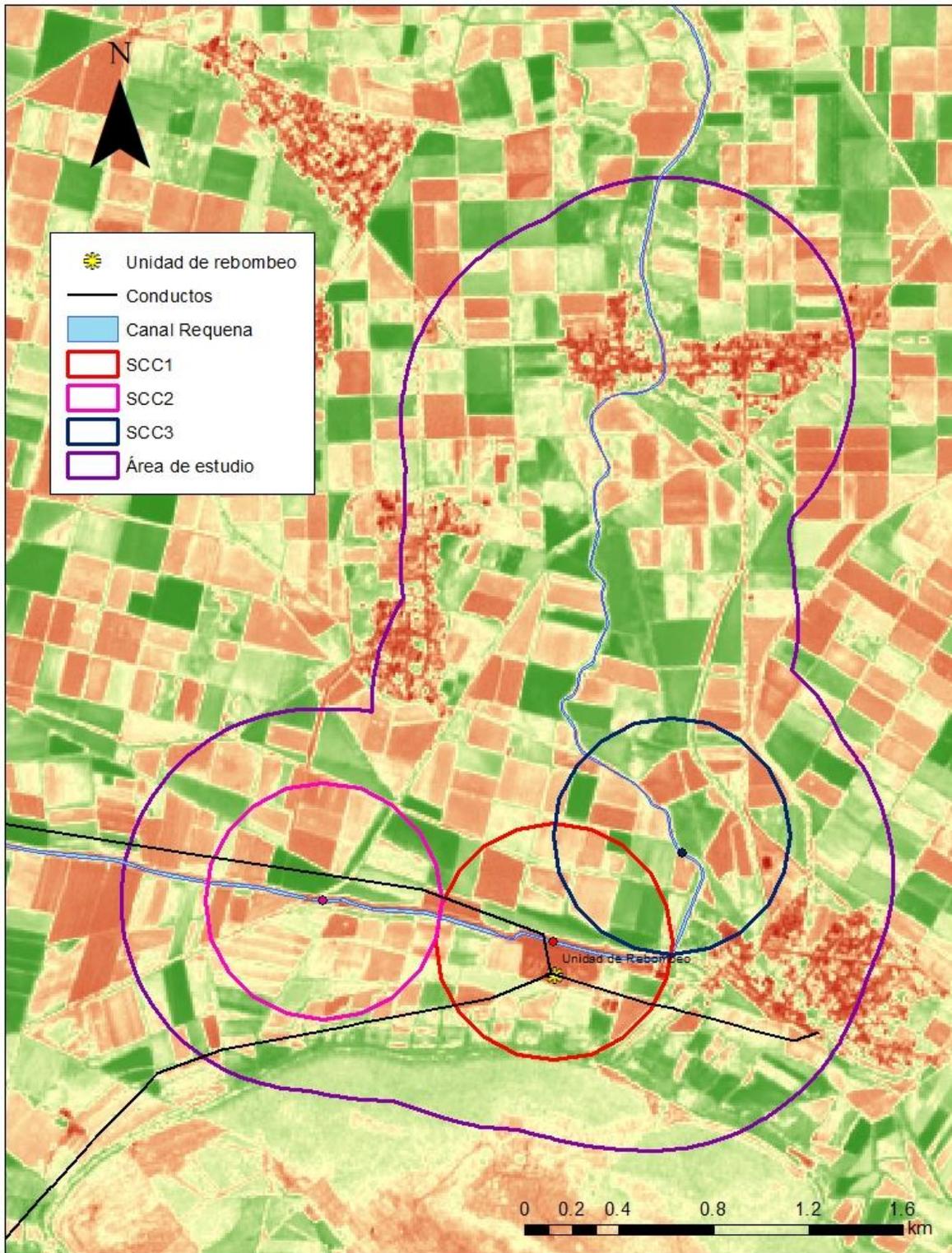


Figura 26. Área final de estudio delimitada. Modificada de COPERNICUS 2020.

5.4.2. Recorte de las escenas del NDVI

Las escenas de NDVI se recortaron para reducir el área de estudio y enfocarse en los datos de interés. El área de estudio pasará de ser la escena completa de NDVI a las tres secciones preseleccionadas. Siguiendo la línea del canal, se creó un buffer que cubrió las tres secciones, permitiendo tener un mejor manejo de los puntos de reflectancia espectral. Como resultado se obtuvo un buffer de 800m que logra cubrir las 3 secciones de estudio (Fig. 26), el cual nos sirvió de base para recortar las escenas de NDVI de los años 2019, 2020 y 2021 (Fig. 27).

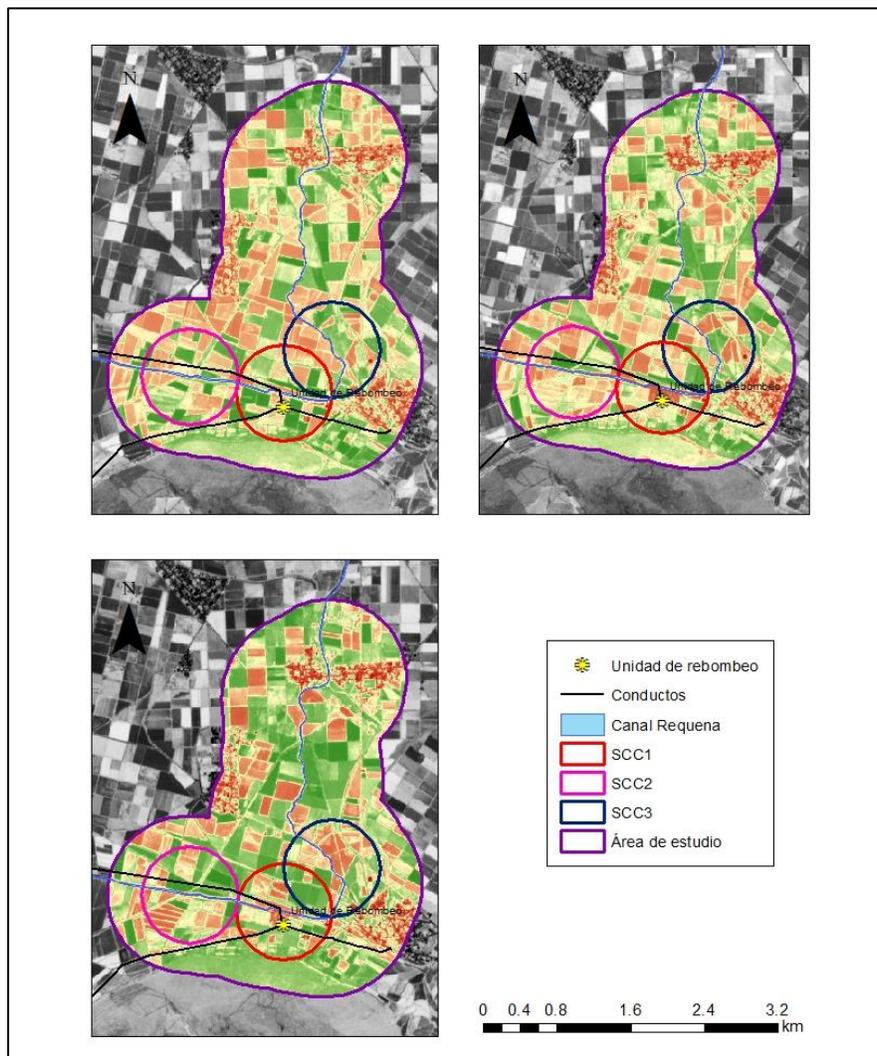


Figura 27. Escenas NDVI recortadas. Modificado de COPERNICUS 2019, 2020 Y 2021.

5.5. Conversión de datos raster a puntos vectoriales

Con el uso de la herramienta *Raster pixels to point* se realizó la conversión de cada escena raster de los años 2019, 2020 y 2021 a una capa de puntos vectoriales respectivamente, donde cada punto guardará el valor de reflectancia espectral, mismo que analizaremos y compararemos en conjunto para observar los cambios de coberturas. Se utilizó la capa de puntos vectoriales para recortarla acorde a nuestras secciones de estudio de cada año. Teniendo como resultado 9 capas de puntos vectoriales de los valores de reflectancia espectral como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Capas de puntos vectoriales de cada sección del estudio en los tres años de investigación.

Capa de entrada	Capas de salida en puntos vectoriales		
NDVI 2019	NDVI 2019 – SCC1	NDVI 2019 – SCC2	NDVI 2019 – SCC3
NDVI 2020	NDVI 2020 – SCC1	NDVI 2020 – SCC2	NDVI 2020 – SCC3
NDVI 2021	NDVI 2021 – SCC1	NDVI 2021 – SCC2	NDVI 2021 – SCC3

5.6. Selección de la cubierta vegetal por valor de reflectancia

En el programa QGIS versión 3.30.0 con la herramienta *Selección por objeto de valor* se realizó el análisis de la cobertura vegetal para los años 2019 – 2020, 2020 – 2021 y 2019 – 2021 en las tres secciones del estudio delimitadas basándose en la tabla de rango de valores NDVI de Mejía *et al.* (2021) con la finalidad de observar los cambios que se presenta en la cobertura vegetal más a fondo en las secciones de estudio.

5.7. Análisis estadístico

5.7.1. Clasificación de la cobertura vegetal con operaciones lógicas; Greater than Equal, Less than Equal y Combinational And

Se realizó la clasificación de los valores de reflectancia espectral con el uso de operaciones lógicas, con la finalidad de realizar mapas de cambio para analizar la cobertura vegetal clasificada con base en la

tabla de rango de valores NDVI de Mejía *et al.* (2021) para los años 2019 – 2020, 2020 – 2021 y 2019 – 2021.

A manera de ejemplo, para la clasificación de valores de suelos sin cobertura vegetal o escasa vegetación con un rango de valores de 0.2 a 0.45. Se utilizó la escena completa de NDVI, con la herramienta *Greater than Equal*, se obtuvieron los valores de reflectancia espectral que se encuentran en los píxeles mayores a 0.2, dando como resultado un raster con valores de 0 y 1; donde cero es igual a los valores menores a 0.2 y 1 es igual a los valores mayores a 0.2 para el año 2020. Con la herramienta *Less than Equal*, se obtuvieron los valores de reflectancia espectral que se encuentran en los píxeles menores a 0.45, dando como resultado un raster con valores de 0 y 1; donde cero es igual a los valores mayores a 0.45 y 1 es igual a los valores menores a 0.45 para el año 2020.

La herramienta *Combinational and* combina ambas capas raster (*Greater than Equal* y *Less than Equal*) dando como resultado una capa raster con valores de 0 y 1; donde cero es igual a los píxeles que se encuentran fuera del rango de valores de reflectancia espectral de 0.2 a 0.45 y 1 es igual a los píxeles que se encuentra dentro del rango de valores de reflectancia espectral de 0.2 a 0.45 para el año 2020. Teniendo como resultado la capa de suelos sin cobertura vegetal o escasa vegetación en el año 2020. (Fig. 28) Este procedimiento se repite hasta obtener 15 capas de clasificación de cobertura vegetal (5 por año de estudio) para la elaboración de los mapas de cambio.

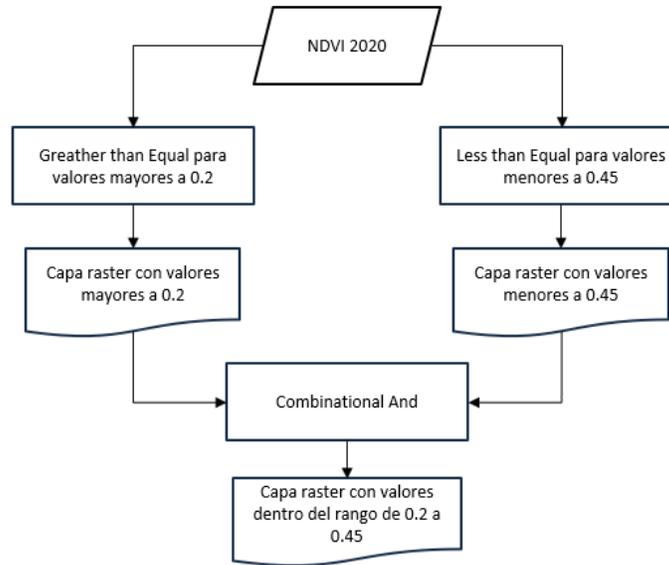


Figura 28. Diagrama de flujo para la clasificación del suelo sin cobertura vegetal o escasa cobertura en el año 2020 con operaciones lógicas.

5.7.2. Cuantificación de la cobertura vegetal por pérdida y recuperación.

Clasificación de la cobertura vegetal de pérdida y recuperación

Una vez que se identificó la cobertura vegetal es importante asignarle una unidad de medida a la superficie terrestre que se vio afectada durante el derrame de hidrocarburo. Para ello, se elaboraron mapas de pérdida con los años 2019 – 2020 y recuperación con los años 2020 – 2021 con las operaciones lógicas del apartado anterior. El año 2019 se toma como punto de referencia para la cobertura vegetal sana, el año 2020 se toma como punto de control de pérdida de cobertura vegetal y el año 2021 se toma como punto de referencia del comportamiento de la cobertura vegetal frente al derrame de hidrocarburo, su recuperación.

La metodología por seguir es la misma, únicamente se cambió el rango de valores a analizar, para el mapa de pérdida se hace la comparativa de la vegetación sana en el año 2019 dentro del rango 0.55 a 1 de valores de reflectancia espectral con los suelos sin vegetación para el año 2020 dentro del rango - 0.93 (valor más bajo del NDVI de año 2020) a 0.45 de los valores de reflectancia espectral (Fig. 29). Para

el mapa de recuperación se hace la comparativa con los suelos sin vegetación para el año 2020 dentro del rango -0.93 a 0.45 de los valores de reflectancia espectral con la vegetación sana en el año 2021 dentro del rango 0.55 a 1 de valores de reflectancia espectral (Fig. 30).

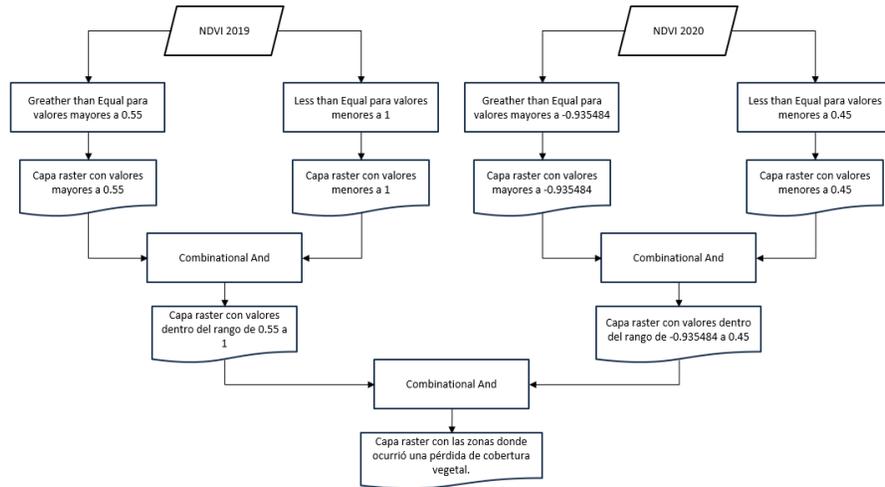


Figura 29. Diagrama de flujo para la extracción de datos de la cobertura vegetal que presentó pérdidas del año 2019 al 2020.

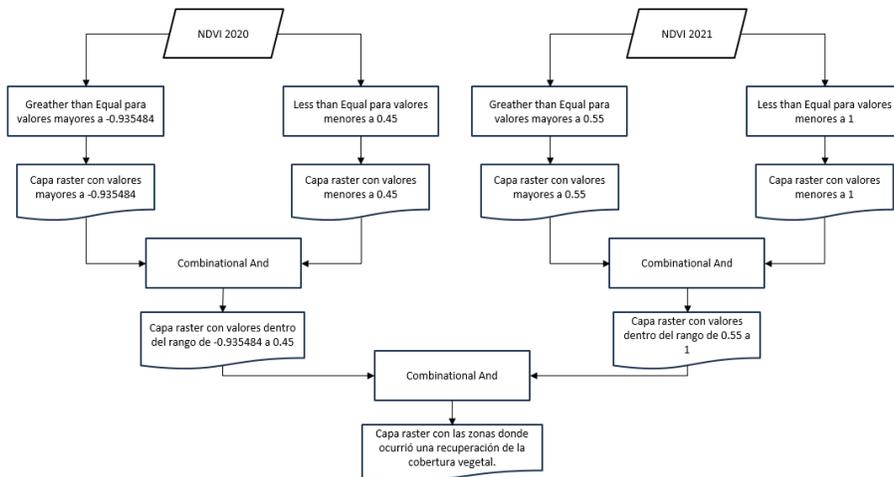


Figura 30. Diagrama de flujo para la extracción de datos de la cobertura vegetal que presentó una recuperación en el año 2020 al 2021.

Para entender mejor, cómo funciona el proceso de selección de puntos de cambio ya sea para pérdida o recuperación (Fig. 31) se explica de la siguiente manera, si deseamos conocer la vegetación que ha sufrido una pérdida basándonos en los valores de reflectancia espectral, tenemos que, si para el año

2019 nuestro pixel se encuentra con un valor de 0.57 y para el año 2020 presenta un valor de 0.60 no existe un cambio dentro de reflectancia espectral, es decir que se mantuvo dentro del rango de la vegetación que permaneció sana, sin embargo, si el pixel del año 2019 ahora presenta un valor de 0.71 frente al año 2020 con un valor de 0.33 existe un cambio en la reflectancia espectral, es decir, que mientras para el año 2019 ese pixel se encontraba dentro rango de la vegetación sana, para el año 2020 ha cambiado y se encuentra dentro del rango de los suelos sin vegetación o escasa vegetación.

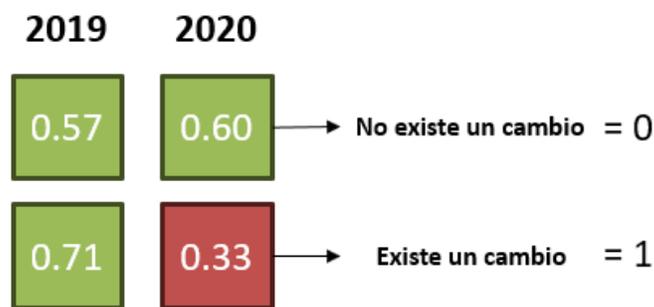


Figura 31. Ejemplo de valores de reflectancia espectral en la selección de cambios de cobertura vegetal

Obtención de áreas de pérdida y recuperación

Una vez que se obtuvieron las capas raster de los cambios, con la herramienta *Raster to polygon* las capas raster se convirtieron en capas vectoriales de polígonos para poder extraer el valor de área de las parcelas agrícolas que se perdieron y las que se lograron recuperar.

Las capas resultantes contienen valores de 0 y 1, el valor 1, es el que contiene los polígonos que presentaron los cambios para pérdida y recuperación en sus respectivas capas, con la herramienta *Select by attributes* seleccionamos los polígonos que presenten valores de 1, los polígonos seleccionados se extrajeron en una nueva capa de datos para pérdida y recuperación. Con las capas de polígonos resultantes se realizó un clip con el buffer de la sección 1. Teniendo como resultado los polígonos de las parcelas que presentaron cambios en su cobertura vegetal para pérdida y recuperación.

En la tabla de atributos de las capas de polígonos recortadas con la sección 1 realizamos la sumatoria del campo del área teniendo como resultado el área de las parcelas perdidas y recuperadas.

6. Resultados y Discusión

6.1. Temporalidad y adquisición de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales permitió discriminar entre los satélites Landsat 8 y Sentinel, tomando en cuenta la multitemporalidad, la cobertura de nubes y la resolución espacial, características que optimizaron el manejo de datos. De acuerdo con Adamu *et al.* (2016, 2018) se recomienda utilizar una imagen con fecha dentro de los primeros 28 días a partir del incidente ya que la fecha la considera un criterio indispensable para la detección y evaluación de daños en suelos por la contaminación por hidrocarburos. Por ello se buscó una proximidad en la fecha de obtención de las escenas que permitió realizar el análisis de la mejor manera. La tabla 16 muestra una comparación de las imágenes adquiridas inicialmente como insumos para el estudio.

Tabla 16. Comparación de fecha de adquisición de las imágenes satelitales, partiendo desde el 16 de agosto de 2020 como (día del derrame)

Momento	Satélite	
	Sentinel 2A	Landsat 8
Antes	14 de octubre del 2019	25 de octubre 2018
Durante	8 de octubre del 2020	28 de septiembre 2020
Después	8 de octubre del 2021	02 de noviembre 2021

También se recomienda que la cobertura de nubes en la escena sea <15% para evitar una interferencia atmosférica al momento de aplicar el NDVI, entre menos efectos atmosféricos presente una escena mejor será el procesamiento de datos. La Tabla 15 muestra la diferencia en esta característica entre las imágenes adquiridas.

Tabla 17. Comparación de porcentaje de nubosidad en las escenas de Sentinel 2A y Landsat 8 (Fuente: COPERNICUS, 2019, 2020 y 2021, USGS, 2018, 2020 Y 2021).

Sentinel 2A		Landsat 8	
Fecha de adquisición	Nubosidad (%)	Fecha de adquisición	Nubosidad (%)
14 de octubre del 2019	0.732065	25 de octubre 2018	15.03
8 de octubre del 2020	1.136589	28 de septiembre 2020	3.82
8 de octubre del 2021	0.271854	02 de noviembre 2021	2.93

Adamu *et al.* (2018) establece que el satélite Sentinel podría ser útil para detectar sitios de derrames pequeños con un volumen menor de derrame de petróleo. Tomando en cuenta su investigación las bandas de interés para el estudio se encuentran en una resolución de 10m lo cual representa una ventaja mayor sobre las imágenes Landsat (Fig. 32).

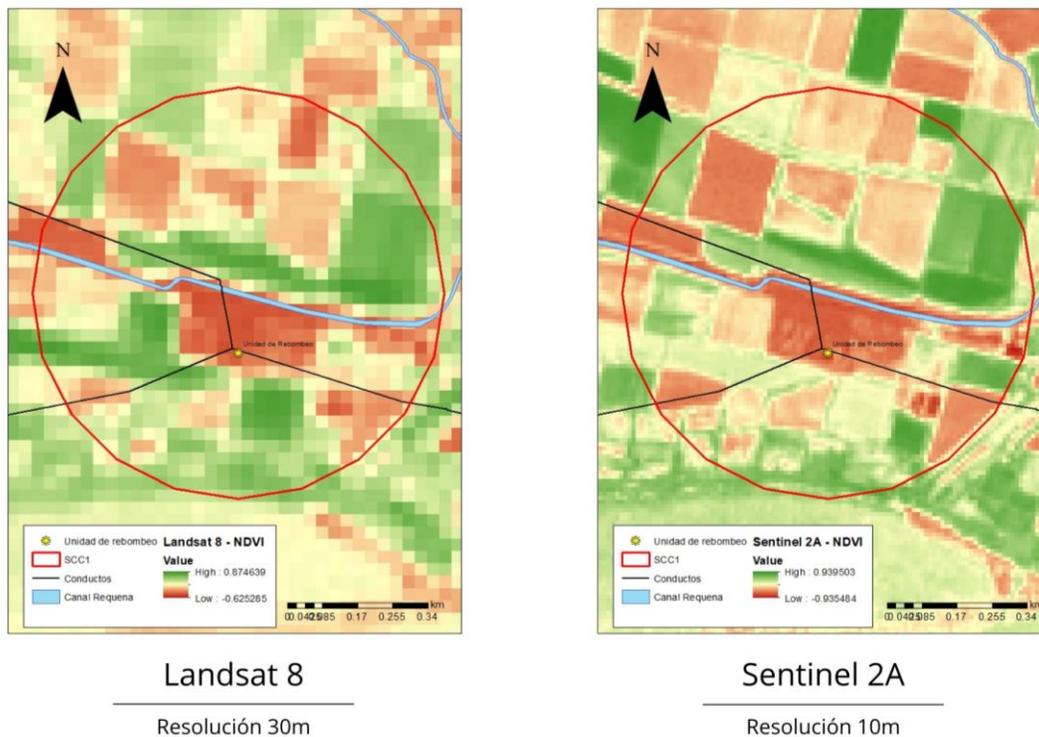


Figura 32. Comparación de la resolución espacial entre Sentinel 2A y Landsat 8 en NDVI. Modificado de la escena Copernicus, 2020 y USGS 2020.

6.2. Análisis de cambio

6.2.1. Combinación de bandas espectrales (RGB) - Comparación visual

Las combinaciones de bandas se realizaron en las tres imágenes satelitales correspondientes a los años 2019, 2020 y 2021, prestando atención principalmente a las parcelas agrícolas aledañas a la unidad de rebombeo y el canal Requena. Alonso (2023) menciona 4 combinaciones (Infrarrojo, Uso Agrícola, Color Natural y Análisis de Vegetación) donde se puede observar el cambio gradual (visiblemente únicamente) en cuanto a la cobertura vegetal, presentando parcelas de cultivo con ausencia, disminución o cambios en esta.

Comparación visual de la combinación 8, 4, 3; Infrarrojo. Las tonalidades rojo brillante representan una vegetación vigorosa (con extrema salud), donde la escena del 2019 es en la que más predomina, en 2020 no existe la tonalidad buscada y menos en las parcelas aledañas al canal o a la unidad de rebombeo, mientras que en 2021 podemos observar una ligera recuperación (Fig.33).

Comparación visual de la combinación 11, 8A, 2; Uso Agrícola. Las tonalidades verdes brillantes hacen presencia de las parcelas cultivadas, donde en el año 2019 resaltan de manera notoria respecto a los años consecutivos, para el año 2020, la ausencia del verde es visible, haciendo alusión a la falta de cultivo presente o saludable. En el año 2021 algunos cultivos aledaños al canal presentan una recuperación (Fig. 34).

Comparación visual de la combinación 4, 3, 2; Color Natural. Respecto a la presencia de daños, esta combinación hace más visible las afectaciones del derrame de hidrocarburos, las tonalidades café cercanas al canal y la unidad de rebombeo trata de suelos desnudos o cultivos perdidos. Donde en el año 2020 los terrenos junto a la unidad de rebombeo se observa una disminución en su tono e intensidad, hablando de pérdidas en cuanto a las parcelas. Pese a su pronta recuperación en el año 2021 es evidente el daño en la misma zona (Fig. 35).

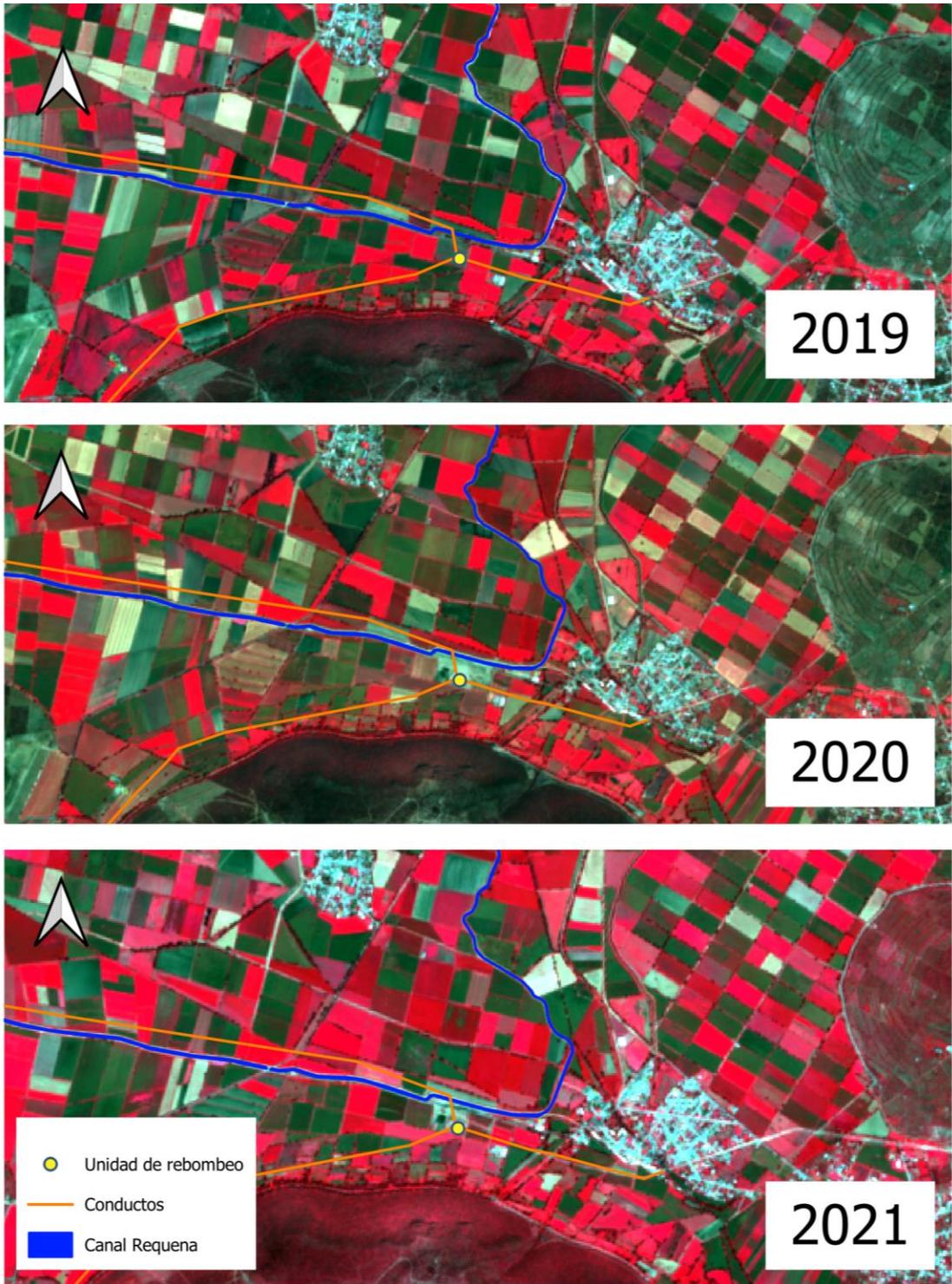


Figura 33. Combinación de bandas RGB para Infrarrojo, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019,2020 y 2021

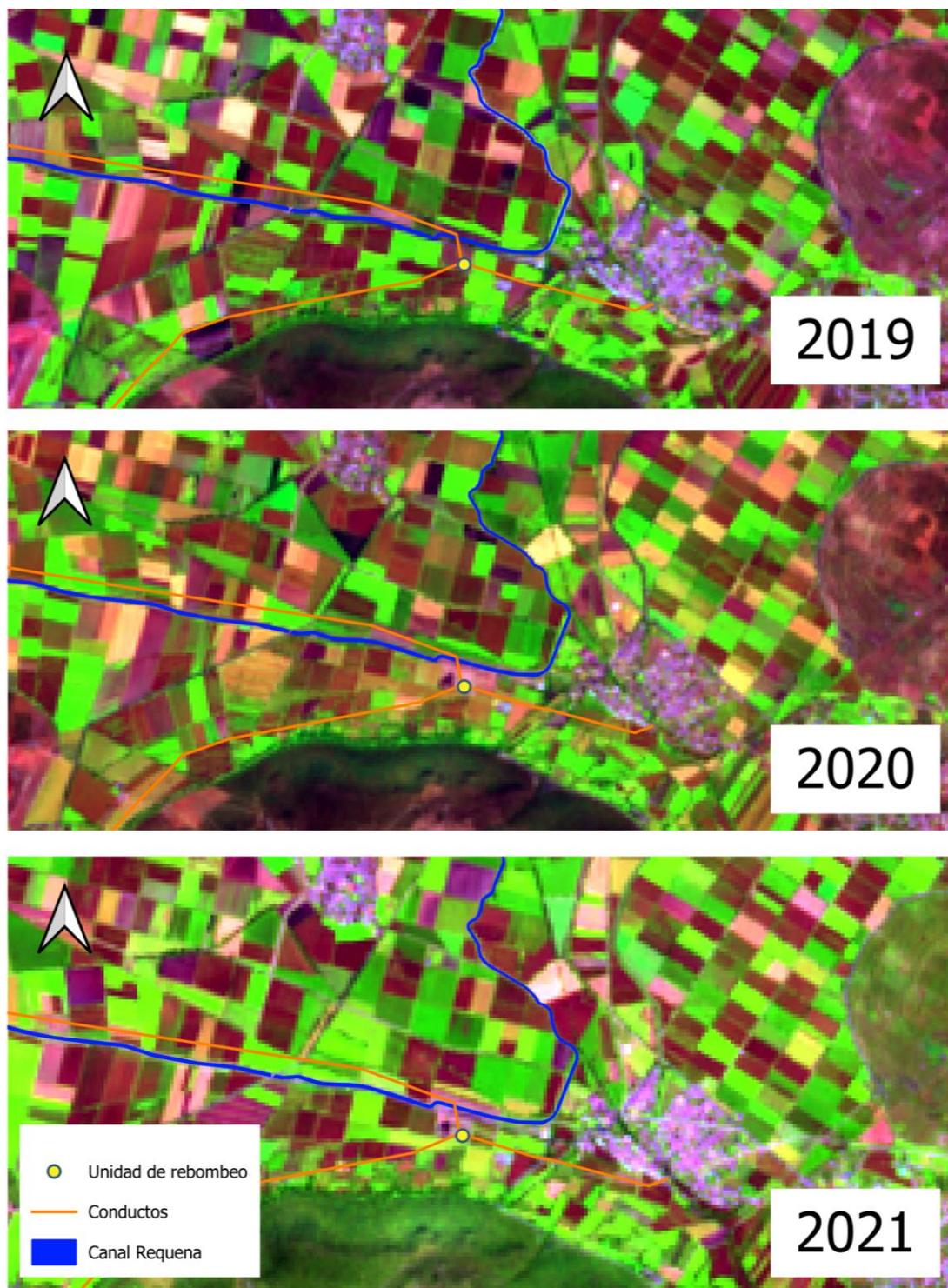


Figura 34. Combinación de bandas RGB para Uso Agrícola, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019, 2020 y 2021

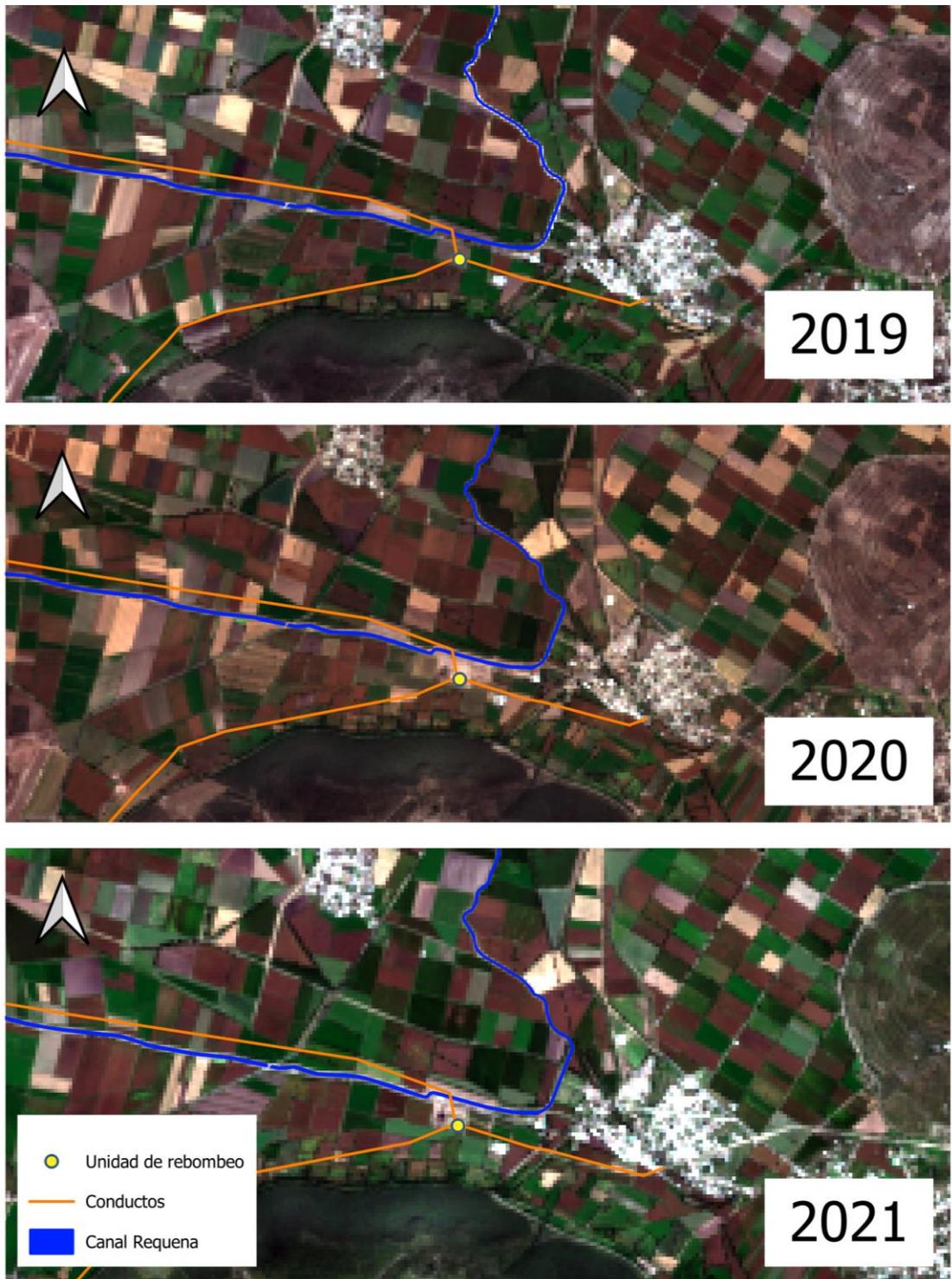


Figura 35. Combinación de bandas RGB para Color Natural, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019, 2020 y 2021.

Comparación visual de la combinación 8A, 11, 2; Análisis de vegetación. Las tonalidades naranja brillantes se hacen notorias en el año 2019, mientras que en el 2020 y 2021 son más dispersas y en una intensidad menor. Esta combinación resalta una vegetación vigorosa y una vegetación escasa (tonalidades café), mismas que predominan en los años posteriores (Fig. 36).

El resultado de la observación de cambios respecto a las combinaciones RGB, hacen evidente (1) el cambio de la cubierta vegetal a través de los años y (2) el lugar dónde se presentó el derrame de hidrocarburo resaltando las parcelas dónde el contaminante tuvo mayor impacto, mismas que se corroboran al momento del análisis espectral.

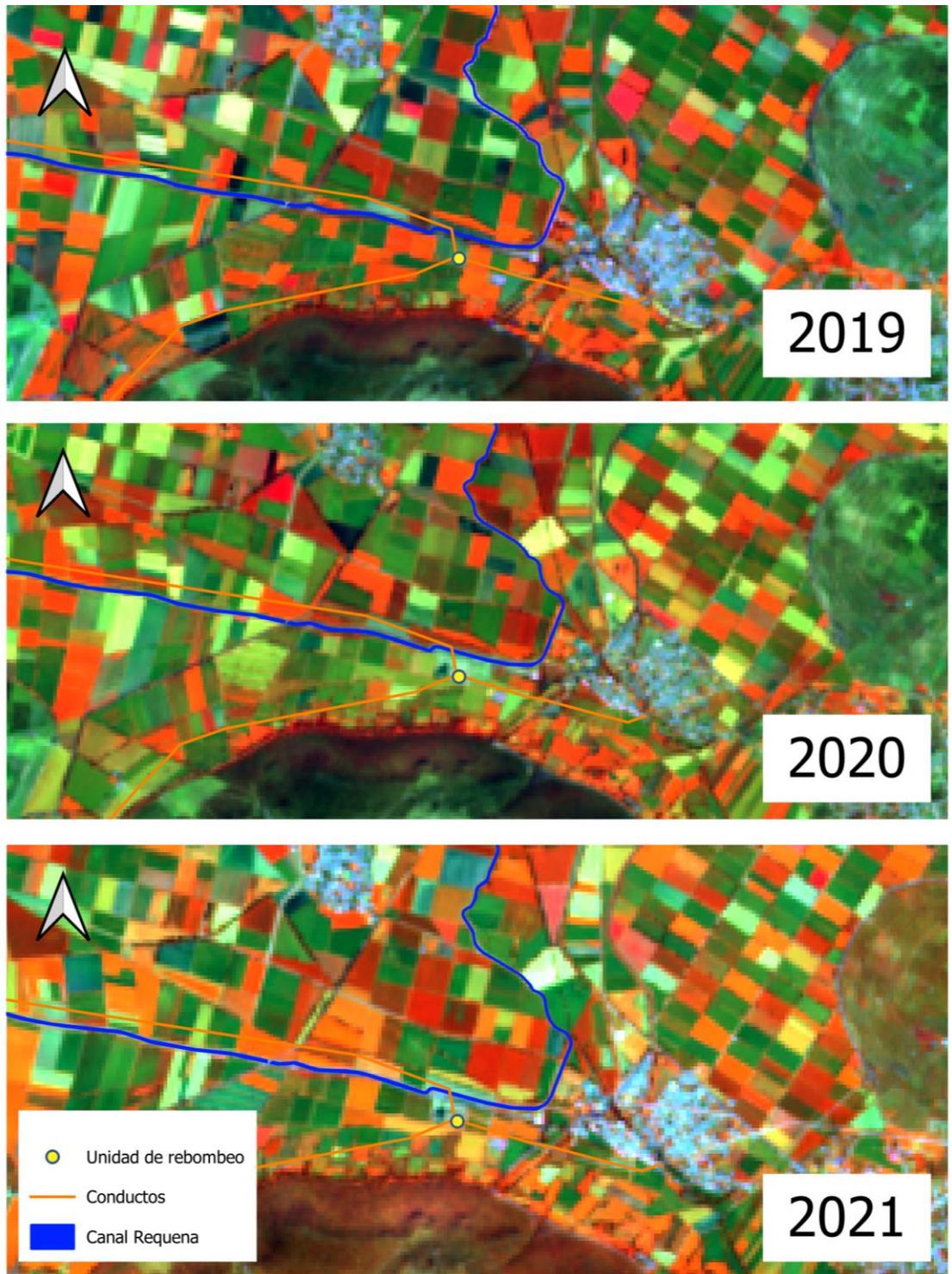


Figura 36. Combinación de bandas RGB para Análisis de vegetación, escala 1:10000. Modificado de la escena Copernicus, 2019, 2020 y 2021.

6.2.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - Mapas de procesamiento.

De acuerdo con Arellano *et al.* (2015) la relación entre la vitalidad de las plantas y la contaminación por petróleo/gas se puede evaluar utilizando indicadores espectrales, con base en el cálculo del NDVI se demostró para cada imagen satelital (2019, 2020 y 2021) el estado de salud de la vegetación confirmando esta teoría. De igual forma Adamu *et al.* (2018) demostraron que la combinación de bandas espectrales (NIR y RED) demuestra características espectrales únicas para la detección del estrés de la vegetación. Teniendo como resultado 3 mapas de procesamiento para la interpretación de valores de reflectancia espectral en la salud de la vegetación.

Las combinaciones de RGB hicieron visible las zonas donde existe una alteración en la cobertura vegetal, con el NDVI se le asignó un valor espectral a cada píxel de la imagen satelital procesada, permitiendo clasificar las coberturas vegetales con base en rangos de valores que representen de mejor forma la superficie del terreno para identificar las áreas donde la cobertura vegetal presenta diferentes grados de estrés o ausencia de esta debido a la contaminación por hidrocarburos. Las zonas contaminadas suelen mostrar valores más bajos cercanos a -1 representado en tonalidades de color rojo. Así mismo, se reconoció la extensión del daño ayudando a cuantificar el área y la severidad de la contaminación, midiendo la diferencia en la salud de la vegetación en las áreas afectadas frente a las no afectadas.

Respecto a la parte de la multitemporalidad, se logró analizar los cambios en los valores de reflectancia espectral con base en la tabla de Mejía *et al.* (2021) en la cobertura vegetal en los tres tiempos del estudio, evaluando si la contaminación fue empeorando de manera progresiva o si existió una recuperación de la cobertura vegetal.

En cuanto a la extracción de valores de reflectancia espectral de los puntos de control para evaluar el estado de la cobertura vegetal los datos que se observan en la tabla 18.

Tabla 18. Valores de reflectancia espectral de los puntos de control en el NDVI del año 2020

Punto de control	Valores de NDVI para el año 2019	Valores de NDVI para el año 2020	Valores de NDVI para el año 2021
1	0.6836	0.1704	0.3515
2	0.8666	0.4952	0.4866
3	0.9191	0.3917	0.4789
4	0.9113	0.2404	0.5574
5	0.3256	0.4864	0.9083
6	0.5263	0.6885	0.2198
7	0.3048	0.1664	0.1558
8	0.9147	0.8713	0.5998
9	0.2496	0.3507	0.8518
10	0.9142	0.8450	0.5005

La interpretación de los valores de NDVI se basa en una escala que varía de -1 a 1. Estos valores representan diferentes estados de la superficie terrestre y la salud de la vegetación. En el contexto de zonas agrícolas contaminadas con hidrocarburos, los valores de NDVI son interpretados de la siguiente manera:

1. Valores significativamente más bajos en el año 2020 en comparación al año 2021

Los valores bajos (Punto 1, 3, 4, 5, 7 y 9) indican un daño o estrés en la vegetación debido a la contaminación. Dónde el cultivo por la presencia de hidrocarburos presenta afectaciones en su capacidad de desarrollo o bien hubo una pérdida de ellos. (Fig. 24)

2. Variaciones en los valores de NDVI a través de la multitemporalidad de los años estudiados.

El estudio multitemporal mostró una disminución progresiva de los valores de NDVI frente a los años 2019 y 2020 en las parcelas agrícolas aledañas a la unidad de rebombeo y el canal Requena. Entre

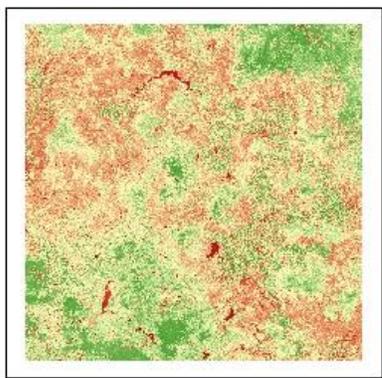
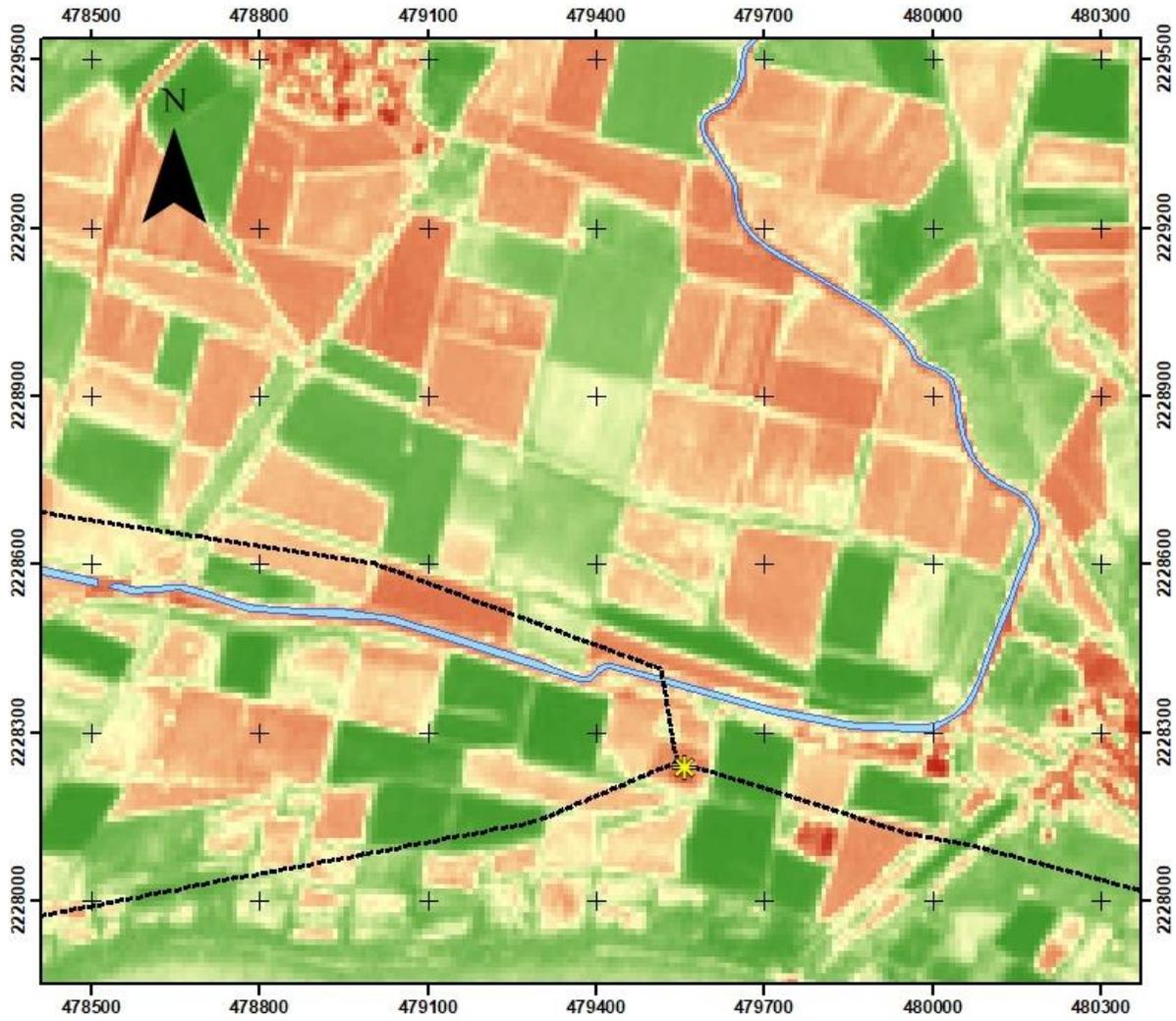
los años 2020 y 2021 se muestra una recuperación para la mayoría de las parcelas agrícolas descartando un daño ambiental progresivo. (Fig. 24)

3. Contraste entre áreas contaminadas y no contaminadas

Los mapas de procesamiento de las escenas NDVI, se observa los límites y la extensión de las parcelas afectadas por la contaminación mediante la comparación de valores de NDVI entre las áreas mayormente contaminadas (puntos 1, 3, 4, 5, 7 y 9) y las de menor grado de afectación (puntos 6, 8 y 10). (Fig. 24)

Es importante destacar que la selección de puntos de control se realizó únicamente para observar de manera detallada los cambios generales presentes en las 3 escenas de NDVI.

Para la escena Sentinel en NDVI del año 2019 (Fig. 37) se logró observar cultivos en un estado de salud vigorosa con valores de hasta 0.93 de reflectancia espectral. Si bien se presentan áreas en tonalidades rojas por la unidad de rebombeo es debido a que el suelo no presenta cobertura vegetal, para las parcelas cercanas al canal de riego que presentan tonalidades rojas similares dónde se intuye que eventos similares en años anteriores debido a que los conductos de hidrocarburo pasan por la zona y por el derrame ocurrido en la unidad de rebombeo con valores de -0.97 de reflectancia espectral.



Escena Sentinel 2A NDVI completa

Simbología

- Unidad de rebombeo
- Conductos
- Canal Requena

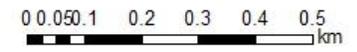
NDVI del 14 de Octubre 2019

Valores

- High : 0.99834
- Low : -0.974026

Interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2019 (antes del derrame)

Sistema de coordenadas:
UTM Zona 14N
Proyección: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984
Unidades: Metros



Escala: 1:10.000

Elaborado por: **Danae Mejía**

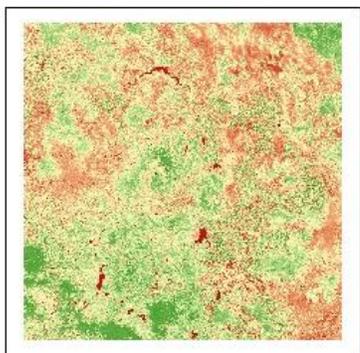
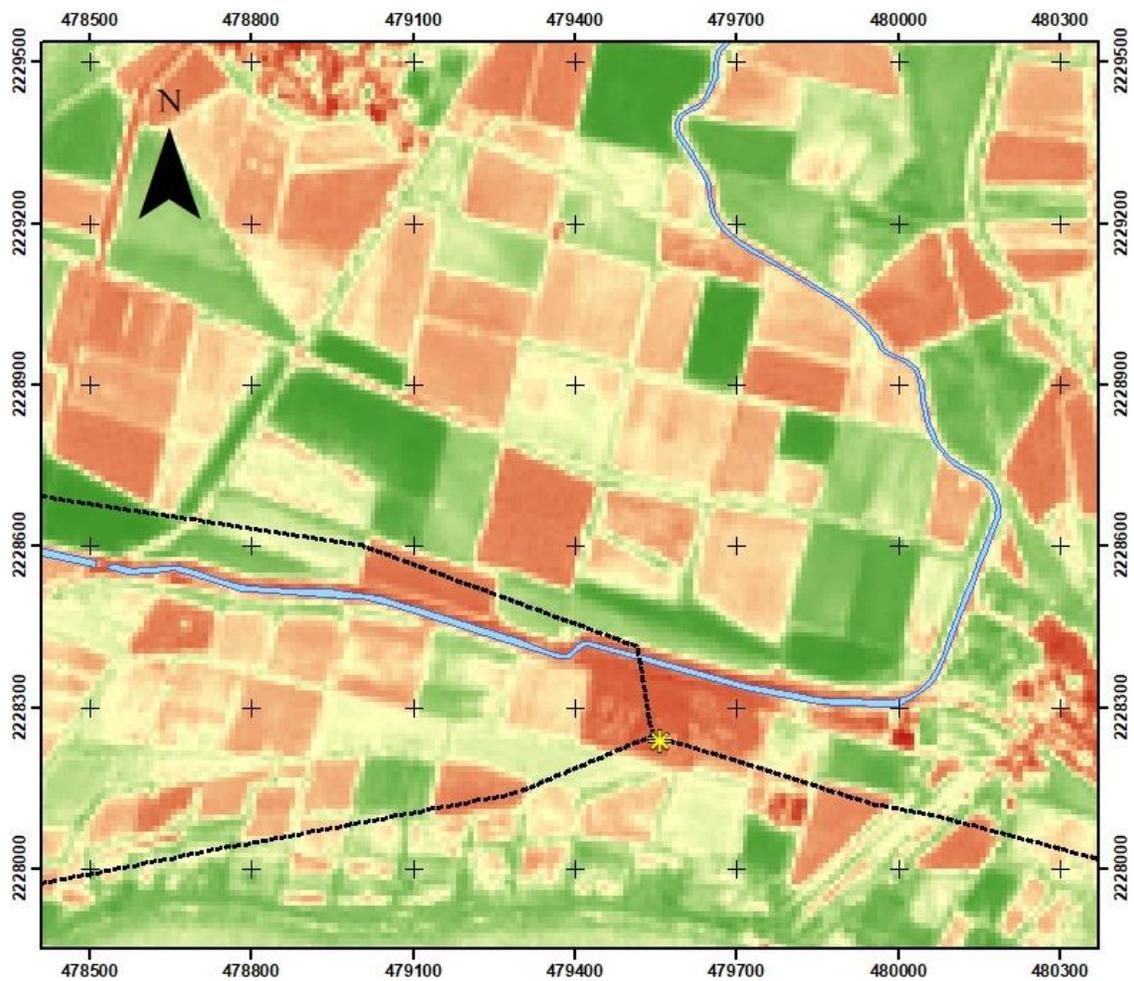
Figura 37. Mapa de procesamiento de interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2019. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2029.

Para la escena Sentinel en NDVI del año 2020 (Fig. 38) se observó un cambio drástico en la superficie del terreno. Las tonalidades rojas abarcaron una mayor área de extensión principalmente en la línea del canal de riego y el área de la unidad de rebombeo con valores de -0.93 de reflectancia espectral. Las tonalidades verdes presentaron valores positivos de 0.93 pero fuera de la delimitación del área de afectación principal, es decir corresponde a parcelas agrícolas fuera del alcance de contaminación.

Las parcelas agrícolas que en el año 2019 presentaban tonalidades verdes con valores espectrales dentro del rango de 0.55 a 1 de una vegetación sana ahora han cambiado debido a la contaminación por el derrame de hidrocarburos con valores espectrales dentro del rango de 0.2 a 0.45 correspondiente a suelos sin vegetación o escasa vegetación, siendo notorio el cambio de la cobertura vegetal.

Para la escena Sentinel en NDVI del año 2021 (Fig. 39) se observó la recuperación de las tonalidades verdes con valores de hasta 0.99 de reflectancia espectral, sin embargo, dichos valores se encontraron fuera del área de estudio principal. Las parcelas agrícolas que se encuentran cerca de la línea del canal de riego y dentro del área de la unidad de rebombeo presentaron notoriamente aún una afectación como consecuencia del derrame y su alcance con valores de -1.

Si bien las parcelas próximas se encuentran en un estado de recuperación más evidente el análisis de NDVI del 2021 permite destacar las parcelas agrícolas que se observan mayormente vulneradas debido a la cercanía que tiene con la unidad de rebombeo, prestando atención a futuros planes de acción que permitan sugerir un tratamiento de remediación acorde al grado de afectación que los cultivos presentan.



Escena Sentinel 2A NDVI completa

Simbología

- Unidad de rebombeo
- Conductos
- Canal Requena

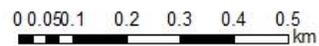
NDVI del 8 de octubre 2020

Valores

- High : 0.939503
- Low : -0.935484

Interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2020 (durante el derrame)

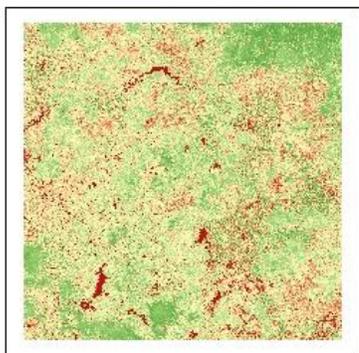
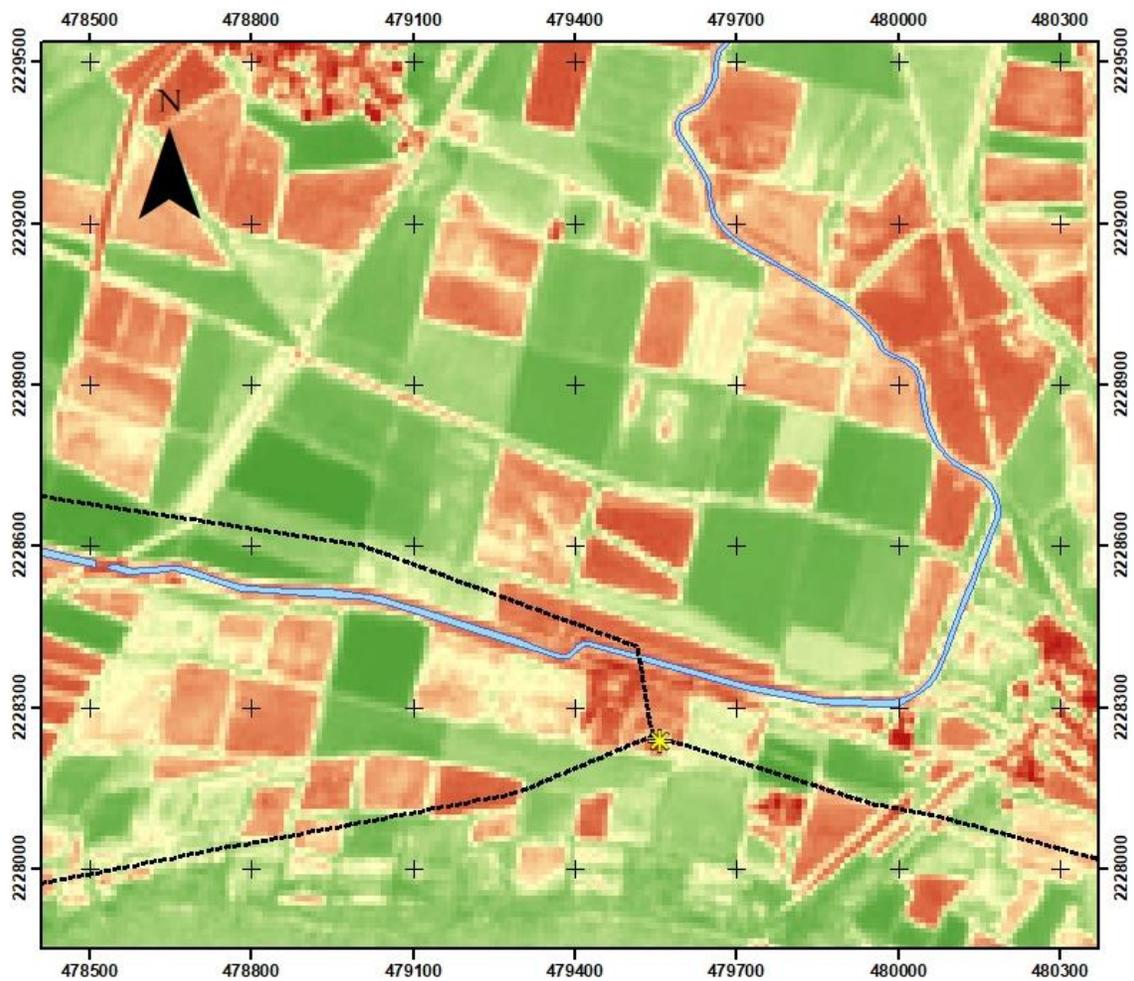
Sistema de coordenadas:
 UTM Zona 14N
 Proyección: Transversa de Mercator
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Metros



Escala: 1:10.000

Elaborado por: **Danae Mejía**

Figura 38. Mapa de procesamiento de interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2020.



Escena Sentinel 2A NDVI completa

Simbología

- Unidad de bombeo
- Conductos
- Canal Requena

NDVI del 8 de octubre del 2021

Valores

High: 0.999286

Low: -1

Interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2021 (posterior al derrame)

Sistema de coordenadas:
UTM Zona 14N
Proyección: Transversa de Mercator
Datum: WGS 1984
Unidades: Metros

0 0.050.1 0.2 0.3 0.4 0.5 km

Escala: 1:10.000

Elaborado por: **Danae Mejía**

Figura 39. Mapa de procesamiento de interpretación de valores de reflectancia espectral en el NDVI del año 2021. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2021.

6.3. Delimitación del área de estudio

Adamu *et al.* (2018) menciona que el registro de zonas contaminadas y no contaminadas deberán tener un punto de control en el comportamiento del contaminante. Esto debido a que los derrames pueden migrar desde el punto de origen y afectar así los alrededores. Para analizar el grado de afectación y su comportamiento se establecieron 3 secciones de estudio, (1) el área de afectación principal, (2) el área previa al derrame y (3) el área posterior al derrame.

La primera sección (**SCC1**) representa el área de afectación principal, lugar donde ocurrió el derrame y las afectaciones directas en las parcelas agrícolas más cercanas, donde se puedan encontrar los valores de reflectancia espectral más bajos con -0.018745 en las parcelas agrícolas afectadas en el año del derrame (Fig. 40).

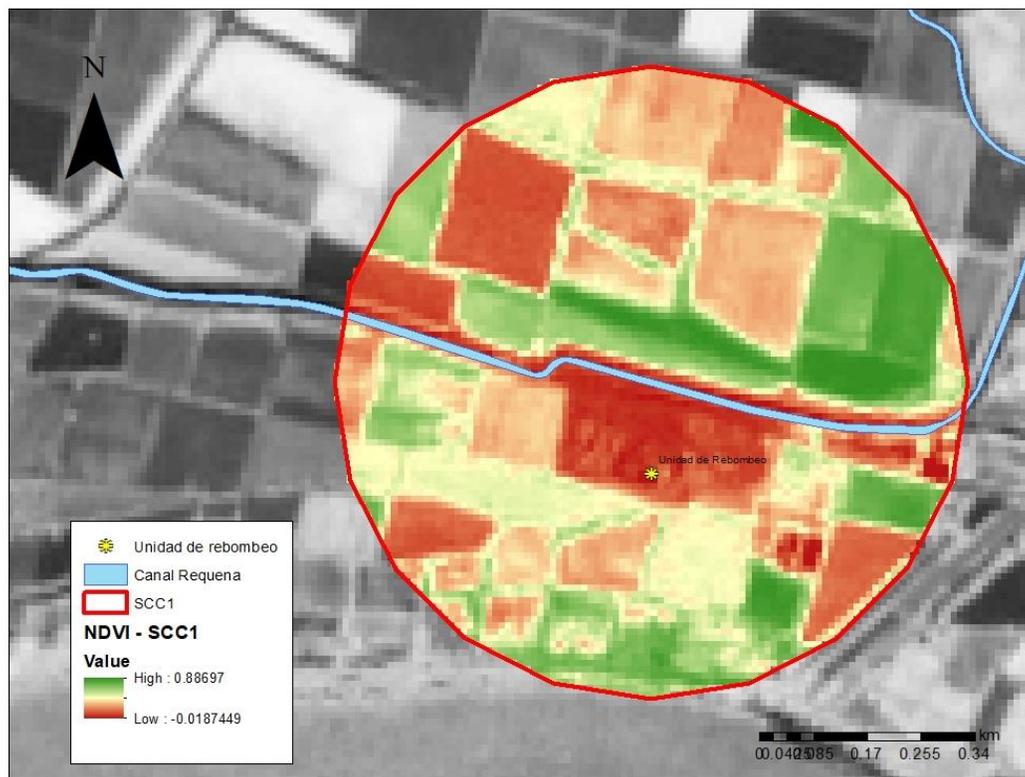


Figura 40. Análisis NDVI de la sección 1 del estudio.

La segunda sección (**SCC2**) representa el área previa al derrame, dónde se encontraron valores espectrales mayores a los de la sección 1; es decir, siguiendo el flujo de la corriente del canal (de oeste a este) las parcelas agrícolas que se encuentran previo a la unidad de rebombeo presentaron un menor grado de afectación en general debido a que no es una zona directa de contaminación para este estudio (Fig. 41).

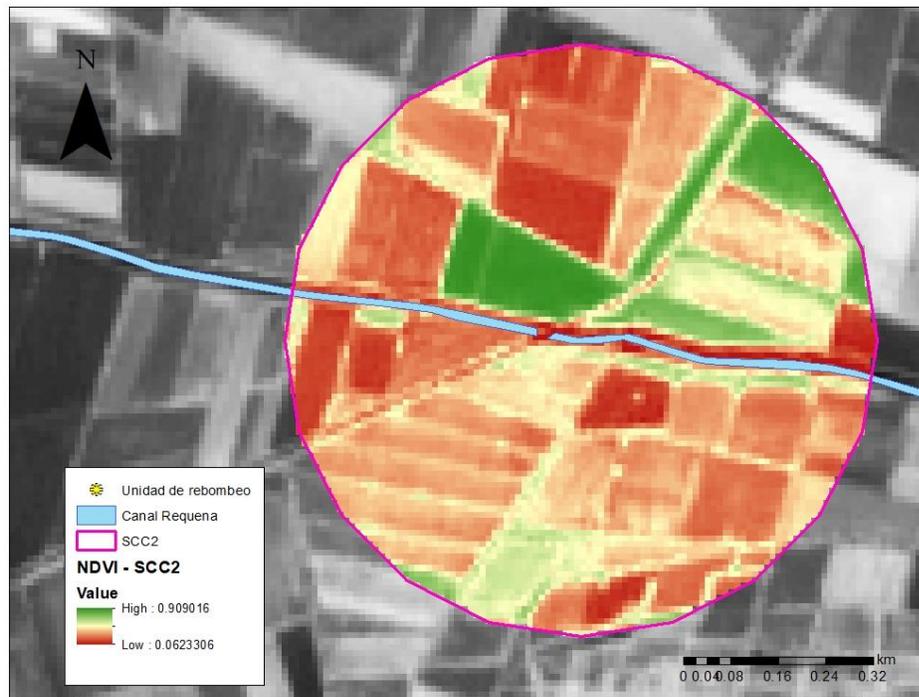


Figura 41. Análisis NDVI de la sección 2 del estudio.

La tercera sección (**SCC3**) representa el área posterior al derrame, dónde en relación con la sección 1, presenta valores ligeramente mayores obedeciendo a la condición de flujo del contaminante en el canal de forma indirecta. Existe un grado de afectación, pero este es menor respecto a las zonas de cultivo que retuvieron en su mayoría el contaminante. Con relación a la sección 2, los valores de reflectancia espectral fueron significativamente menores, debido a que la SCC2 se presentó como punto de control de valores relativamente sanos y la SCC3 como un área de afectación menor (Fig. 42).

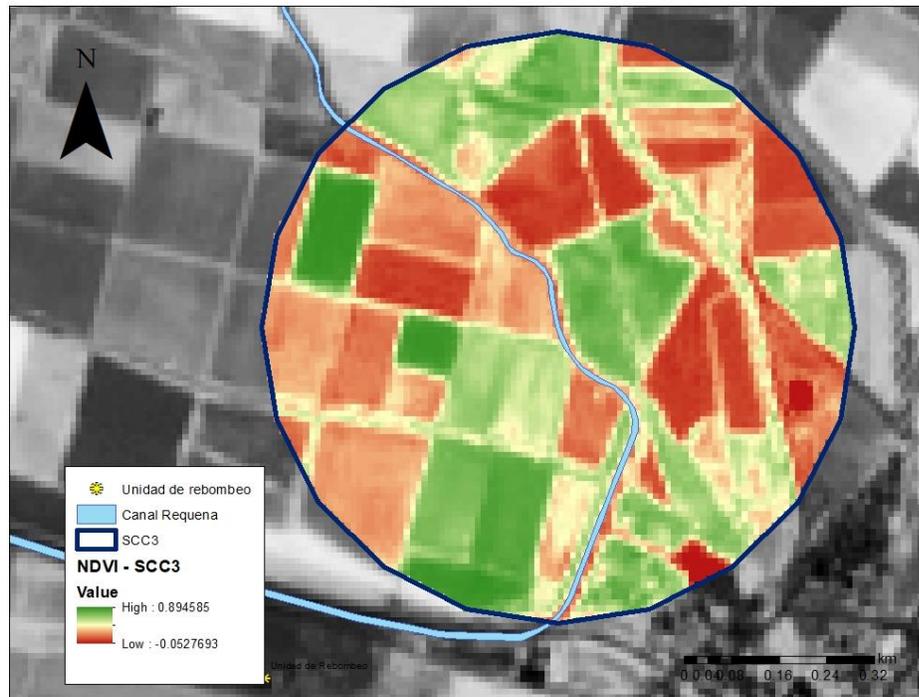


Figura 42. Análisis NDVI de la sección 3 del estudio.

6.4. Selección de la cubierta vegetal por valor de reflectancia

La selección de puntos vectoriales sirvió para la identificación de las diferentes coberturas vegetales en cuanto al estado de salud en que se presentan las diferentes secciones. La selección de valores de reflectancia espectral se realizó dentro del rango de 0.55 a 1, que representa la vegetación saludable. Esto con la finalidad de resaltar la vegetación que ha cambiado por pérdida o daño derivado al derrame de hidrocarburo.

Para la observación detallada de cada sección en las 5 clases de clasificación de cobertura vegetal ver anexo 3.

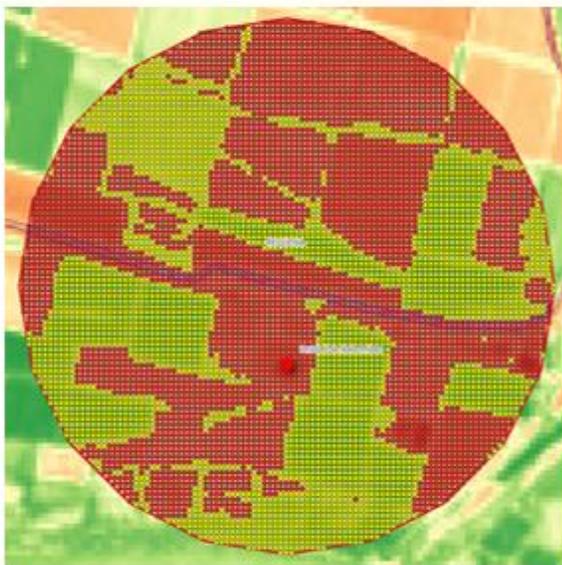
A continuación, se muestra el resultado comparativo de las tres secciones del estudio para los años 2019-2020 y 2020-2021.

Para la sección 1, en los años indicados se logra observar la pérdida de cobertura vegetal en mayor magnitud en las parcelas agrícolas aledañas a la línea del canal, fuente de contaminación que al momento del derrame el hidrocarburo se vertió a través de las canaletas de riego (Fig. 43). Para los años 2020 y 2021 se logró observar una recuperación de la vegetación, sin embargo, en las zonas aledañas a la línea del canal y la unidad de rebombeo aún es evidente el daño (Fig. 44).

1° SECCIÓN (área del derrame)

Suelos con abundante vegetación – Valores de NDVI de 0.55 a 1.0

NDVI 2019 - SCC1



NDVI 2020 - SCC1

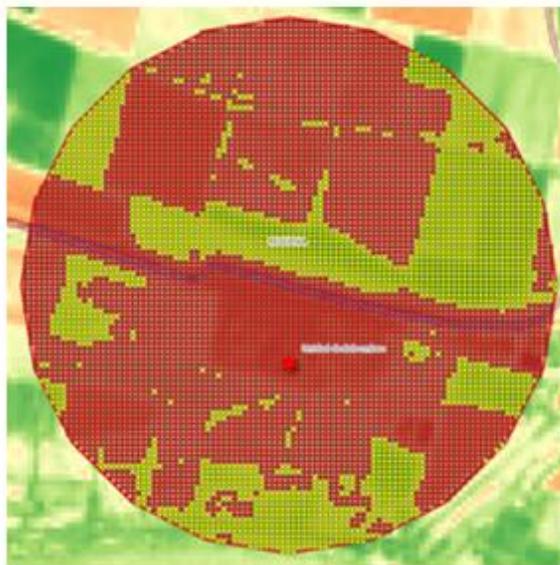


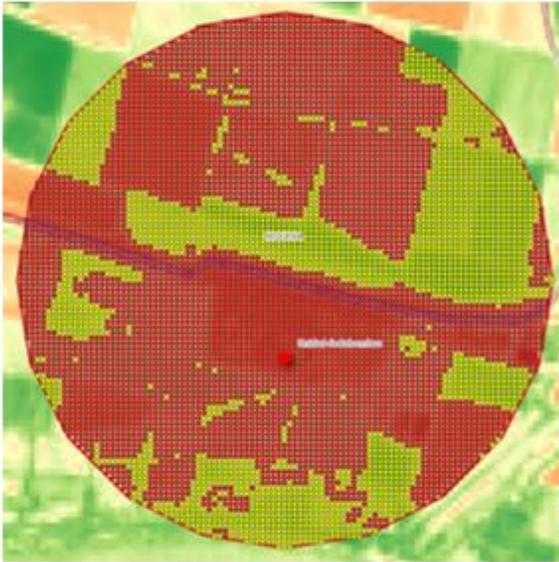
Figura 43. Análisis de cobertura vegetal de la sección 1 entre el año 2019 y 2020

1° SECCIÓN

(área del derrame)

Suelos con abundante vegetación – Valores de NDVI de 0.55 a 1.0

NDVI 2020 - SCC1



NDVI 2021 - SCC1

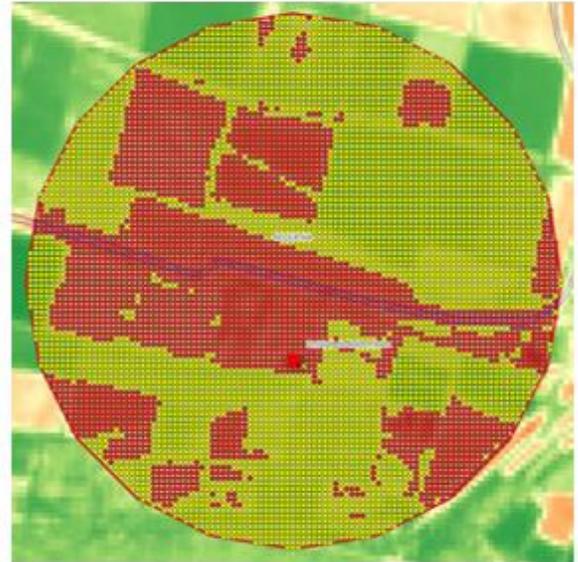


Figura 44. Análisis de cobertura vegetal de la sección 1 entre el año 2020 y 2021

Para los años 2019 y 2020 en la sección 2, el cambio de la cobertura vegetal es notorio en la sección sur en el año 2020, cabe resaltar que en la sección 2 dos existe el cruce de 4 ductos de hidrocarburo que de igual forma han sido objeto de accidentes mencionados en el artículos periodísticos como el de La Silla Rota, (2020), siendo esto un factor importante para el cambio de cobertura vegetal, mismo que se encuentra fuera de alcance temporal de los objetivos del presente trabajo de investigación. (Fig. 45). Para los años 2020 y 2021, se logra observar una recuperación de la cobertura vegetal, sin embargo, al contrario de la sección uno, esta es en menor proporción (Fig. 46).

2° SECCIÓN

(área previa al derrame como punto de control)

Suelos con abundante vegetación – Valores de NDVI de 0.55 a 1.0

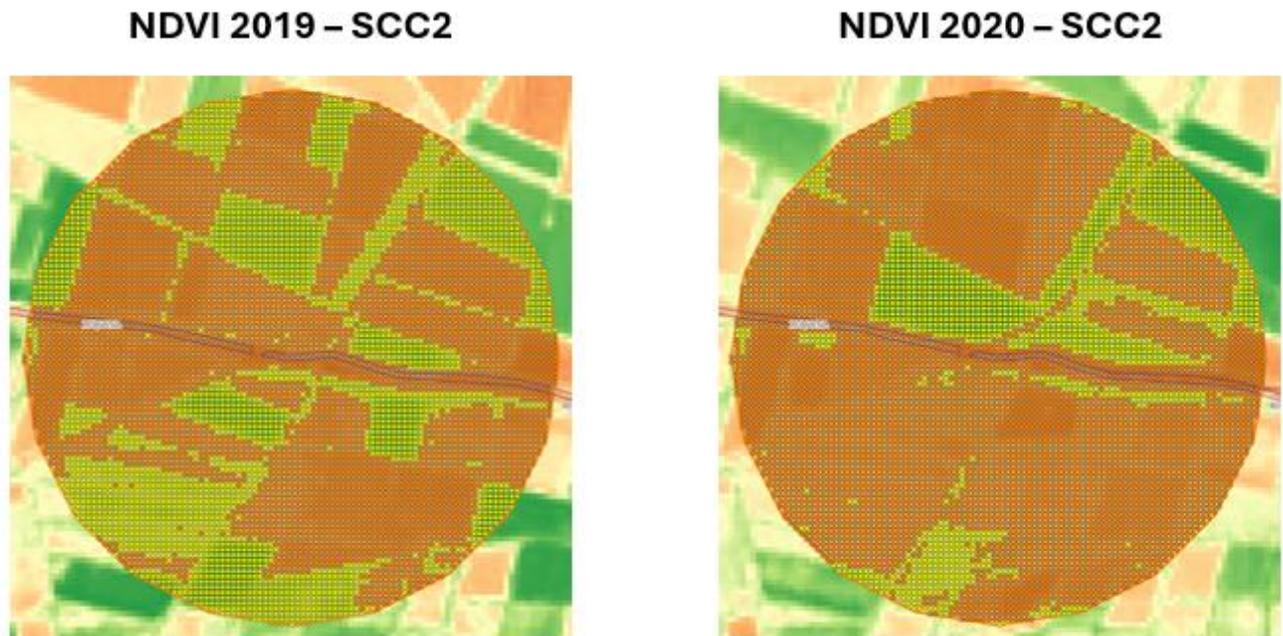


Figura 45. Análisis de cobertura vegetal de la sección entre el año 2019 y 2020

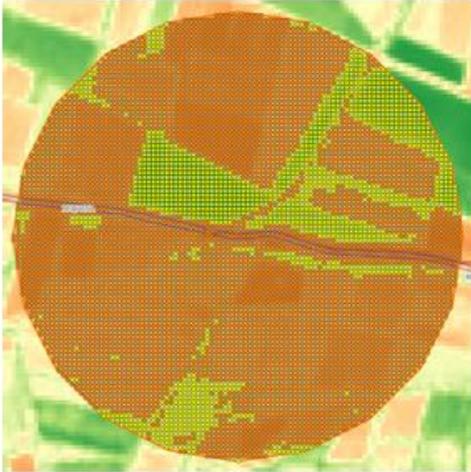
Para los años 2019 y 2020 en la sección 3, se percibe la pérdida de cultivos mayormente en la porción noroeste misma que sigue la línea del canal, dicha pérdida es en menor proporción respecto a la sección 1 por ser un área de menor afectación (Fig. 47). Para los años 2020 y 2021 la recuperación de la cobertura vegetal es visible en la porción noreste, sin embargo, en la porción noreste existe la ausencia de una vegetación sana, por lo que se puede evidenciar que existió un mayor daño en los cultivos que se encuentran en esa zona o que se encuentran en un proceso de transformación. (Fig. 48)

2° SECCIÓN

(área previa al derrame como punto de control)

Suelos con abundante vegetación – Valores de NDVI de 0.55 a 1.0

NDVI 2020 – SCC2



NDVI 2021 – SCC2

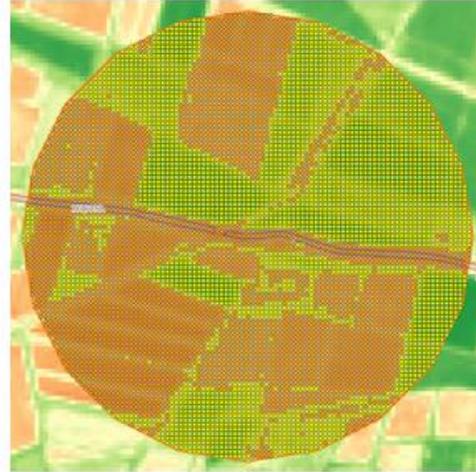


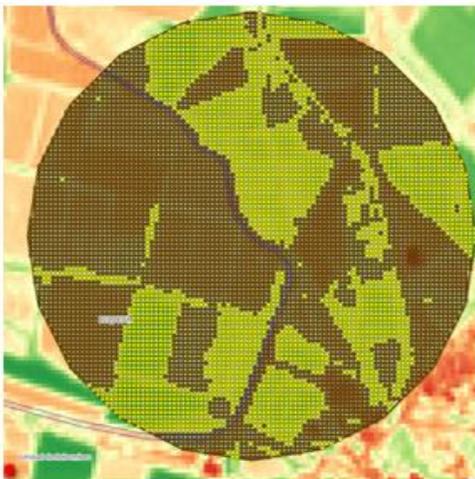
Figura 46. Análisis de cobertura vegetal de la sección 2 entre el año 2020 y 2021

3° SECCIÓN

(área posterior al derrame como comportamiento del contaminante)

Suelos con abundante vegetación – Valores de NDVI de 0.55 a 1.0

NDVI 2019 – SCC3



NDVI 2020 – SCC3

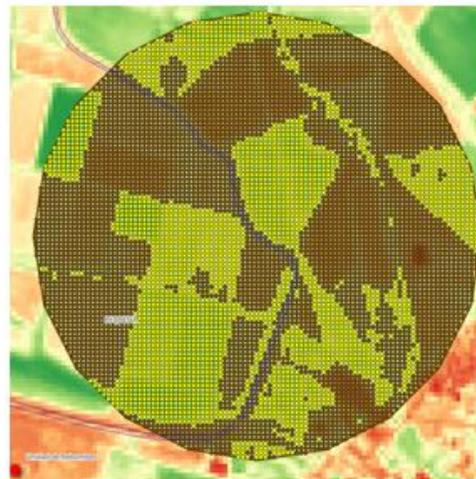


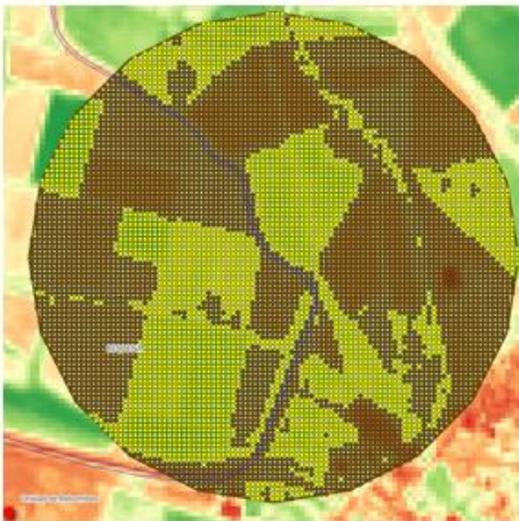
Figura 47. Análisis de cobertura vegetal de la sección 3 entre el año 2019 y 2020

3° SECCIÓN

(área posterior al derrame como comportamiento del contaminante)

Suelos con abundante vegetación - Valores de NDVI de 0.55 a 1.0

NDVI 2020 – SCC3



NDVI 2021 – SCC3

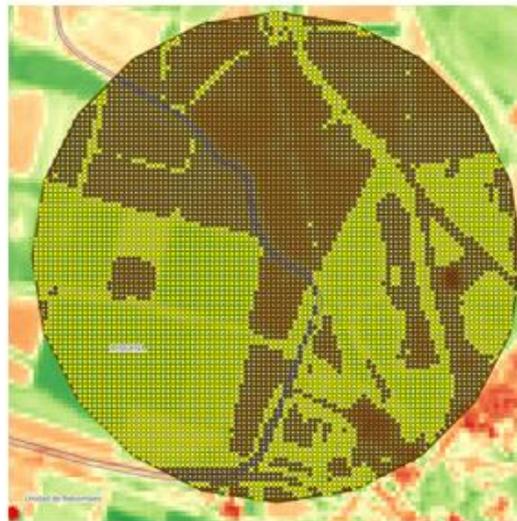
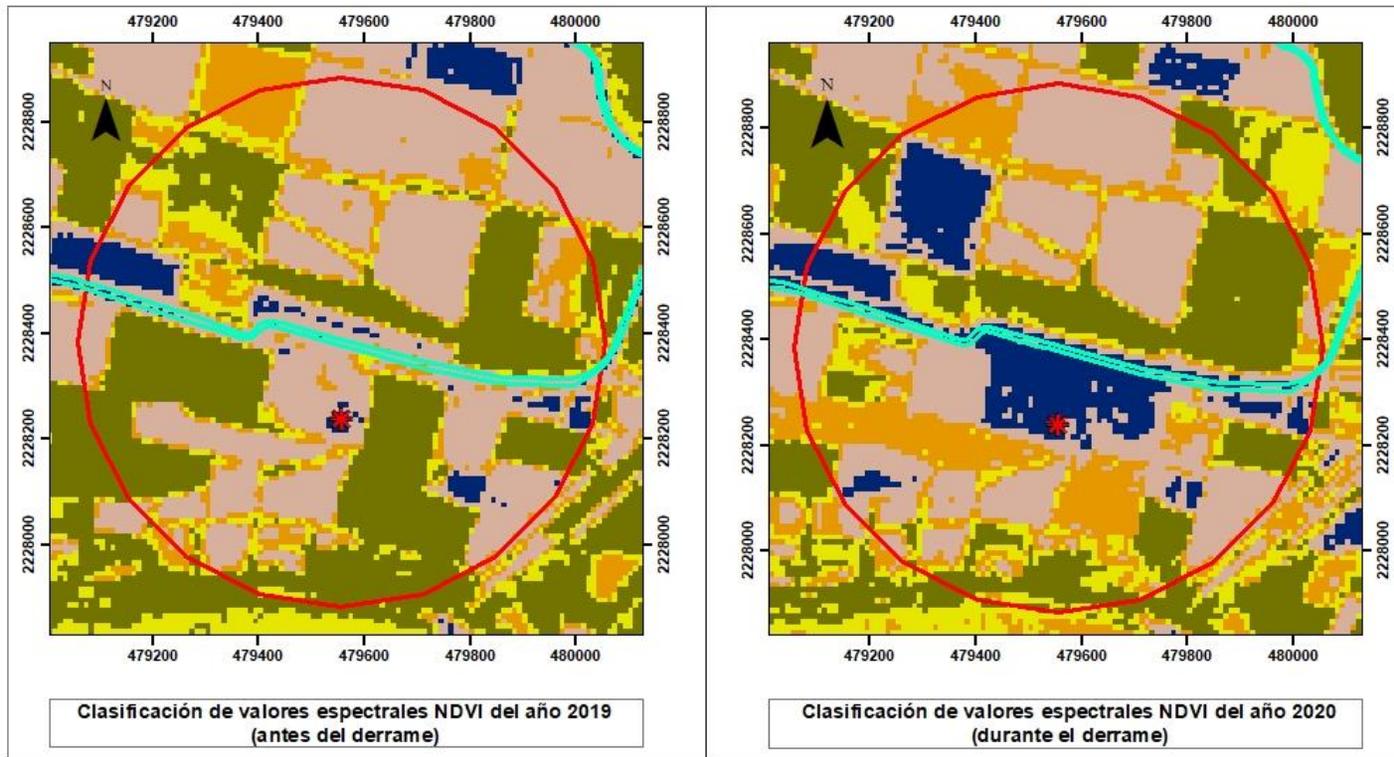


Figura 48. Análisis de cobertura vegetal de la sección 3 entre el año 2020 y 2021

6.5. Mapas de cambio – Análisis estadístico

Con las capas raster resultantes de las operaciones lógicas se elaboraron los mapas de cambio para los años 2019-2020, 2020-2021 y 2019-2021 para realizar la comparación de la superficie terrestre con la clasificación de valores de reflectancia espectral resultantes.

Para el año 2019 – 2020, se observa el aumento del suelo sin vegetación en la zona cercana a la unidad de rebombeo y las parcelas aledañas en la porción sur del año 2020, así como en la parte noroeste destacando dos parcelas agrícolas en particular, los cultivos que presentaban una vegetación sana y abundante han disminuido considerablemente convirtiéndose en suelo sin, escasa o bien en proceso de transformación que indican una leve recuperación de la cobertura vegetal (Fig. 49).



Mapa de comparación de cobertura vegetal; año 2019 y 2020 en la sección 1 del derrame de hidrocarburo en la comunidad de Juandhó, Hidalgo.

Simbología

- Unidad de bombeo
- Canal Requena
- Sección 1
- Sin vegetación, agua o sombras
- Suelo sin cobertura o vegetación escasa
- Suelos en proceso de transformación o pastizales
- Vegetación dispersa
- Vegetación abundante

Sistema de coordenadas:
 UTM Zona 14N
 Proyección: Transversal de Mercator
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Metros

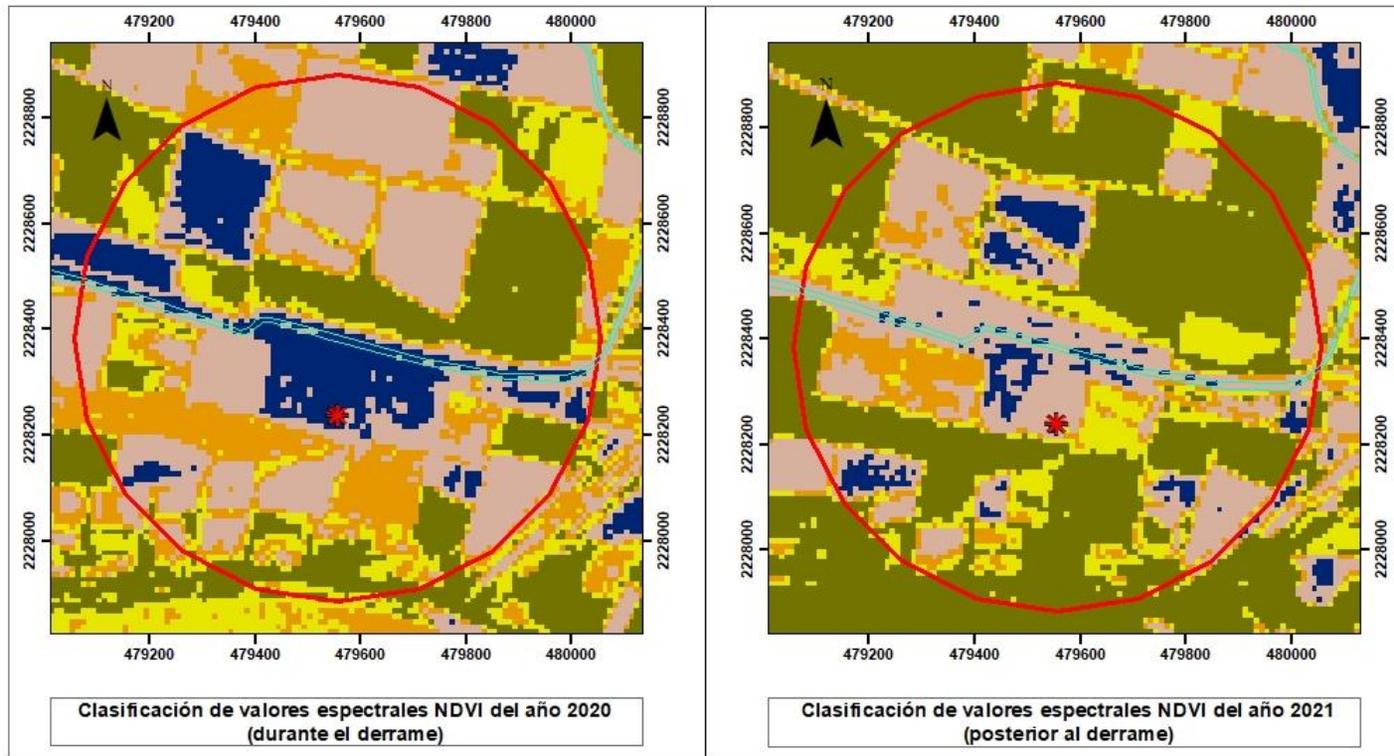
0 0.075 0.15 0.3 0.45 0.6 km

Esca: 1:10.000

Figura 49. Mapa de comparación de cobertura vegetal entre el año 2019 y 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos raster de Sentinel 2A (2019 y 2020).

Para el año 2020 – 2021 las parcelas que en 2020 presentó un suelo sin cobertura o vegetación escasa ahora se encuentran en proceso de transformación o bien ya presentan una vegetación abundante, es decir que existió una recuperación progresiva en cuanto a la salud de la vegetación. De manera general se observa la disminución del suelo sin vegetación en las zonas cercanas a la unidad de rebombeo convirtiéndose en suelos en proceso de transformación, mostrando una recuperación en menor grado debido a que fueron las zonas de mayor impacto en el derrame de hidrocarburo (Fig. 50).

Para el año 2019 – 2021 se realizó el comparativo de las zonas que en 2019 se encontraban en un buen estado de salud y que en 2021 puedan presentar daños o recuperación. En el año 2019 se observa una superficie considerable de suelo con vegetación escasa a diferencia del año 2021 incluso en zonas alejadas a la unidad de rebombeo. Esto debido a que en el año 2019 hubo un incidente similar al del caso de estudio. Las imágenes capturadas para el año 2019 ya reflejaban los daños presentes en la cobertura vegetal, es por ello en que el año 2021 se muestra un aumento significativo en cuanto a la vegetación abundante presente en la zona, los resultados son consistentes en la cercanía a la unidad de rebombeo dónde es evidente el daño y el proceso de recuperación que el suelo está teniendo (Fig. 51).



Mapa de comparación de cobertura vegetal; año 2020 y 2021 en la sección 1 del derrame de hidrocarburo en la comunidad de Juandhó, Hidalgo.

Simbología

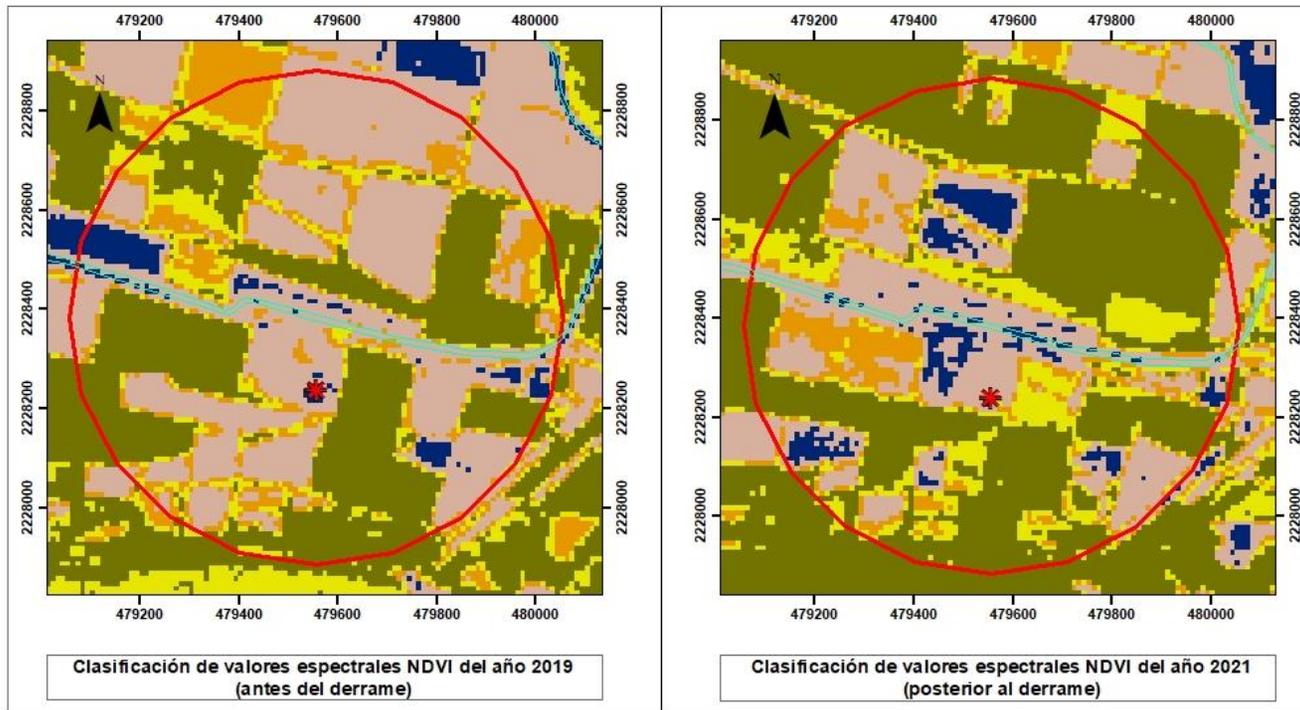
- Unidad de bombeo
- Canal Requena
- Sección 1
- Sin vegetación, agua o sombras
- Suelo sin cobertura o vegetación escasa
- Suelos en proceso de transformación o pastizales
- Vegetación dispersa
- Vegetación abundante

Sistema de coordenadas:
 UTM Zona 14N
 Proyección: Transversal de Mercator
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Metros

0 0.075 0.15 0.3 0.45 0.6 km

Escala: 1:10.000

Figura 50. Mapa de comparación de cobertura vegetal entre el año 2020 y 2021. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos raster de Sentinel 2A (2020 y 2021)



Mapa de comparación de cobertura vegetal; año 2019 y 2021 en la sección 1 del derrame de hidrocarburo en la comunidad de Juandhó, Hidalgo.

Simbología

- Unidad de bombeo
- Canal Requena
- Sección 1
- Sin vegetación, agua o sombras
- Suelo sin cobertura o vegetación escasa
- Suelos en proceso de transformación o pastizales
- Vegetación dispersa
- Vegetación abundante

Sistema de coordenadas:
 UTM Zona 14N
 Proyección: Transversal de Mercator
 Datum: WGS 1984
 Unidades: Metros

Escala: 1:10.000

Figura 51. Mapa de comparación de cobertura vegetal entre el año 2019 y 2021. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024 de acuerdo con el conjunto de datos raster de Sentinel 2A (2019 y 2021).

6.6. Mapas de pérdida y recuperación – Análisis estadístico

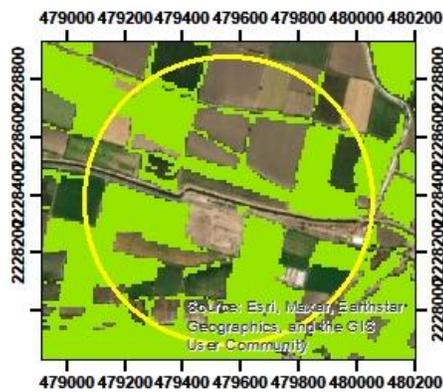
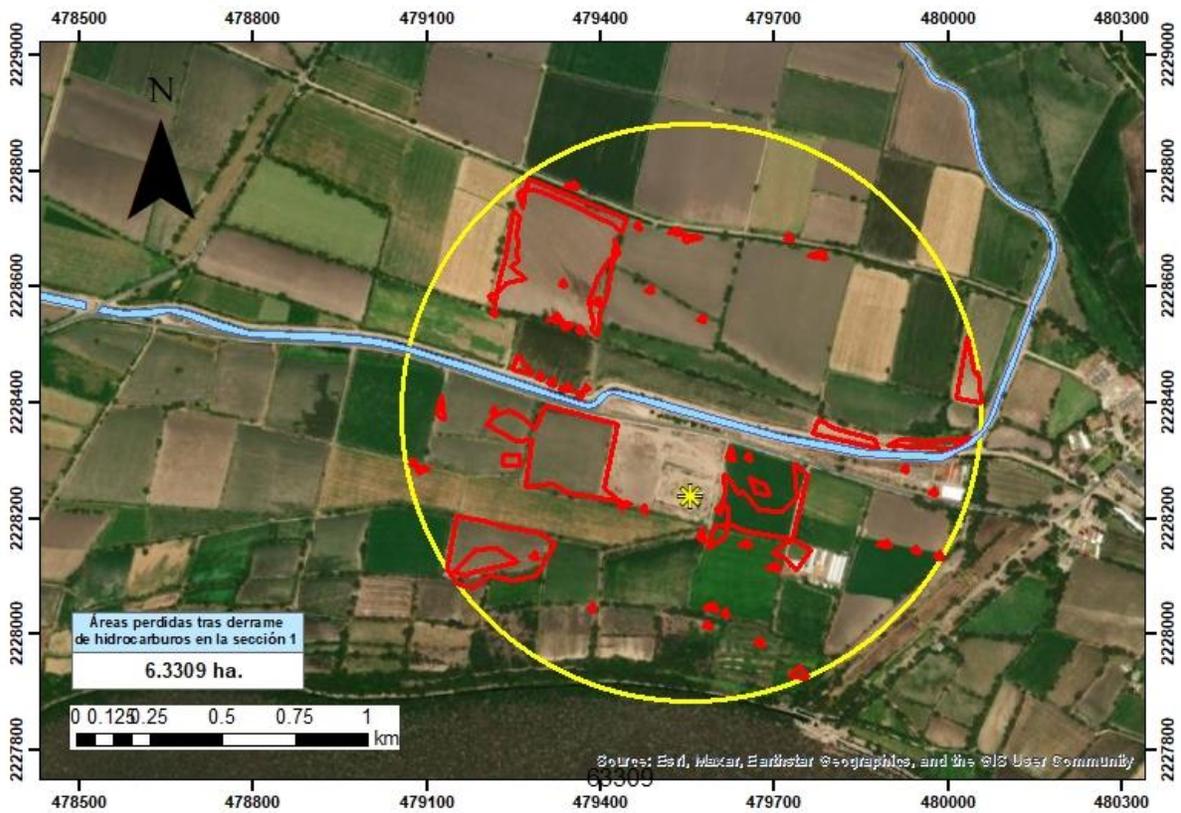
6.6.1. Mapa de pérdida año 2019 – 2020

La comparativa se realiza entre la vegetación sana del año 2019 y la vegetación afectada del año 2020, donde hubo una pérdida de 6.33 ha en la sección 1 del estudio (el mapa se centra en la sección 1 por ser el área principal del derrame, es decir el área más vulnerable durante el derrame de hidrocarburo).

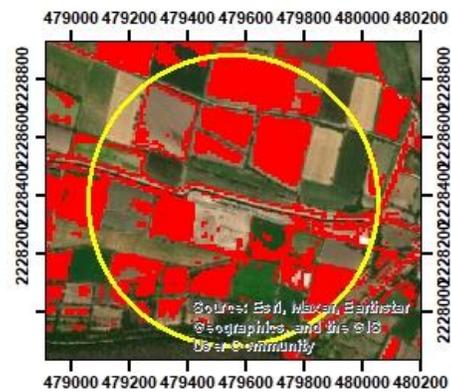
Las parcelas agrícolas que presentan una mayor afectación son las que se encuentran aledañas a la unidad de rebombeo, mismas que retuvieron el contaminante para evitar una mayor dispersión.

Los datos de SIAP en cuanto al volumen de producción (ha) registran una mayor pérdida de cultivos, por ejemplo, en 2020 para el frijol registran 3.1 ha con un valor de producción de \$1,670,612.27 y para 2021 registran 2.18 ha con un valor de producción de \$ 1,621,251.00 con una pérdida económica de \$ 49,361.27 del año 2020 al 2021. Estas pérdidas igual se ven reflejadas en otros cultivos como maíz de grano, chile verde, etc.

Las zonas restantes son producto de la dispersión del contaminante a través de las líneas de riego en las canaletas de las parcelas (Fig. 52).



Vegetación sana presente en el año 2019



Suelo sin cobertura o escasa vegetación en el año 2020

Mapa de diferencia por pérdida de vegetación del año 2019 al 2020 en la sección 1 del derrame de hidrocarburo en la comunidad de Juandhó, Hidalgo.

Simbología

- Unidad de bombeo
- Canal Requena
- Sección 1
- Área de cultivos perdidos

Sistema de coordenadas:

UTM zona 14N
Proyección:
Transversal de Mercator
Datum: WGS 1984
Unidades: Metros
Escala: 1:10.000

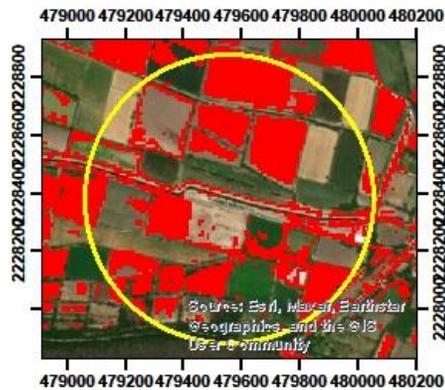
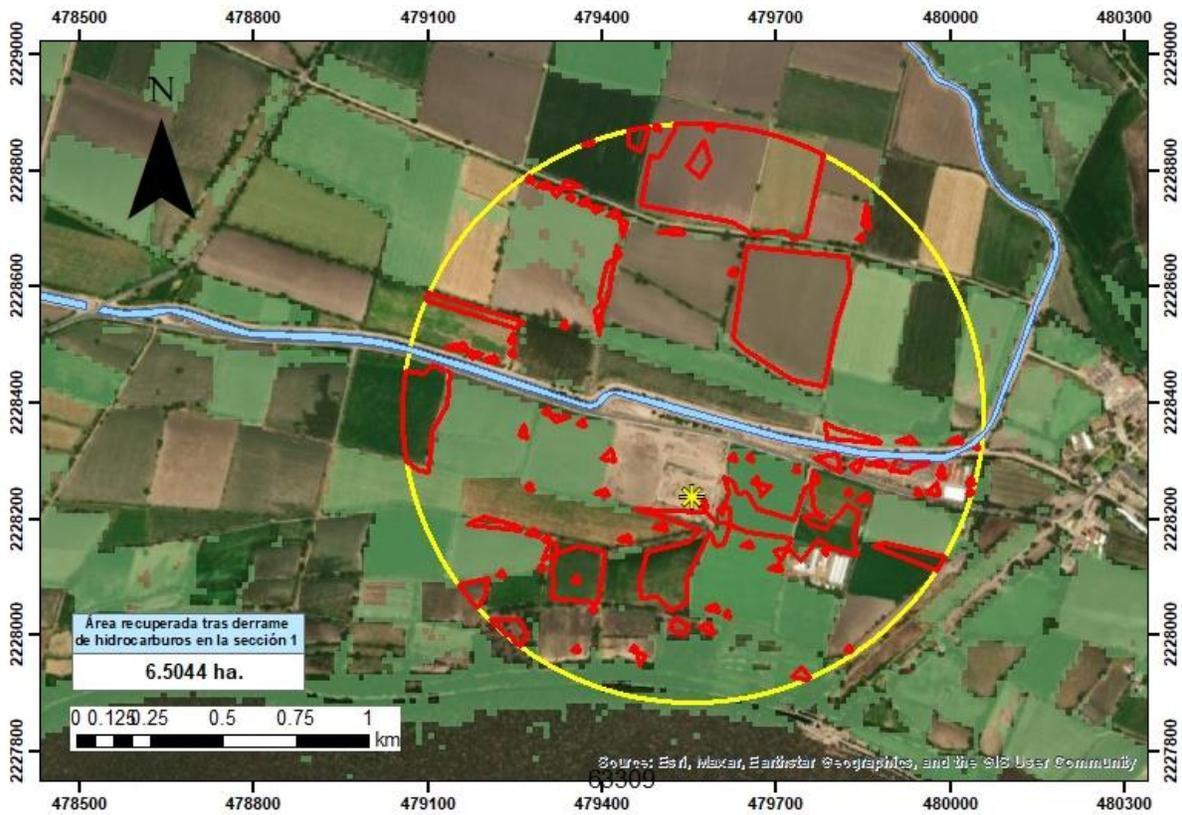
Figura 52. Mapa de diferencia de la pérdida de vegetación del año 2019 al 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2019 y 2020.

6.6.2. Mapa de recuperación año 2020 – 2021

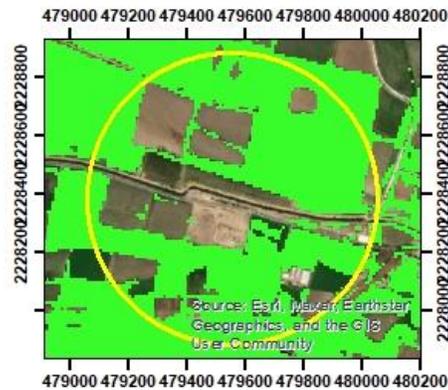
La comparativa se realiza entre la vegetación afectada del año 2020 y la vegetación sana del año 2021, donde hubo una recuperación de 6.5 ha en la sección 1 del estudio.

Las parcelas agrícolas que presentan una mayor recuperación se localizan en la zona norte de la sección, en la zona sur, las parcelas se recuperan por secciones, mas no en su totalidad.

Las parcelas aledañas a la unidad de rebombeo se encuentran en un proceso de recuperación, ubicándolas dentro de la cobertura vegetal en proceso de transformación para presentar una vegetación vigorosa (Fig. 53).



Suelo sin cobertura o escasa vegetación en el año 2020



Vegetación vigorosa en el año 2021

Mapa de diferencia por recuperación de cobertura vegetal del año 2020 al 2021 en la sección 1 del derrame de hidrocarburo en la comunidad de Juandhó, Hidalgo.

Simbología

- Unidad de rebombeo
- Canal Requena
- Área de cultivos recuperados
- Sección 1

Sistema de coordenadas:

UTM zona 14N
Proyección:
Transversal de Mercator
Datum: WGS 1984
Unidades: Metros
Escala: 1:10.000

Figura 53. Mapa de diferencia de la recuperación de vegetación del año 2019 al 2020. Elaboración propia Mejía-Díaz D. D. 2024. Modificado de la escena Copernicus, 2020 y 2021.

7. Conclusiones

El año con mayor índice de cambio de valores de reflectancia espectral en el NDVI fue en el 2020, lo que corrobora la presencia de hidrocarburo con respecto de la disminución del vigor de la cobertura vegetal.

De las tres secciones de estudio delimitadas, la SCC1 presentó los mayores cambios detectados en la cobertura agrícola en 2020, año en el que ocurrió el derrame, donde fue evidente la disminución de la cobertura vegetal saludable con respecto a los años previo y posterior al evento (2019 y 2021, respectivamente).

La recuperación parcial en las parcelas del área de estudio para el año 2021 indica una recuperación heterogénea del terreno agrícola.

La utilización de NDVI para la detección de la cobertura vegetal afectada por hidrocarburo resulta útil para el reconocimiento de áreas de afectación.

Resultado de los mapas de daños y pérdidas se observó una recuperación en el año inmediato posterior sin ninguna medida o tratamiento de remediación, lo que sugiere la resiliencia natural en suelos agrícolas de la zona.

El mapa de análisis de pérdida realizado permitió evidenciar un decremento en la superficie de suelos agrícolas que concuerdan con datos existentes publicados (SIAP).

La implementación de herramientas de sensoramiento remoto y aplicación de índices permiten establecer el grado de afectación resaltando la necesidad de programas de remediación ambiental que permitan la optimización de recursos y eficacia de las técnicas en áreas afectadas para mitigar los impactos a largo plazo.

8. Recomendaciones

Las recomendaciones para este tipo de estudios son:

Verificar el alcance y/o eficiencia de este tipo de investigación en superficies de mayor extensión, para corroborar la presencia de hidrocarburo con respecto a la fuente de origen.

Tener un registro de incidencias de derrames y magnitudes que permitan dar seguimiento al monitoreo para la elaboración de planes de reacción inmediata.

Realizar análisis fisicoquímicos de los cultivos agrícolas para corroborar la absorción de contaminantes residuales de hidrocarburos y su posible afectación a la salud.

Complementar con visitas y análisis de campo al momento inmediato al derrame como verificación de magnitud de las zonas de afectación.

9. Referencias

- Adamu, B., Tansey, K., & Bradshaw, M. J. (2013). Investigating vegetation spectral reflectance for detecting hydrocarbon pipeline leaks from multispectral data. *SPIE Proceedings*. <https://doi.org/10.1117/12.2028907>
- Adamu, B., Tansey, K., & Ogutu, B. (2016). An investigation into the factors influencing the detectability of oil spills using spectral indices in an oil-polluted environment. *International Journal of Remote Sensing*, 37(10), 2338-2357. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1176271>
- Adamu, B., Tansey, K., & Ogutu, B. (2018). Remote sensing for detection and monitoring of vegetation affected by oil spills. *International Journal of Remote Sensing*, 39(11), 3628-3645. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1448483>
- Adams. H., R., Zavala-Cruz, J., & Morales-García, F. A. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. II: afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia*, 33(7) 483-489. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700005#:~:text=Los%20hidrocarburos%20del%20petr%C3%B3leo%20pueden,cambios%20en%20pH%20y%20salinidad.
- Alonso, C., Moreno, V., & Rodríguez, E. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. *Teledetección: Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección.*, 429-432.
- Alonso, D. (2023). *Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel*. MappingGIS. <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>
- Arellano, P., Tansey, K., Balzter, H., & Boyd, D. S. (2015). Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environmental Pollution*, 205, 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.05.041>

Arias, H. A., Zamora, R. G., & Bolaños, C. V. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes aster, RapidEye, spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. Atmospheric correction methodology for aster, RapidEye, spot 2 and Landsat 8 images with ENVI FLAASH module software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53). <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>

Axessnet. (2023). Las imágenes satelitales y sus aplicaciones en la vida cotidiana. Axessnet.

<https://axessnet.com/las-imagenes-satelitales-y-sus-aplicaciones-en-la-vida-cotidiana/>

Cabrera, E., Vargas Galvis, D. M., Galindo, G., García Dávila, M. C., & Ordóñez, M. F. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia Nivel subnacional - Escala gruesa y fina.*

Carta topográfica F14C89b. (2017). INEGI. <https://www.inegi.org.mx>

CartoCrítica. (2023). *Ductos, ¿Por dónde circulan los hidrocarburos en México?*

<https://cartocritica.org.mx/2017/ductos/>

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial.* 2ª edición. Publicaciones RIALP, Madrid, España.

CONABIO. (2017). *Regiones terrestres prioritarias de México.*

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_054.pdf

CONAGUA. (2020a). ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO AJACUBA (1311), ESTADO DE HIDALGO. En CONAGUA.

https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1311.pdf

CONAGUA. (2020b). ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL (1310), ESTADO DE HIDALGO. En CONAGUA.

https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1310.pdf

COPERNICUS. (2019). *COPERNICUS.*

S2A_MSIL2A_20191014T170251_N0213_R069_T14QMH_20191014T210736.

<https://browser.dataspace.copernicus.eu>

COPERNICUS. (2020). *COPERNICUS.*

S2A_MSIL2A_20201008T170211_N0214_R069_T14QMH_20201008T212350.

<https://browser.dataspace.copernicus.eu>

COPERNICUS. (2021). *COPERNICUS.*

S2B_MSIL2A_20211008T170119_N0301_R069_T14QMH_20211008T213625.

<https://browser.dataspace.copernicus.eu>

Diario Oficial de la Federación. (2023, 5 mayo). *Ley de Aguas Nacionales (LAN)*. Cámara de Diputados.

<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>

Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2009, 29 octubre). *NORMA Oficial Mexicana NOM-117-SEMARNAT-2006*. Diario Oficial de la Federación.

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5116294&fecha=29/10/2009#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2013, 10 septiembre). *NORMA Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012*. Diario Oficial de la Federación.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2022, 11 marzo). *NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021*. Diario Oficial de la Federación.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2024). *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (LGEEPA)*. En *Cámara de Diputados*.

<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

Díaz-Vega, M. E. A., Santos-Tress, D. C., & Zamora-Castro, S. A. (2023). Características de un suelo contaminado por hidrocarburos y su posible uso como estabilizador de suelo. *Ingeniería*, 23(3).
<https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/290/252>

European Space Agency. (s. f.). *Missions - Sentinel*. Sentinel Online.
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>

European Space Agency. (2015). *Sentinel-2 User Handbook*.
https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook

Flores-Puente, M. A., Torras-Ortiz, S., & Téllez-Gutiérrez, R. (2004). Medidas de mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre. En *Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT)*.
<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt257.pdf>

Gobierno Municipal Tetepango, Hgo. (2016). *Plan Municipal de Desarrollo 2016-2020*.
<http://tetepango.hidalgo.gob.mx/layouts/plan%20municipal%20de%20desarrollo.pdf>

Gonzaga-Aguilar, C. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ*, 5(1), 30-41.

Hernández, P., J., & Montaner, F., D. (s. f.). Patrones de Respuesta Espectral. En *Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje*. Lab. Geomática y Ecología del Paisaje (GEP) – Facultad de Ciencias Forestales Universidad de Chile.
<http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hern%C3%A1ndez%20&%20Montaner%202009%20SAF.pdf>

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2020). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research/Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

INEGI. (1992). Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo. En *INEGI*.
https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220945/702825220945_2.pdf

INEGI. (2000). Síntesis de Información geográfica del estado de San Luis Potosí. En *INEGI*.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224240/702825224240_11.pdf

INEGI. (2001). *Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales*. <https://inegi.org.mx>

INEGI. (2007). *Conjunto Nacional de Información Edafológica. Serie II*.

INEGI. (2009). *Uso del suelo y vegetación*. CONABIO. <https://conabio.gob.mx>

INIFAP & CONABIO. (2008). *Edafología*. CONABIO. <https://conabio.gob.mx>

Instituto Geográfico Nacional. (s. f.). *Plan Nacional de Teledetección*. <https://pnt.ign.es/programa-copernicus>

INTAGRI. (2017). Diagnóstico Visual de Deficiencias Nutrimientales. *Serie Nutrición Vegetal, 97*.

Jaramillo, L., & Antunes, A. F. B. (2018). Detección de cambios en la cobertura vegetal mediante interpretación de imágenes Landsat por redes neuronales artificiales (RNA). Caso de estudio: Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista de Teledetección, 51*, (33). <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8995>

La Silla Rota. (2020, 6 septiembre). Cultivos del Mezquital, regados con veneno negro de Pemex. La Silla Rota. <https://lasillarota.com/hidalgo/reportajes/2020/9/6/cultivos-del-mezquital-regados-con-veneno-negro-de-pemex-245497.html>

Labrador-García, M., Évora-Brondo, J. A., & Arbelo-Pérez, M. (2012). *Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.

Latorre-Conde, L. V. (2015). *Identificación de área quemada por derrame de crudo en un sector del municipio de Arauquita - oleoducto caño Limón-Coveñas, por medio de imágenes de satélite, para determinar la afectación de las coberturas presentes en el año 1997* [Trabajo de grado, Universidad del

Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/d7431b9b-a811-4f32-af3a-cfc876be20f9/content>

López-López, D. M., & Torres-Gómez, A. C. (s. f.). *Análisis de datos tipo raster* [Conjunto de datos].

Mejía, V. R., Orellana, D., & Cabrera-Barona, P. (2021). Cambio de uso de suelo en la Amazonía norte del Ecuador: un análisis a través de imágenes satelitales nocturnas VIIRS e imágenes LANDSAT. *Revista Universidad Verdad/Universidad Verdad/Universidad-verdad*, 78, 10-29.

<https://doi.org/10.33324/uv.v1i1.355>

Montoya, J. R. (2020, 18 agosto). Contamina derrame de Pemex tierras de cultivo en Hidalgo. *La Jornada*.

<https://www.jornada.com.mx/2020/08/18/estados/026n1est>

Navarro, M. C. D., García-Haro, F. J., & Piqueras, J. A. (1996). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 8.

http://telenet.fu1.cie.uva.es/promotores/revista/revista_08/AET8_4.pdf

NDVI, The Foundation for Remote Sensing Phenology | U.S. Geological Survey. (2018, 29 noviembre).

<https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/ndvi-foundation-remote-sensing-phenology>

Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.

Olvera-Reyes, N. U., & Hernández-Mendoza, C. E. (2016). Análisis Multitemporal de sitios potencialmente contaminados con hidrocarburos mediante imágenes Landsat. *Tlamati Sabiduría*, 7, 82-88.

<http://tlamati.uagro.mx/>

Ormeño-Villajos, S. (2006). *Teledetección Fundamental* (3ª Edición). Universidad Politécnica de Madrid.

Pérez-González, M., & Rodríguez, P. (2013, 15 marzo). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. Recuperado 23 de agosto de 2022, de

https://www.researchgate.net/publication/236179288_Aplicaciones_de_la_teledeteccion_en_degradacion_de_suelos

Pérez-Gutiérrez, C., & Muñoz-Nieto, A. L. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. 2ª edición. Universidad de Salamanca. Salamanca, España

Perfil de suelo. (s. f.). <http://institucional.us.es/suelos/index.php/p/vp>

Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, M. R. (2012). *Edafología. Uso y protección de suelos* (3ª ed.). Mundi Prensas. Barcelona, España.

Reséndez-Hernández, L. R. (2008). *Análisis hiperspectral de suelos contaminados por hidrocarburos y pesticidas* [Tesis de maestría]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Rosales-Malpartida, J. Y., & Apaza-Mamani, H. A. (2022). Análisis de imágenes satelitales Landsat 8 por componentes principales y MNF para la detección de zonas del derrame de petróleo Repsol en la Costa Peruana. *TecnoHumanismo*, Vol. 2(2).

Ruiz-Verdú, A. (2007). Aplicaciones de la Teledetección en Ingeniería Ambiental. En *Escuela de Organización Industrial (EOI)*.

Sánchez, A. L. (2020, 2 septiembre). Derrame petrolero golpea la producción agrícola de Hidalgo. *El Sol de Hidalgo*. <https://www.elsoldehidalgo.com.mx/mexico/sociedad/derrame-petrolero-golpea-la-produccion-agricola-de-hidalgo-contaminacion-cultivos-pemex-afectaciones-productores-cosechas-5703428.html>

Secretaría de Energía. (2015). *¿Qué son los hidrocarburos?* Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener/articulos/que-son-los-hidrocarburos#:~:text=Los%20Hidrocarburos%20son%20un%20grupo,todos%20los%20dem%C3%A1s%20compuestos%20org%C3%A1nicos>.

SEMARNAT. (s. f.). *Suelos*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf

Somvanshi, S., & Kumari, M. (2020). Comparative analysis of different vegetation indices with respect to atmospheric particulate pollution using sentinel data. *Applied Computing and Geosciences*, 7, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100032>

Zamora, A., Ramos, J., & Arias, M. (2012). Efecto de la contaminación por hidrocarburos sobre algunas propiedades químicas y microbiológicas de un suelo de sabana. *Bioagro*, 24(1), 5-12. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612012000100002&lng=es&tlng=es.

10. Anexos

Anexo 1. Evidencia fotográfica del derrame y sus afectaciones en parcelas agrícolas y el canal de aguas negras Requena.



Figura 54. Terreno de cultivo inundado con combustóleo en el poblado de Juandhó, municipio de Tetepango, Hidalgo, tras una fuga ocurrida durante trabajos de mantenimiento en un centro de bombeo de Petróleos Mexicanos. Fotografía de Juan Ricardo Montoya, 2020.



Figura 55. Combustóleo acumulado en una parcela aledaña a la unidad de rebombero tras el derrame de hidrocarburo en la comunidad de Juandhó, Tetepango. Fotografía de Ian Lima, 2020.



Figura 56. Químico se vertido en un ramal del Canal Alto Requena de aguas negras que pasa por el lugar por lo que los residuos petroleros fueron conducidos a tierras de cultivo de riego. Fotografía del periódico La Jornada, 2020.



Figura 57. Combustóleo acumulado presente en el canal de aguas negras Alto Requena durante labores de limpieza en la comunidad de Juandhó, Tetepango, Hgo. Fotografía de Francisco Villeda, 2020.



Figura 58. Alrededor de 150 km de canales de riego se vieron afectados. Fotografía de Productores del Valle del Mezquital, 2020.



Figura 59. Combustóleo presente en cultivos agrícolas. Fotografía de Productores del Valle del Mezquital, 2020.

Anexo 2. Estadísticas de producción agrícola del municipio de Tetepango en el año 2018, 2019, 2020 y 2021.

Tabla 19. Estadísticas de producción de la hectáreas sembradas, cosechadas y siniestradas del municipio de Tetepango en los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Obtenido de SIAP (2018, 2019, 2020, 2021).

Nombre del cultivo agrícola	Sembrada (ha.)				Cosechada (ha.)				Siniestrada (ha.)			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
Avena forrajera en verde	69	65	63.00	30	69	65	63	30	0	0	0	0
Cebada forrajera en verde	23	21	0.00	0.00	23	21	0.00	0.00	0	0	-	-
Coliflor (O/I)	21	10	8.64	7	21	10	8.64	7	0	0	0	0
Nabo forrajera	10	5	0.00	0.00	10	5	0.00	0.00	0	0	-	-
Trigo grano	6	4	5.00	4.5	6	4	5	4.5	0	0	0	0
Avena forrajera en verde	27	20	10.00	12	27	20	10	12	0	0	0	0
Calabacita	4	7	6.50	6	4	7	6.5	6	0	0	0	0
Cebada forrajera en verde	25	20.5	0.00	0.00	25	20.5	0.00	0.00	0	0	-	-
Chile verde	13.00	7.83	7.50	7.00	13.00	7.83	7.50	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Col (repollo)	20	21	0.00	0.00	20	21	0.00	0.00	0	0	-	-
Coliflor (P/V)	26	19	18.00	17.5	26	19	18	17.5	0	0	0	0
Frijol (P/V)	133	123	114.00	107.85	133	123	114	107.85	0	0	0	0
Maíz grano	432	408.67	405.00	401	432	408.67	405	401	0	0	0	0
Nabo forrajero	12.3	8	0.00	0.00	12.3	8	0.00	0.00	0	0	-	-
Tomate verde	5	6.17	6.00	5.5	5	6.17	6	5.5	0	0	0	0
Cebada forrajera en verde	10	4	0.00	0.00	10	4	0.00	0.00	0	0	-	-
Frijol	9	9	8.50	6.5	9	2	8.5	6.5	0	7	0	0
Maíz grano	6	6.5	6.00	5	6	1.5	4	5	0	5	2	0
Alfalfa verde	550	580	560.00	555	550	580	560	555	0	0	0	0

Tabla 20. Estadísticas de producción en valor de producción del municipio de Tetepango en los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Obtenido de SIAP (2018, 2019, 2020, 2021).

Nombre del cultivo agrícola	Volumen de producción (toneladas)			
	2018	2019	2020	2021
Avena forrajera en verde	2849.7	2730	2677.5	1260
Cebada forrajera en verde	976.4	900.9	0.00	0.00
Coliflor	506.1	255	221.18	177.8
Nabo forrajero	113.5	62.5	0.00	0.00
Trigo grano	24.6	18	27.5	22.5
Avena forrajera en verde	1188	885.2	435	516
Calabacita	75.36	99.53	78	70.8
Cebada forrajera en verde	1050	867.97	0.00	0.00
Chile verde	149.50	90.83	87.75	81.55
Col (repollo)	472	512.4	0.00	0.00
Coliflor	728	523.45	486	490
Frijol	206.45	204.6	183.02	170.96
Maíz grano	5400	4904.04	4900.5	4892.2
Nabo forrajero	147.6	97.2	0.00	0.00
Tomate verde	55	63.43	63	56.65
Cebada forrajera en verde	160	66	0.00	0.00
Frijol	3.53	0.71	3.01	2.18
Maíz grano	4.2	1.6	2.84	3.6
Alfalfa verde	58850	59276	57680	56610

Tabla 21. Estadísticas de producción en valor de producción del municipio de Tetepango en los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Obtenido de SIAP (2018, 2019, 2020, 2021).

Nombre del cultivo agrícola	Valor producción			
	2018	2019	2020	2021
Avena forrajera en verde	\$ 461,508.92	\$ 440,922.30	\$ 429,819.08	\$ 207,900.00
Cebada forrajera en verde	\$ 147,494.98	\$ 139,279.14	-	-
Coliflor (O/I)	\$ 1,746,045.00	\$ 892,500.00	\$ 782,977.20	\$ 631,190.00
Nabo forrajero	\$ 125,610.45	\$ 64,900.00	-	-
Trigo grano	\$ 103,320.00	\$ 73,800.00	\$ 96,250.00	\$ 74,250.00
Avena forrajera en verde	\$ 159,144.48	\$ 123,573.92	\$ 63,101.10	\$ 82,560.00
Calabacita	\$ 274,760.30	\$ 354,565.67	\$ 298,350.00	\$ 254,880.00
Cebada forrajera en verde	\$ 156,744.00	\$ 129,961.15	-	-
Chile verde	\$ 1202404.58	\$ 723290.19	\$ 674024.42	\$ 640167.50
Col (repollo)	\$ 1,052,536.40	\$ 1,107,936.90	-	-
Coliflor	\$ 1,782,799.20	\$ 1,238,446.06	\$ 1,305,148.14	\$ 1,862,000.00
Frijol	\$ 1,320,381.83	\$ 1,777,526.30	\$ 1,670,612.27	\$ 1,621,251.00
Maíz grano	\$ 20,510,982.00	\$ 20,070,813.55	\$ 21,120,566.94	\$ 21,501,219.00
Nabo forrajero	\$ 135,425.95	\$ 89,996.51	-	-
Tomate verde	\$ 221,163.25	\$ 251,369.28	\$ 260,099.91	\$ 237,930.00
Cebada forrajera en verde	\$ 17,920.00	\$ 7,920.00	-	-
Frijol	\$ 33,375.00	\$ 6,603.50	\$ 28,028.00	\$ 20,095.90
Maíz grano	\$ 12,600.00	\$ 6,400.00	\$ 12,212.00	\$ 15,660.00
Alfalfa verde	\$ 18,286,460.50	\$ 18,559,908.36	\$ 17,996,160.00	\$ 17,803,845.00

Anexo 3. Selección de la cubierta vegetal por valores de reflectancia espectral con base en la tabla de valores de NDVI de Mejía et. Al 2021.

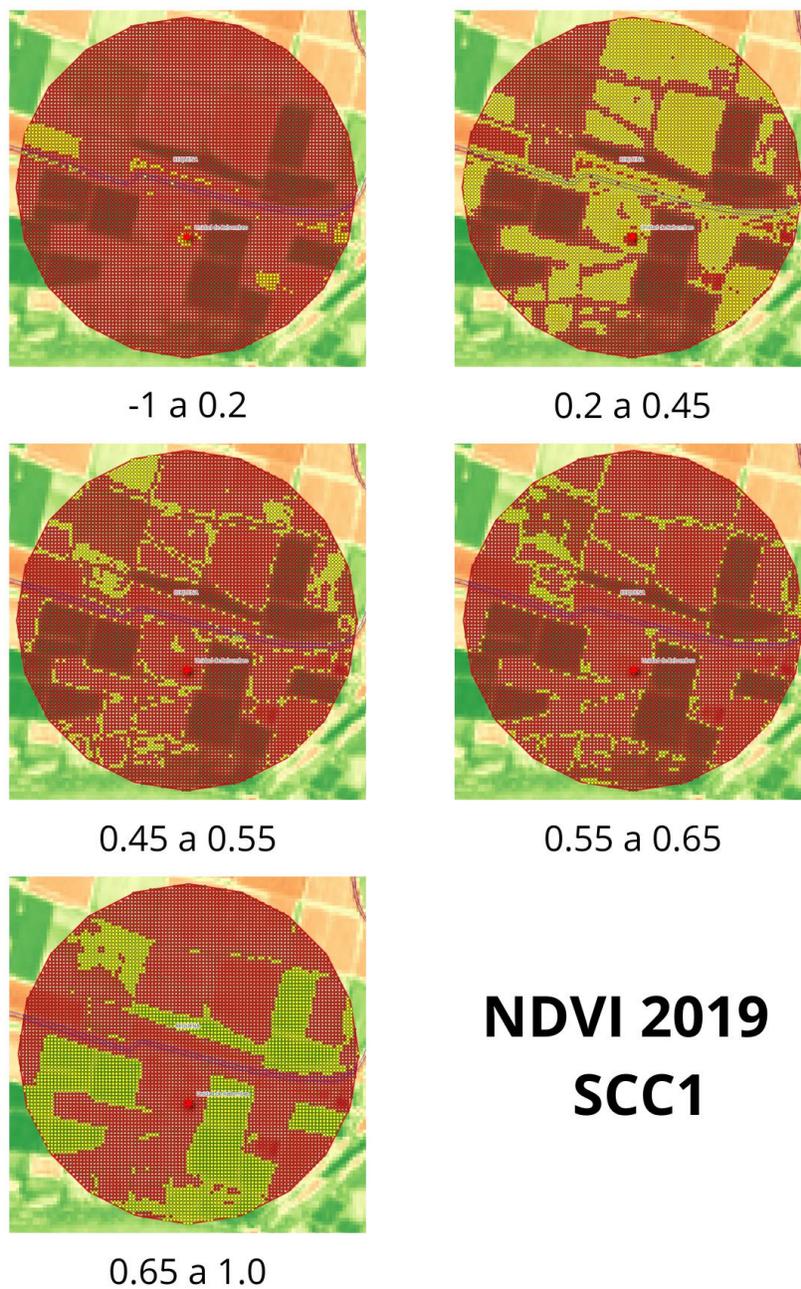
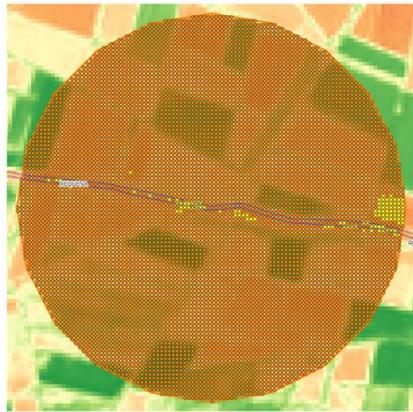
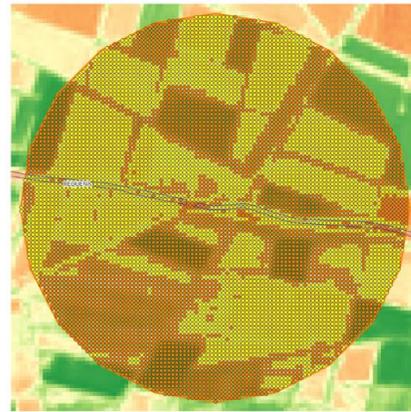


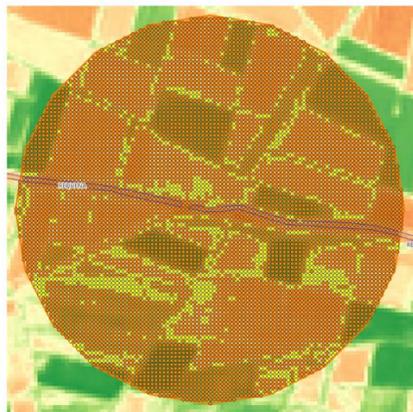
Figura 60. Valores espectrales del NDVI de año 2019, sección 1.



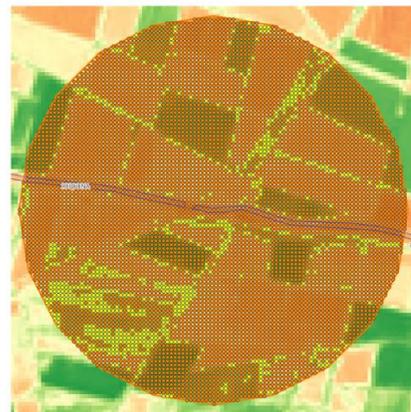
-1 a 0.2



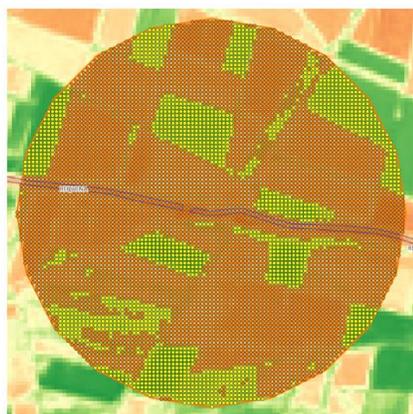
0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



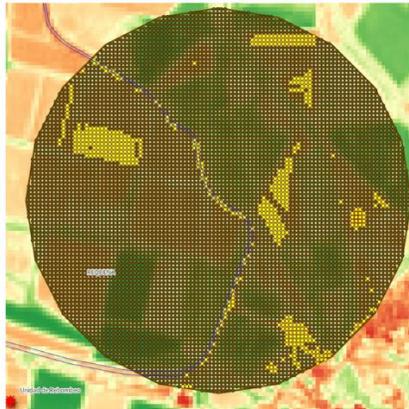
0.55 a 0.65



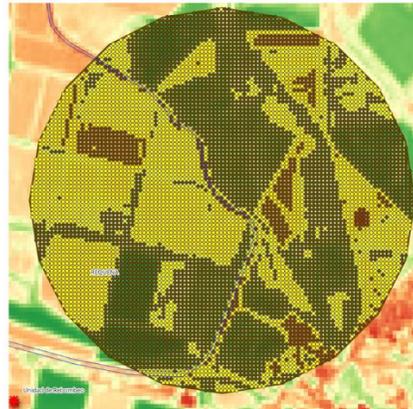
0.65 a 1.0

NDVI 2019 SCC2

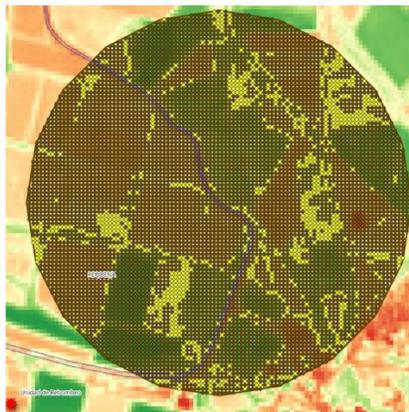
Figura 61. Valores espectrales del NDVI de año 2019, sección 2.



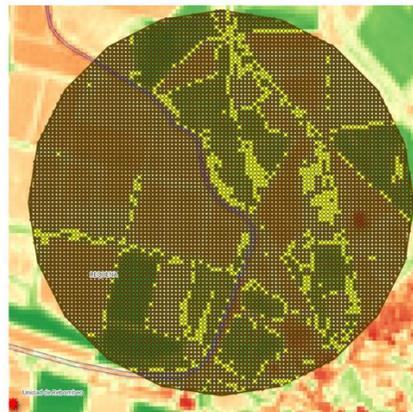
-1 a 0.2



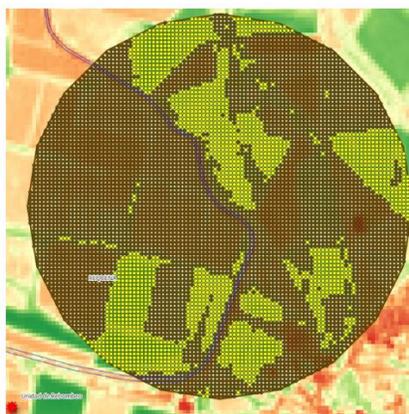
0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



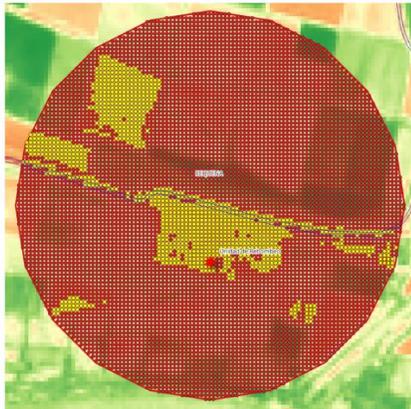
0.55 a 0.65



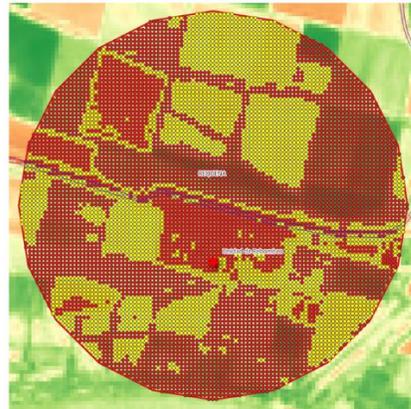
0.65 a 1.0

NDVI 2019 SCC3

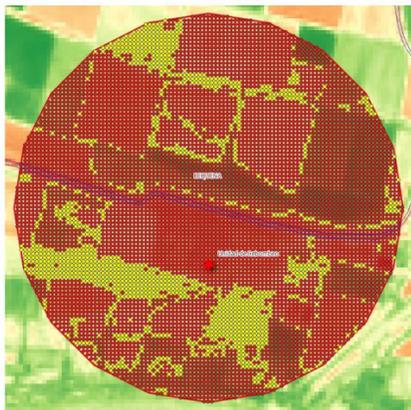
Figura 62. Valores espectrales del NDVI de año 2019, sección 3.



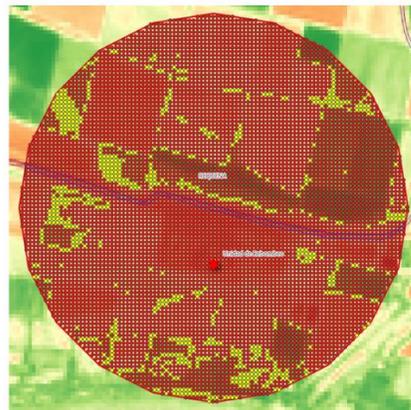
-1 a 0.2



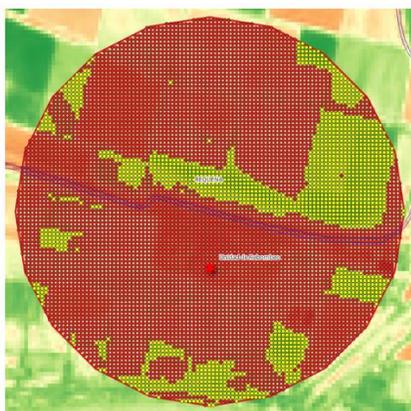
0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



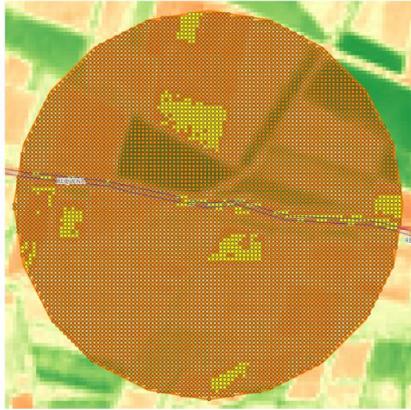
0.55 a 0.65



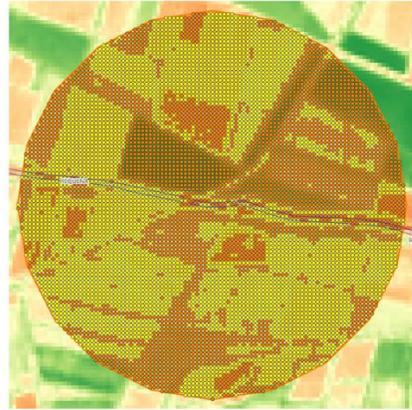
0.65 a 1.0

NDVI 2020 SCC1

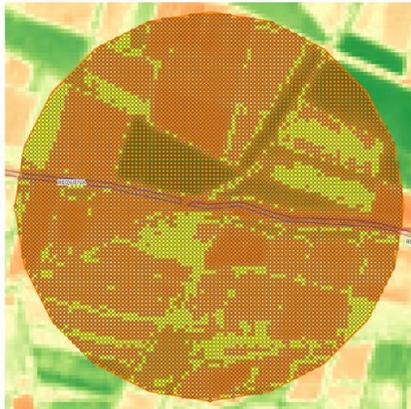
Figura 63. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 1.



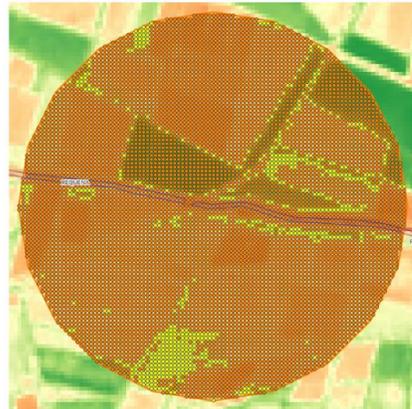
-1 a 0.2



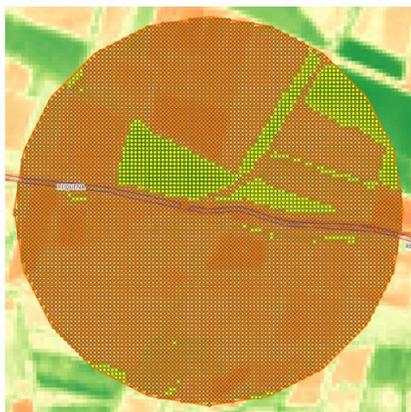
0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



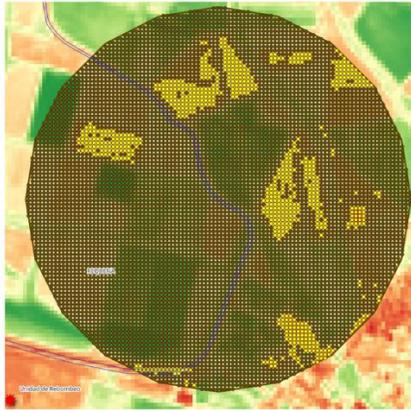
0.55 a 0.65



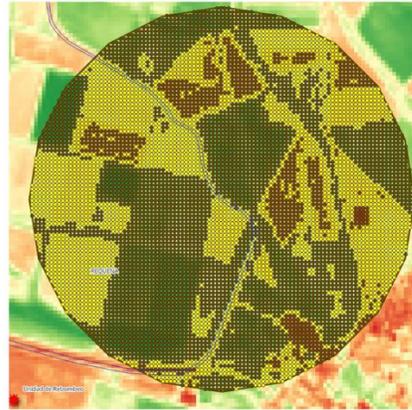
0.65 a 1.0

NDVI 2020 SCC2

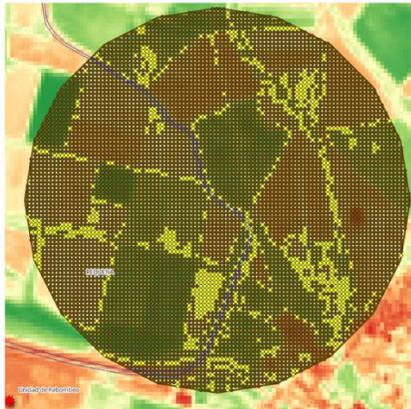
Figura 64. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 2.



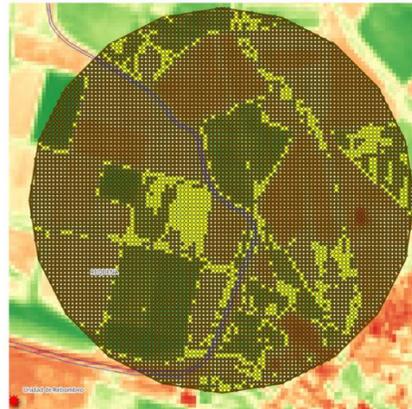
-1 a 0.2



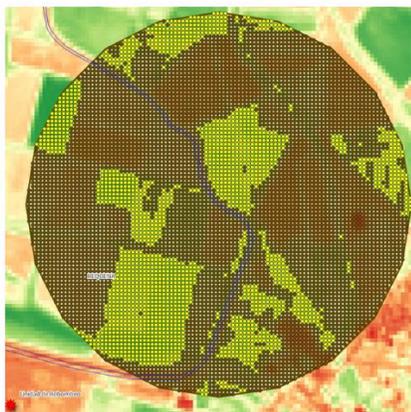
0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



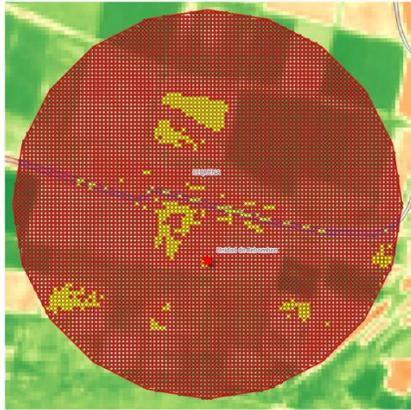
0.55 a 0.65



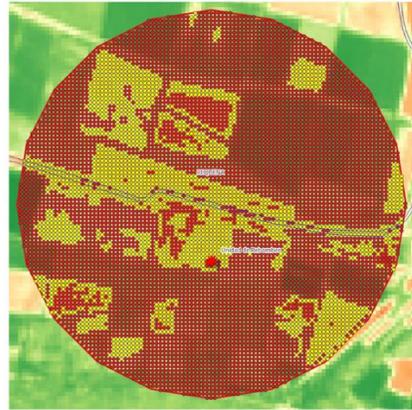
0.65 a 1.0

NDVI 2020 SCC3

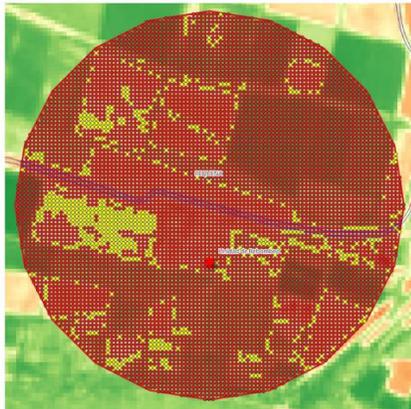
Figura 65. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 3.



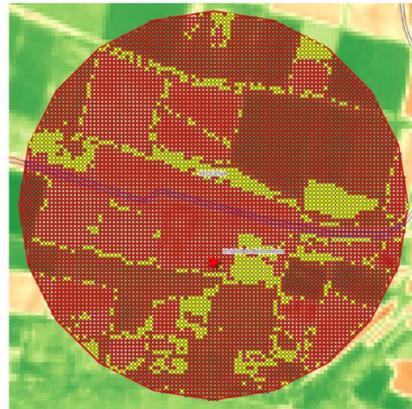
-1 a 0.2



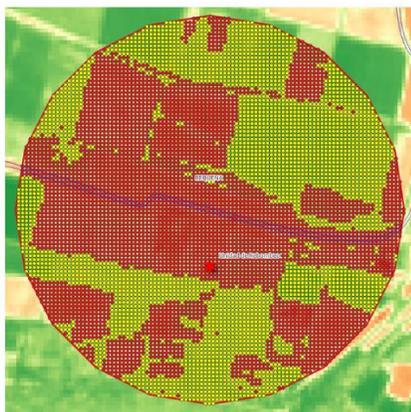
0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



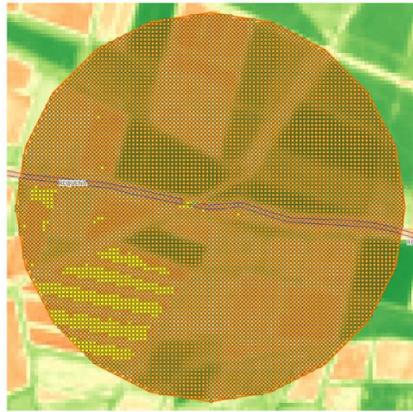
0.55 a 0.65



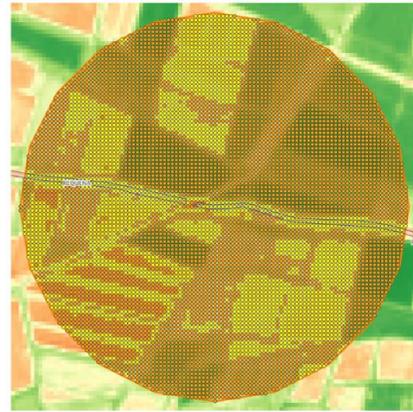
0.65 a 1.0

NDVI 2021 SCC1

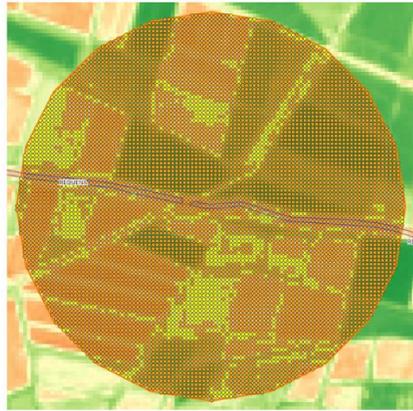
Figura 66. Valores espectrales del NDVI de año 2020, sección 1.



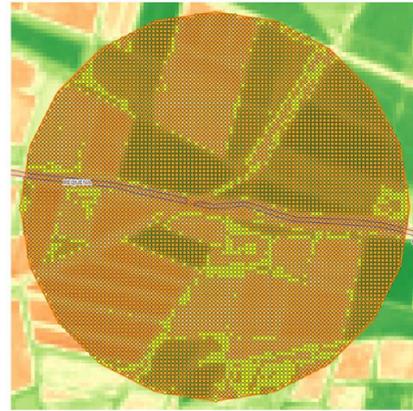
-1 a 0.2



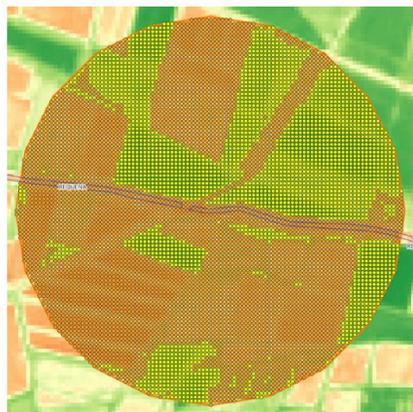
0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



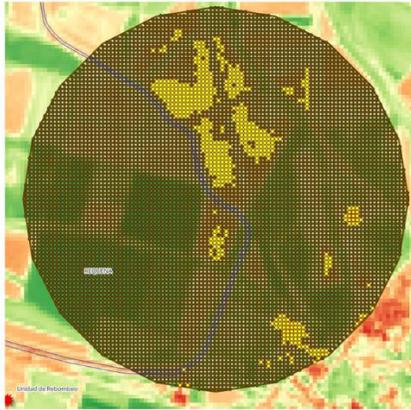
0.55 a 0.65



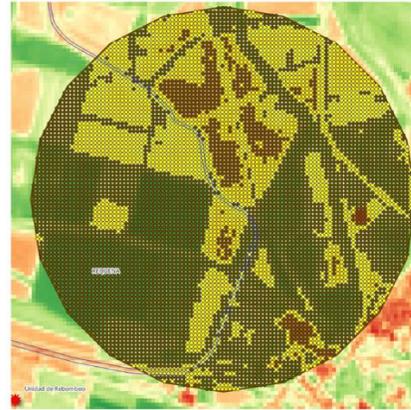
0.65 a 1.0

NDVI 2021 SCC2

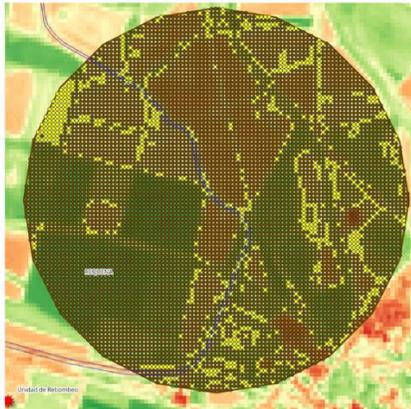
Figura 67. Valores espectrales del NDVI de año 2021, sección 2.



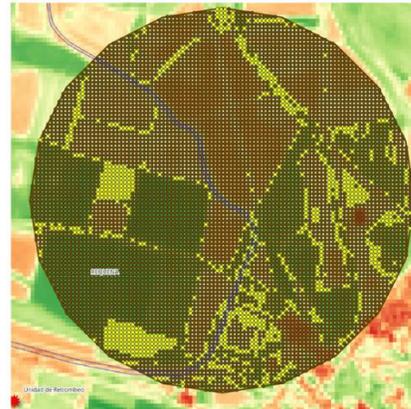
-1 a 0.2



0.2 a 0.45



0.45 a 0.55



0.55 a 0.65



0.65 a 1.0

NDVI 2021 SCC3

Figura 68. Valores espectrales del NDVI de año 2021, sección 3.