



**Trabajo Final Integrador de la Especialización en  
Geociencias de Exploración y Desarrollo de  
Hidrocarburos de la Facultad de Ciencias Naturales y  
Museo de la Universidad Nacional de La Plata,  
Argentina**

---

**APORTE METODOLÓGICO A LA  
EVALUACIÓN DE LA POTENCIAL  
AFECTACIÓN AMBIENTAL  
RELACIONADA A LA ACTIVIDAD  
HIDROCARBURÍFERA DEL ÁREA  
CENTRAL DE LA CUENCA DEL  
GOLFO DE SAN JORGE,  
PROVINCIA DE SANTA CRUZ,  
ARGENTINA**

**JULIO 2024**

**Autor: Lic. Nicolás A. Guardo**  
**Directores: Lic. Juan Manuel Reynaldi – Lic. Jorge Luis Fasano**



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
<b>2.1.</b>	<b>Marco legal.....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA .....</b>	<b>4</b>
<b>4.1.</b>	<b>Formación Río Chico (Paleoceno superior).....</b>	<b>4</b>
<b>4.2.</b>	<b>Basalto Cerro del Doce (Eoceno inferior) .....</b>	<b>4</b>
<b>4.3.</b>	<b>Formación Sarmiento (Eoceno superior).....</b>	<b>5</b>
<b>4.4.</b>	<b>Formación Monte León (Oligoceno superior – Mioceno inferior).....</b>	<b>5</b>
<b>4.5.</b>	<b>Formación Santa Cruz (Mioceno inferior – medio).....</b>	<b>6</b>
<b>4.6.</b>	<b>Gravas aluviales antiguas del río Chico – Nivel I (Mioceno medio).....</b>	<b>6</b>
<b>4.7.</b>	<b>Depósitos aluviales sobre pedimentos de flanco – Nivel I (Mioceno superior).....</b>	<b>6</b>
<b>4.8.</b>	<b>Gravas aluviales del paleocauce Lago Buenos Aires – Meseta Espinosa (Plioceno inferior).....</b>	<b>7</b>
<b>4.9.</b>	<b>Depósitos fluviales antiguos del cañadón Salado (Plioceno inferior).....</b>	<b>7</b>
<b>4.10.</b>	<b>Depósitos fluviales antiguos del río Deseado – Nivel I (Plioceno superior)</b>	<b>7</b>
<b>4.11.</b>	<b>Depósitos fluviales antiguos del río Deseado – Nivel II (Plioceno superior)</b>	<b>8</b>
<b>4.12.</b>	<b>Depósitos fluviales antiguos del río Deseado – Nivel III (Pleistoceno inferior –medio) .....</b>	<b>8</b>
<b>4.13.</b>	<b>Depósitos aluviales sobre pedimentos de flanco – Nivel II (Pleistoceno)..</b>	<b>8</b>
<b>4.14.</b>	<b>Depósitos aluviales sobre pedimentos de flanco – Nivel III (Holoceno) ....</b>	<b>8</b>



4.15.	Depósitos coluviales y aluviales (Holoceno) .....	9
4.16.	Depósitos de bajos y laguna (Holoceno) .....	9
5.	<b>CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA .....</b>	<b>11</b>
5.1.	Planicies de gravas aterrazadas .....	11
5.2.	Pedimentos de flanco .....	12
5.3.	Geoformas volcánicas, lávicas o intrusivas .....	13
5.4.	Bajos sin salida – Gran Bajo Oriental.....	13
6.	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
6.1.	Concepto de teledetección.....	14
6.2.	Búsqueda de información antecedente.....	15
6.3.	Descarga de imágenes satelitales .....	16
6.4.	Procesamiento y análisis.....	17
6.5.	Presentación de los resultados .....	21
7.	<b>DISCUSIONES Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>31</b>
8.	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>35</b>



## RESUMEN

El informe constituye el Trabajo Final Integrador de la carrera de posgrado Especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata. En el mismo se busca presentar un aporte metodológico que permita evaluar la correlación entre la variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) entre los años 1986 y 2022 y la posible afectación ambiental vinculada a la actividad petrolera llevada adelante en un sector de aproximadamente 110000 ha de superficie ubicado en la zona central de la Cuenca del Golfo de San Jorge, en el extremo nororiental de la provincia de Santa Cruz de la República Argentina, dentro de los límites de la Hoja Geológica 4769-II Colonia Las Heras.

Para llevar adelante dicho análisis, se emplearon imágenes satelitales de las misiones *Landsat* (5 y 9) y herramientas y/o técnicas provenientes del campo de la programación (lenguaje *Python*) en conjunto con Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information System – GIS*).

Si bien los resultados para la zona elegida no fueron los esperados en un principio, es decir, no existen diferencias significativas, para la escala de trabajo y la resolución empleada, entre las zonas antrópicas y las zonas naturales tomadas como blanco (la variación del índice no se vincula directamente con la actividad petrolera sino con cuestiones de variabilidad climática), se observa que la metodología presentada resulta sensible a cambios en cuanto a la densidad y salud de la vegetación.

Emplear imágenes de mejor resolución espacial, aumentar la temporalidad entre las imágenes y aplicar la técnica a zonas con características climáticas diferentes a las del área de estudio, permitiría realizar o tener una mejor cuantificación de las variaciones del índice y establecer una relación más ajustada con las actividades antrópicas desarrolladas, entre ellas, la hidrocarburífera.



## 1. INTRODUCCIÓN

El informe constituye el Trabajo Final Integrador (TFI) de la carrera de posgrado Especialización en Geociencias de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

El objetivo del mismo consiste en realizar y presentar un aporte metodológico de análisis a partir de la aplicación de técnicas novedosas provenientes del campo de la programación en conjunto con Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information System* – GIS) y empleando imágenes satelitales, con el fin de evaluar la correlación entre la variación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) y la posible afectación ambiental producto de la actividad hidrocarburífera desarrollada a lo largo de los años, en un sector de la Cuenca del Golfo de San Jorge.

La intención de este trabajo es emplear herramientas novedosas que comienzan a tener mayor relevancia dentro del campo de las geociencias, como resultan ser los Sistemas de Información Geográfica y la programación informática, dentro de la cual el lenguaje *Python* resulta ser el más popular y utilizado a la fecha. En tal sentido, el empleo de la programación informática permite al usuario desarrollar sus propias herramientas de manera personalizada, adecuándolas a las necesidades u objetivos, y así tener mayor control sobre las mismas y los datos que forman parte del procedimiento. A su vez, permite la automatización de tareas que pueden resultar repetitivas.

## 2. ANTECEDENTES

El empleo de índices espectrales, y en particular del NDVI, ha sido una estrategia ampliamente utilizada para evaluar los efectos ambientales derivados de la actividad hidrocarburífera. Ahmad et al. (2017) aplicaron NDVI a imágenes de la misión Landsat para identificar filtraciones de hidrocarburos en el campo de Kifl (Iraq), logrando diferenciar áreas con distinta densidad de vegetación asociada a la presencia de filtraciones o fugas (*seepages*). De manera complementaria, Hassan & Al-Shamma



(2019) utilizaron técnicas de teledetección y SIG en el área del yacimiento Al-Ahdeb, también en Iraq, y demostraron cambios significativos en la cobertura vegetal al comparar imágenes previas y posteriores al inicio de la explotación petrolera. En un contexto diferente, Egobueze et al. (2022) analizaron imágenes multiespectrales en el Delta del Níger (Nigeria), con el fin de detectar y monitorear vegetación afectada por derrames y procesos migratorios de petróleo, encontrando una degradación evidente en sectores con mayor intensidad de actividad. Estos antecedentes confirman la relevancia del uso de NDVI y técnicas satelitales para el estudio de impactos ambientales asociados a la industria hidrocarburífera y evidencian la necesidad de considerar la resolución espacial y temporal de las imágenes al interpretar los resultados.

## **2.1. Marco legal**

Las consideraciones ambientales en la industria petrolera tuvieron un fuerte impulso a partir del año 1992, con la sanción de la Resolución 105 de la Secretaría de Energía, en la que se establecían normas y procedimientos para la protección del medio ambiente durante las etapas de exploración y explotación. Con posterioridad a esta Resolución, la Secretaría de Energía de la Nación sancionó una serie de resoluciones que abordaban distintas temáticas, entre ellas la Resolución 341/93 referida a cronogramas y normas para el reacondicionamiento de piletas y restauración del suelo; la Resolución 5/96 normas y procedimientos para el abandono de pozos de hidrocarburos y la Resolución 236/93 y su modificatoria 143/98 sobre aventamientos de gas. Adicionalmente, se dictaron una serie de normas orientadas a la integridad, gestión y monitoreo de ductos, tanques aéreos y subterráneos.

Aplican también, como leyes de fondo y por su relevancia, la ley de Residuos Peligrosos 24051 y su Decreto Reglamentario 831/93 y Ley General del Ambiente 25675.

En la Provincia de Santa Cruz, los trabajos ambientales relacionados con esta industria comenzaron a tener mayor relevancia desde el año 2004, a partir de la sanción de la Ley 2689 de Saneamiento Ambiental, posteriormente derogada y reemplazada en el 2010 por la Ley 3122 de Saneamiento Ambiental. Uno de los



objetivos de esta Norma es la de determinar zonas con afectación y con ello establecer planes que permitan llevar adelante la remediación de estas y la mitigación de problemas futuros (Artículo 2).

A su vez, la actividad hidrocarburífera lleva consigo la modificación antrópica del terreno natural, a partir de la apertura de caminos y locaciones que permitan llevar a cabo las distintas tareas que se vinculan a ella.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Figura 1) se encuentra ubicada en el extremo nororiental de la provincia de Santa Cruz, en la República Argentina, en el sector central de la Cuenca del Golfo de San Jorge. Para la elección del área, se tuvo en cuenta la diversidad geomorfológica que caracteriza la zona de norte a sur.

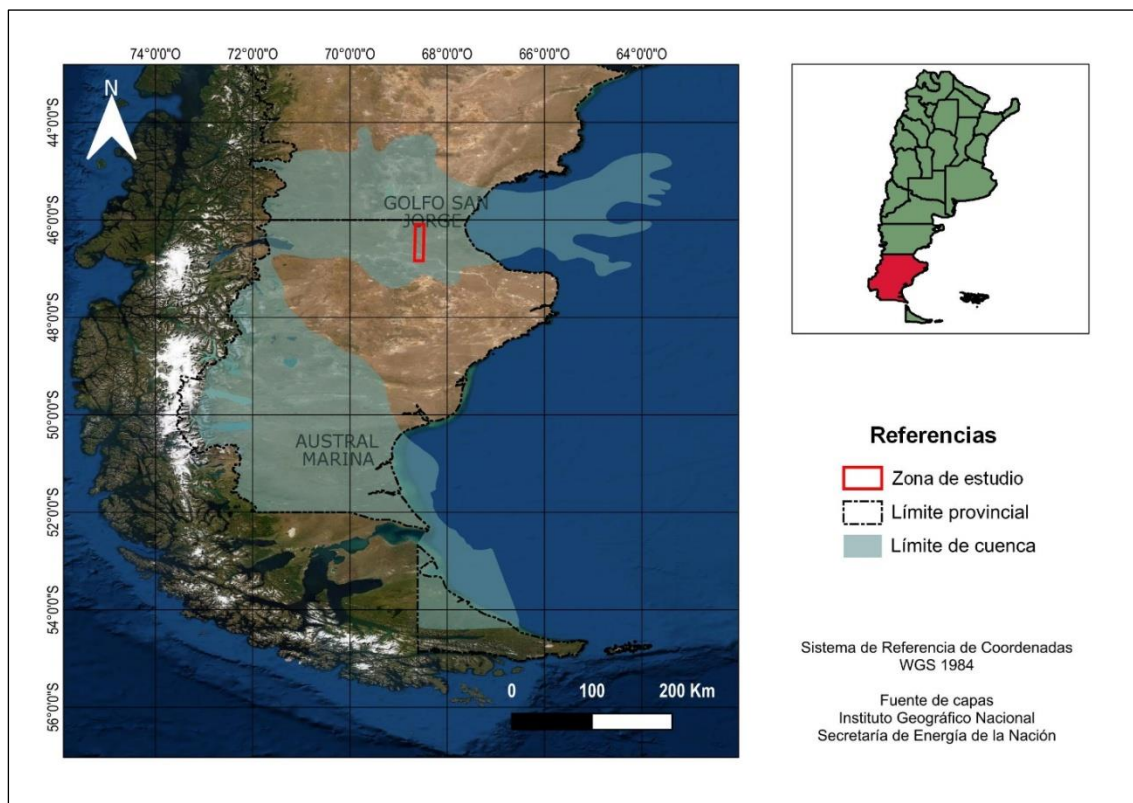


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.



## 4. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

En términos geológicos, el área de estudio se encuentra ubicada en el sector central de la Cuenca del Golfo de San Jorge, dentro de los límites correspondientes a la Hoja Geológica 4769 II Colonia Las Heras (Figura 2).

La columna estratigráfica aflorante de la zona de estudio se encuentra constituida por una secuencia principalmente sedimentaria, acompañada por cuerpos ígneos extrusivos, y desarrollada desde el Paleoceno inferior hasta la actualidad.

### 4.1. Formación Río Chico (Paleoceno superior)

La Fm. Río Chico se encuentra constituida por bancos de tobas bien consolidadas, con fractura concoide y coloraciones principalmente blanquecinas. Los espesores más comunes de estratos individuales se encuentran entre 2 y 3 m (Martínez et al., 2020).

Se diferencia en dos secciones (Cobos y Panza, 2001): inferior (arenas finas con intercalaciones de niveles arcillosos que forman bancos tabulares de diversas coloraciones) y superior (tobas amarillentas, castañas y rojizas). Se le asigna una edad paleocena superior.

### 4.2. Basalto Cerro del Doce (Eoceno inferior)

Dentro de esta unidad, se agrupan afloramientos de coladas y diques basálticos que cubren e intruyen, según el caso y en algunos sectores, a las sedimentitas de la Fm. Río Chico. Estos basaltos son esencialmente olivínicos y se caracterizan por presentar fenocristales y abundante pasta de vidrio volcánico, en la que se hallan dispersos microlitos de plagioclasa y de clinopiroxeno. A su vez, se pueden distinguir dos mantos: uno inferior y otro superior.

Se le asigna una edad eocena inferior en base a dataciones radimétricas K/Ar ( $55 \pm 2$  Ma) sobre roca total (Cobos y Panza, 2001) y teniendo en cuenta las relaciones estratigráficas con las formaciones Río Chico (base) y Sarmiento (techo).



#### **4.3. Formación Sarmiento (Eoceno superior)**

La Fm. Sarmiento se halla constituida fundamentalmente por piroclastitas: tobas, cineritas y chonitas arcillosas y bentoníticas, de coloraciones blanquecinas, grisáceas y amarillentas. Los bancos se caracterizan por ser gruesos, friables y presentar formas de erosión en tubo de órgano. A su vez, los afloramientos suelen encontrarse muy cubiertos, lo cual dificulta su reconocimiento.

La Fm. Sarmiento se puede diferenciar en dos secciones: una inferior y otra superior. La primera de ellas se encuentra constituida por tobas terrosas finas, altamente meteorizadas, que están acompañadas por concreciones de limolitas, rosetas de yeso y nódulos silíceos, y presenta coloraciones variables (rojizas, amarillentas y anaranjadas). La segunda se encuentra constituida por bancos de cineritas y tobas arcillosas blanquecinas a grisáceo blanquecinas, ubicados por encima de la Fm. Río Chico, en la margen norte de la bajada al río Deseado de la ruta provincial 12, y por los depósitos del cerro Mesa.

Se le asigna una edad correspondiente al Eoceno superior, no descartando que pueda llegar al Oligoceno inferior, en función del registro paleontológico correspondiente a fauna de mamíferos (Martínez et al., 2020).

#### **4.4. Formación Monte León (Oligoceno superior – Mioceno inferior)**

Se trata de los estratos marinos patagónicos del flanco oriental del Golfo de San Jorge, los cuales se ordenan en cinco secuencias granocrecientes de carácter regresivo (Bellosi, 1990). Dicha unidad se encuentra conformada por pelitas, chonitas, tobas, areniscas y calizas, de coloraciones amarillentas, castañas y grisáceas. Las secciones inferiores se caracterizan por presentar mayor cantidad de material piroclástico y por abundantes restos esqueléticos carbonáticos mientras que, en las secuencias superiores, predominan las facies epiclásticas.

Se apoya en forma discordante sobre las piroclastitas de la Fm. Sarmiento y se encuentra cubierta por la Fm. Santa Cruz, en relación de discordancia erosiva.



#### **4.5. Formación Santa Cruz (Mioceno inferior – medio)**

Unidad predominantemente arenosa, de grano mediano a fino, acompañada por pelitas arenosas. Las facies gruesas resultan escasas, pudiendo encontrar lentes aislados de areniscas gruesas o conglomerados finos. Por otra parte, abundan componentes piroclásticos, en forma de tufitas y bancos de tobas y chonitas. Las facies arenosas presentan coloraciones que varían desde gris a castaño grisáceo y gris azulado mientras que las facies finas cambian a coloraciones castañas claras y blanquecinas. A medida que aumenta el contenido de material piroclástico, la coloración resulta ser más clara.

#### **4.6. Gravas aluviales antiguas del río Chico – Nivel I (Mioceno medio)**

Se trata de depósitos de gravas gruesas a muy gruesas que coronan la meseta denominada Pampa del Castillo, la cual se extiende desde el noroeste de la localidad de Las Heras en sentido noreste hasta traspasar el límite con la provincia de Chubut. Dicha unidad presenta espesores que superan los 20 m de potencia.

#### **4.7. Depósitos aluviales sobre pedimentos de flanco – Nivel I (Mioceno superior)**

Unidad constituida por gravas gruesas a medianas, areniscas gruesas a conglomerádicas y limos, que constituyen un amplio nivel de pedimento de flanco litoral, producido por los movimientos de la fase Quéchuica que elevaron la planicie de rodados de la Pampa del Castillo. Estos depósitos se produjeron a expensas de la erosión de las gravas de la Pampa del Castillo, y su litología es similar, presentando un tamaño promedio menor en los rodados e incremento en la matriz.

Se le asigna una edad miocena superior en base a que comenzaron a desarrollarse a partir del levantamiento de la Pampa del Castillo (hace 10 Ma) y constituye un elemento positivo que marginó el paleorío del Lago Buenos Aires – Meseta Espinosa, a la que se asigna una edad pliocena inferior (Martinez et al., 2020).



#### **4.8. Gravas aluviales del paleocauce Lago Buenos Aires – Meseta Espinosa (Plioceno inferior)**

Se trata de depósitos que se ubican en la parte más alta de la amplia planicie conocida como meseta Espinosa. Estos depósitos se encuentran conformados por conglomerados gruesos, con escasa matriz y clastos subredondeados, con tamaños comprendidos entre 5 y 10 cm, prolados y con leve imbricación. La estructura predominante es grano-sostén y la matriz no supera el 5-10 % (Béros et al., 1988).

#### **4.9. Depósitos fluviales antiguos del cañadón Salado (Plioceno inferior)**

Se trata de los depósitos aterrazados correspondientes a la continuación oriental del Nivel II de terrazas del cañadón Salado denominado por Cobos y Panza (2001). Constituye la representación de un paleocauce del cañadón, abandonado durante el Plioceno por elevación isostática o descenso del nivel del mar.

La litología está constituida por gravas medianas, acompañadas por bancos más gruesos y lentes de areniscas conglomerádicas o areniscas gruesas. Presenta una estructura de barras y canales, difícil de delimitar, que se observa principalmente cuando los lentes de areniscas marcan fondos de canales. Se le asigna una edad correspondiente al Plioceno inferior (Cobos y Panza, 2001; Panza, 2002).

#### **4.10. Depósitos fluviales antiguos del río Deseado – Nivel I (Plioceno superior)**

Estos depósitos equivalen a la llamada Terraza II (del conjunto externo) del río Deseado definida por Béros et al. (1988), a la Terraza III de Cobos y Panza (2001) y a la Terraza II de Panza (2002). Conforman la parte principal de la denominada meseta Espinosa, al norte y sur del río Deseado y se encuentra constituida por conglomerados de rodados clasto-sostén, con grosera estructura de barras y canales, con intercalaciones de areniscas conglomerádicas en forma de lentes en los fondos de canales. Se le asigna una edad pliocena superior (Cobos y Panza, 2001).



#### **4.11. Depósitos fluviales antiguos del río Deseado – Nivel II (Plioceno superior)**

Estos depósitos corresponden a los denominados Terraza III por Béros et al. (1988), Terraza IV de Cobos y Panza (2001) y Terraza III de Panza (2002).

Se encuentran distribuidos a lo largo del río Deseado, con mayor desarrollo areal hacia la margen norte. Se caracterizan por un desarrollo morfológico y litológico similar al nivel anterior, pero con mayor participación de areniscas y menor tamaño granulométrico promedio en las gravas.

#### **4.12. Depósitos fluviales antiguos del río Deseado – Nivel III (Pleistoceno inferior –medio)**

Se trata de depósitos constituidos por bancos lenticulares de gravas medianas y arenas gruesas y medianas, con importante presencia de limos, que acompañan el diseño actual del valle del río Deseado. Se encuentran distribuidos a lo largo de todo el curso fluvial, sin mostrar predominancia clara en cuanto a la distribución entre las márgenes norte y sur. Se apoyan sobre distintas unidades, desde el Grupo Chubut hasta la Fm. Río Chico. Se le asigna una edad pleistocena inferior a media (Martinez et al., 2020).

#### **4.13. Depósitos aluviales sobre pedimentos de flanco – Nivel II (Pleistoceno)**

La erosión de la zona central del pedimento de flanco litoral que descendía desde la Pampa del Castillo hacia el mar provocó la formación de la depresión conocida actualmente como Gran Bajo Oriental. Con el desarrollo de esta estructura, se formaron nuevos niveles de pedimento, que disecaron el nivel anterior, conformando la ladera sur del bajo. La litología de estos depósitos resulta similar a la del nivel precedente, donde se observa un incremento en la matriz areno-limosa.

#### **4.14. Depósitos aluviales sobre pedimentos de flanco – Nivel III (Holoceno)**

Se incluyen bajo esta denominación aquellos depósitos que cubren las superficies de pedimentación desarrolladas durante la etapa final de formación del paisaje. Se encuentran ubicadas entre los relictos de los niveles anteriores y



constituyen la parte baja de las laderas del Gran Bajo Oriental y la ladera oriental de la meseta Espinosa. Se trata de gravas finas, arenas medianas a finas y limos no consolidados.

#### **4.15. Depósitos coluviales y aluviales (Holoceno)**

Los depósitos coluviales están constituidos por gravas finas no consolidadas, arenas finas a medianas y limos, los cuales cubren las pendientes en el Gran Bajo Oriental, las pendientes litorales ubicadas al norte de Caleta Olivia y al este de la meseta Espinosa y que forman algunos conos aluviales en los sectores de barranca del río Deseado. Los depósitos aluviales están constituidos por sedimentos no consolidados correspondientes a gravas finas, arenas medianas, limos y arcillas, que cubren los fondos de cañadones y cursos intermitentes.

#### **4.16. Depósitos de bajos y laguna (Holoceno)**

Se trata de limos y arcillas que pueden estar salinizados y se hallan depositados en los fondos de lagunas y bajos que recogen el drenaje centrípeto de las lagunas circundantes. Se encuentran distribuidos en tres sectores principales: sector deprimido del Gran Bajo Oriental, sector oeste de la meseta Espinosa y depresión central de la Pampa del Castillo, donde se ubican una serie de bajos y lagunas alineadas a lo largo del megapaleocauce.

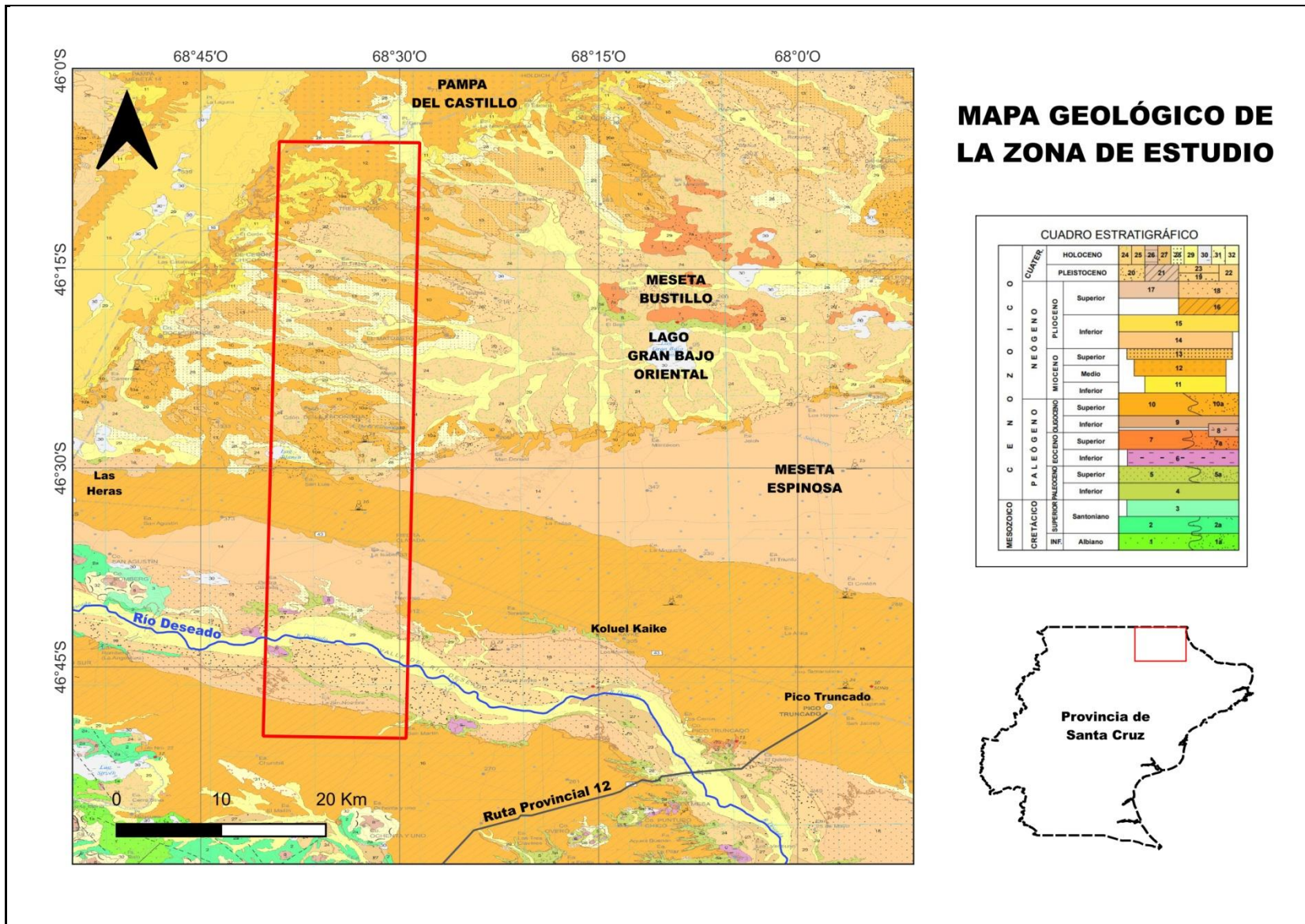


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio.

## 5. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

En la zona de estudio se pueden reconocer cuatro grupos de elementos morfoestructurales distintivos (Martínez et al., 2020) (Fig. 3):

- a) Planicies de gravas aterrazadas
- b) Pedimentos de flanco
- c) Geoformas volcánicas, lávicas o intrusivas
- d) Bajos sin salida – Gran Bajo Oriental

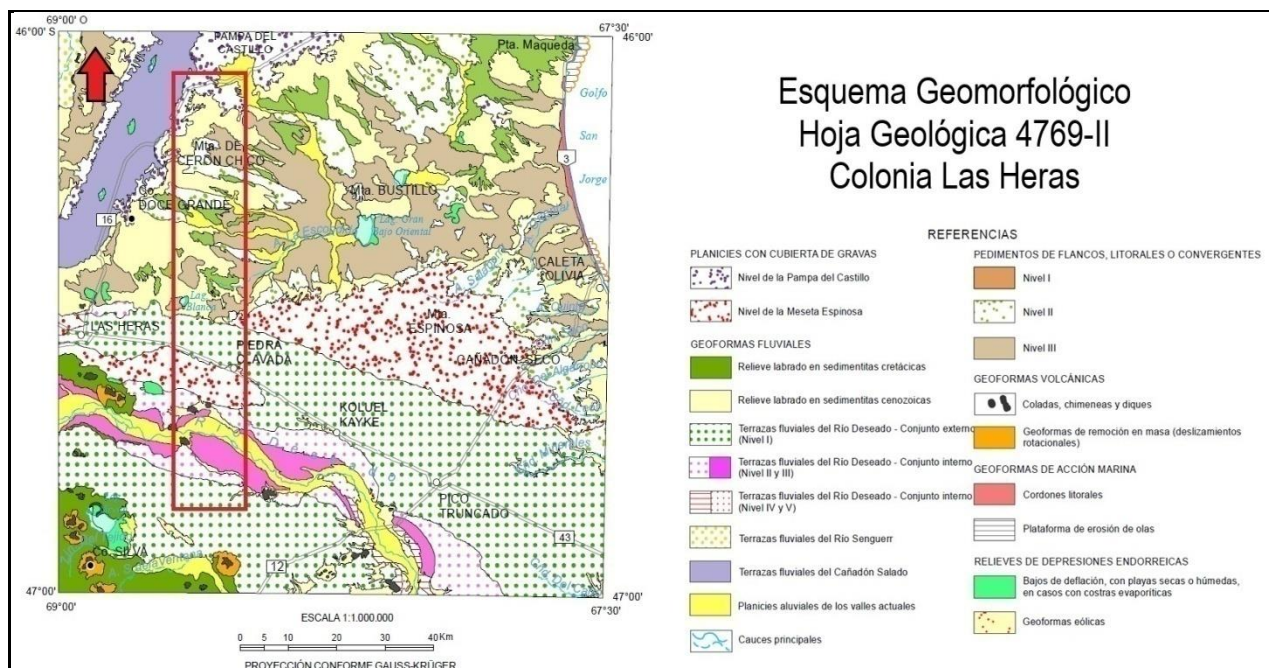


Figura 3. Esquema geomorfológico de la zona de estudio. Modificado de Martínez et al. (2020).

### 5.1. Planicies de gravas aterrazadas

Los niveles de meseta, cubiertos por mantos de psefitas de espesor y granulometría variables, se pueden dividir en dos grupos principales, en función de su origen:

#### 1. Depósitos ligados a paleocorrientes poco encauzadas

**Meseta de la Pampa del Castillo:** formada por gravas antiguas del río Chico (> 700 m.s.n.m.), con forma triangular, pendiente suave al NE y E, y fuerte disección por su antigüedad (Mioceno).



**Meseta Espinosa (nivel superior):** se trata de una planicie ondulada (> 250 m) asociada a un paleocauce del lago Buenos Aires, limitada al norte por pedimentos de la Pampa del Castillo. Fue re TRABAJADA por el río Deseado y erosionada hacia el mar, generando pedimentos y cañadones. La apertura del Gran Bajo Oriental modificó su flanco norte.

## 2. **Depósitos fluviales vinculados a ríos actuales (Deseado, Senguer y Cañadón Salado)**

**Río Deseado:** presenta dos conjuntos de terrazas:

**Externo:** Nivel I, separado topográficamente de la Meseta Espinosa y de las terrazas internas.

**Interno:** Niveles II a V, asociados al valle actual.

**Cañadón Salado:** niveles aterrazados cubiertos por depósitos coluviales, aluviales y pelíticos salinizados.

## 5.2. **Pedimentos de flanco**

Se reconocen dos áreas principales dominadas por pedimentos de flanco.

1. **Gran Bajo Oriental**, el cual presenta tres niveles:

**Nivel I:** pedimento litoral descendente desde la Pampa del Castillo hacia el mar; hoy solo quedan mesetas relictuales.

**Niveles II y III:** generados por la apertura del Bajo. El II se encuentra más desarrollado en sus flancos oeste, norte y sur mientras que el III predomina en la parte central.

2. **Flanco oriental de la meseta Espinosa:** presenta un Nivel II, correlacionado con el del Gran Bajo Oriental, formado tras el cambio de nivel de base que detuvo la depositación del paleorío del lago Buenos Aires e inició la erosión.

Estos pedimentos están intensamente disectados por cañadones con erosión retrocedente, generando lomadas perpendiculares a la costa y, en su parte distal, acantilados bajos.



### 5.3. Geoformas volcánicas, lávicas o intrusivas

Las geoformas volcánicas se dividen en:

**Mesetas estructurales lávicas:** limitadas a los basaltos del cerro Mesa (superior e inferior) y del cerro Pico Truncado, además de relictos lávicos (pedreros y lomadas) en las laderas del valle del río Deseado, que no superan la altura de la meseta Espinosa.

**Cuerpos intrusivos:** conformados por el cerro Romberg y su prolongación hasta el cerro Wenceslao, el dique anular y otro que lo corta al SO, junto con los cerros Silva y Guacho Sur.

Se caracterizan por rasgos geomorfológicos destacados, tales como deslizamientos rotacionales de basaltos sobre sedimentitas cretácicas, siendo el caso más notable el del cerro Ochenta y Uno (con ocho coronas de deslizamiento). También hay movimientos de remoción en masa en los cerros Silva, Sirven y Romberg.

### 5.4. Bajos sin salida – Gran Bajo Oriental

En la zona de estudio se identifican bajos sin salida formados por erosión sobre mesetas cubiertas por gravas:

**Bajos menores:** originados por inversión del relieve, donde sectores de rocas friables sin cobertura de grava quedaron expuestos y fueron erosionados principalmente por el viento, generando depresiones. Dentro de estos bajos, se destaca la zona de los cerros Mesa, Bayo, Puntudo y Puntudo Chico.

**Gran Bajo Oriental:** principal depresión, con laderas > 750 m y piso cercano al nivel del mar. Presenta una génesis distinta a los anteriores: labrado sobre el pedimento de flanco litoral de la Pampa del Castillo y confinado al sur por la meseta Espinosa.

Se formó por la destrucción de la red de drenaje, asociada a un cambio climático severo que eliminó el escurrimiento y expuso sedimentos finos a la erosión eólica.

El levantamiento costero patagónico (desde el Pleistoceno) intensificó la erosión, seccionando la cobertura de gravas y dejando al descubierto formaciones sedimentarias (Santa Cruz, Monte León, Sarmiento y Río Chico).



## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para la confección del presente trabajo, se utilizan diferentes fuentes de información, así como herramientas de procesamiento, análisis y presentación.

### **6.1. Concepto de teledetección**

La teledetección constituye una técnica que tiene como fin obtener información de un objeto sin la necesidad de estar en contacto con él. Está compuesta por dos partes: la tecnología de adquisición de datos, empleando sensores localizados a cierta distancia del objetivo, y el análisis de los mismos para interpretar los atributos físicos del objeto.

El principio básico involucrado en los métodos de teledetección se basa en que, en diferentes regiones de longitud de onda del espectro electromagnético (EEM), cada tipo de objeto refleja o emite cierta intensidad o cantidad de radiación, la cual resulta dependiente de los atributos físicos y composicionales del mismo (Gupta, 2017).

De forma simplificada, el flujo de trabajo completo de la teledetección (Figura 4) implica la captura, discretización y almacenamiento, por parte del sensor, de la energía procedente del sol y reflejada por la superficie de la Tierra, así como su posterior transmisión a una estación de recepción y procesamiento terrestre, donde los datos obtenidos se convierten en imágenes digitales. Seguidamente, estas últimas son analizadas e interpretadas, ya sea de manera visual y/o digital, para extraer información acerca de los objetos que fueron iluminados y aplicarla a la resolución de diferentes tareas o problemáticas.

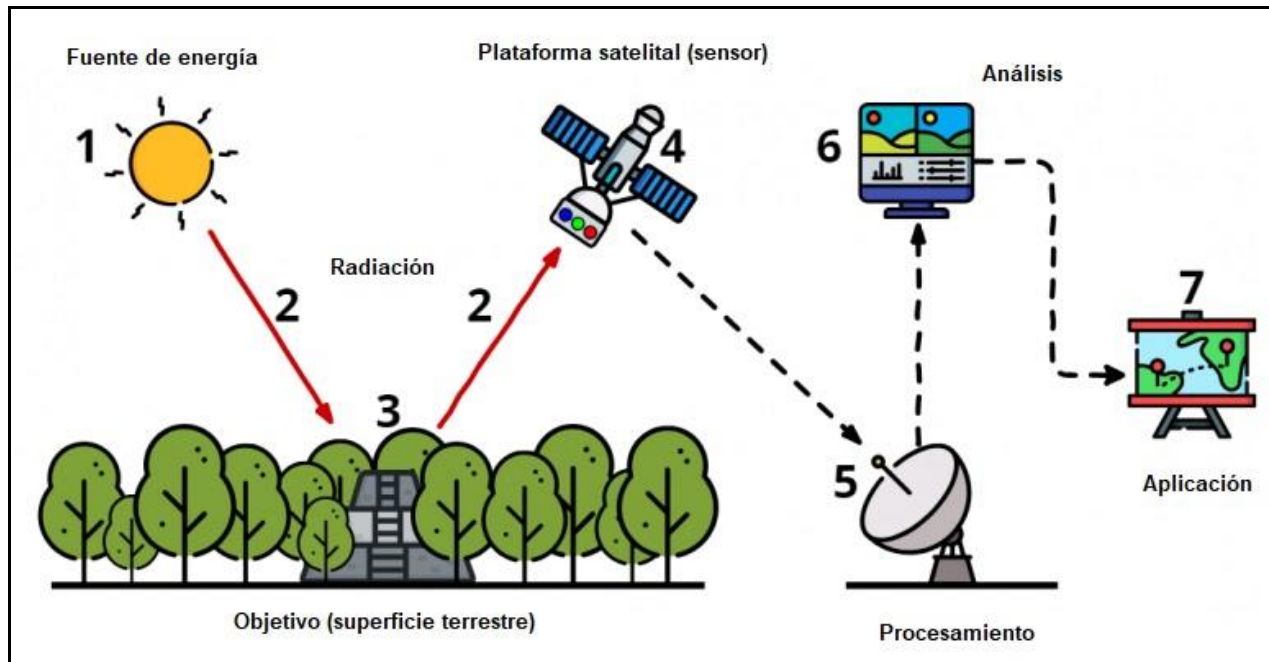


Figura 4. Flujo de trabajo general de la teledetección.

Los factores que intervienen en la formación de una imagen por teledetección, utilizando sensores pasivos, son:

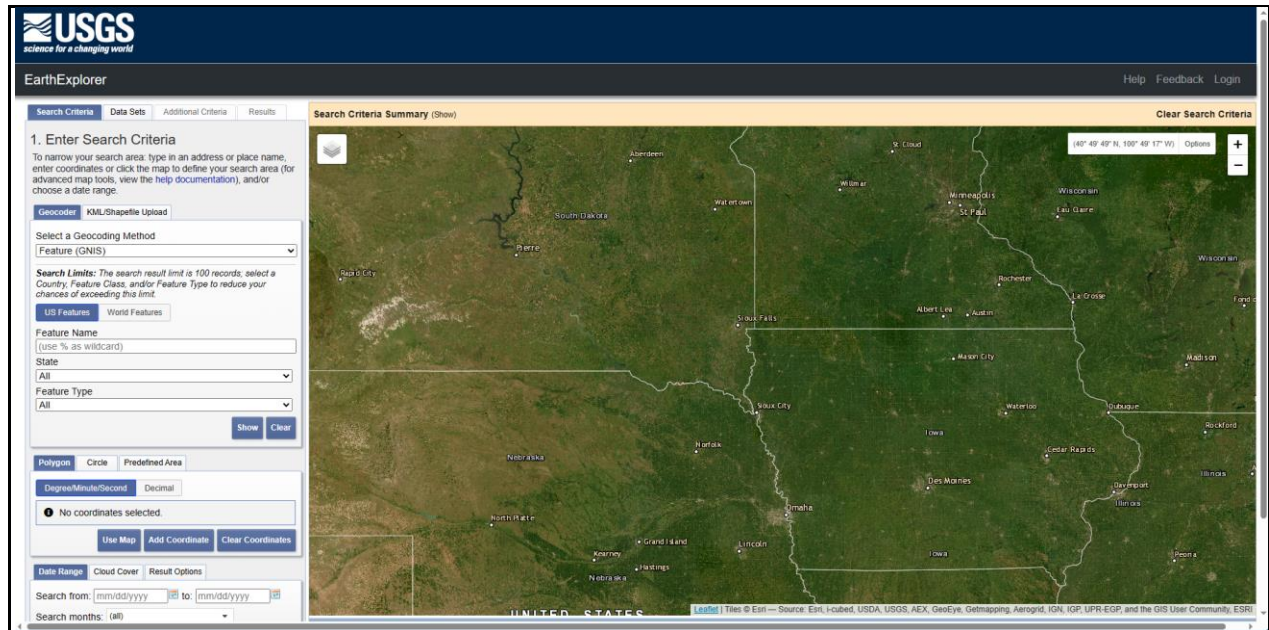
- a) Fuente de iluminación: en el caso de los sensores pasivos es el sol.
- b) Sensor que registra la energía solar reflejada por la superficie terrestre.
- c) Antena en tierra para recibir la información capturada por los sensores.
- d) Software adecuado para el procesamiento y análisis de la información.
- e) Usuarios de los distintos productos obtenidos como resultado de los procesos anteriores.

## 6.2. Búsqueda de información antecedente

Inicialmente, se realizó la búsqueda de material bibliográfico antecedente, para llevar a cabo las descripciones geológica y geomorfológica del área de estudio. En tal sentido, la descripción de las unidades geológicas aflorantes en el área de estudio, así como la descripción geomorfológica, se llevaron a cabo a partir de los datos de la Hoja Geológica 4769-II Colonia Las Heras.

### 6.3. Descarga de imágenes satelitales

Utilizando la plataforma web *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov>), perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos (*United States Geological Survey – USGS*), se descargaron los archivos correspondientes a tres imágenes satelitales de la misión *Landsat* (Figura 5).



**Figura 5.** Interfaz gráfica de usuario de la plataforma web *EarthExplorer* utilizada para descargar imágenes satelitales.

En tal sentido, se obtuvieron dos imágenes de la misión *Landsat 5*, cada una de ellas compuesta por siete bandas, y una imagen de la misión *Landsat 9*, compuesta por 11 bandas. Las mismas corresponden al mes de enero de los años 1986, 2004 y 2022 (Figura 6).

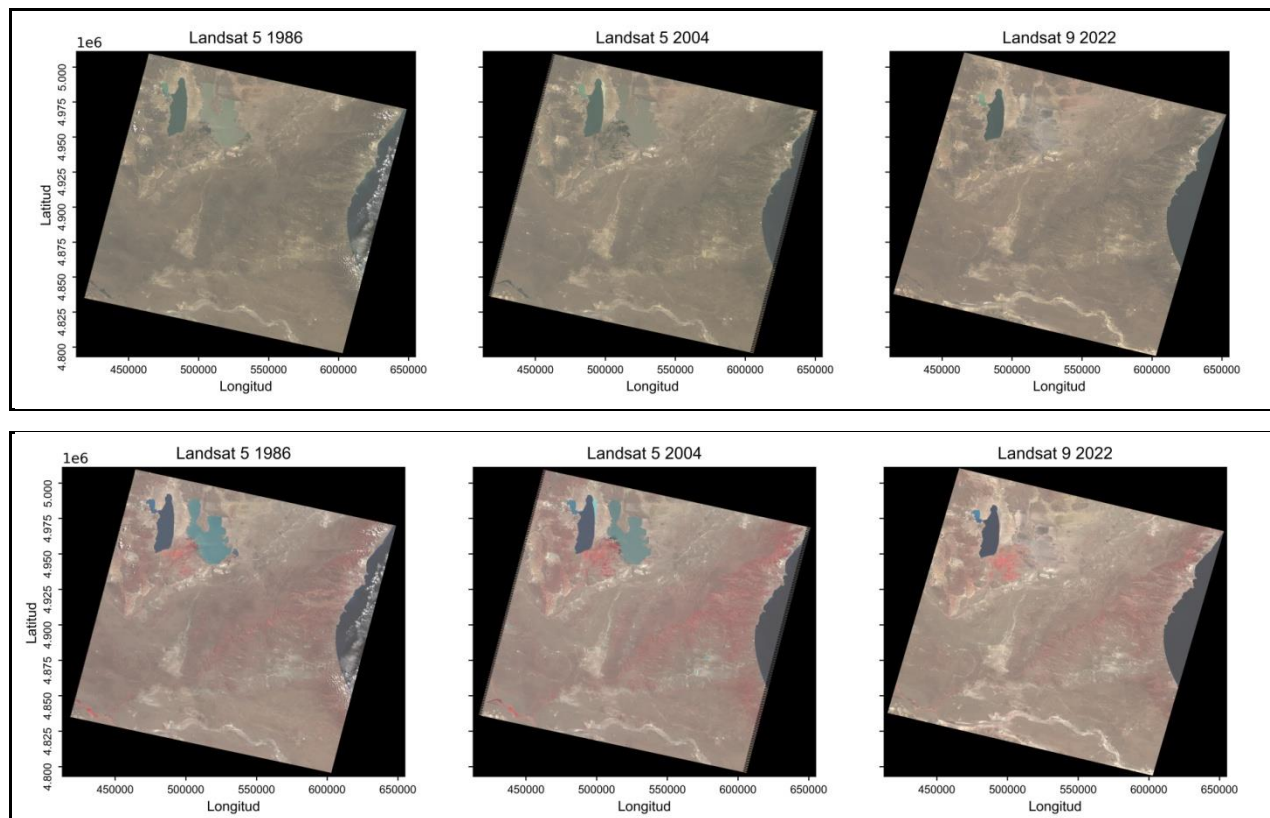


Figura 6. Combinaciones RGB color verdadero (arriba) y RGB falso color infrarrojo (abajo) de las imágenes satelitales empleadas.

#### 6.4. Procesamiento y análisis

Empleando las imágenes satelitales descargadas, se llevó a cabo un análisis temporal, con el objetivo de observar cambios en la cobertura terrestre de la zona de estudio. Con el propósito de automatizar las tareas de procesamiento, se desarrollaron una serie de *scripts* (archivos que contienen código fuente), empleando el lenguaje de programación *Python* (<https://www.python.org>).

En primer lugar, se procedió a realizar el cambio del sistema de coordenadas (reproyección) de cada una de las bandas de las imágenes descargadas, debido a que las mismas se encuentran georreferenciadas por defecto en el sistema proyectado WGS1984 UTM Zona 19N (código EPSG 32619) y para el desarrollo del trabajo se optó utilizar el sistema de coordenadas proyectado WGS1984 UTM Zona 19S (código EPSG 32719).



Por lo tanto, se desarrolló para este trabajo una función (Figura 7. Código correspondiente a la función desarrollada con el objetivo de automatizar la reproyección de archivos ráster.) que permite proyectar y/o reproyectar archivos ráster (archivo digital que representa imágenes como una cuadrícula o matriz de píxeles, donde cada píxel tiene un valor correspondiente a un rango del EEM) entre diferentes sistemas de coordenadas, empleando la librería de *Python rasterio* (<https://rasterio.readthedocs.io/en/stable/>), la cual posibilita manipular y trabajar con archivos que contienen información geoespacial en el formato mencionado.

En tal sentido, la función recibe como entrada el directorio donde se encuentran guardados los archivos correspondientes a las bandas (en formato .TIF), el directorio de salida, la lista de bandas de interés, el patrón correspondiente al nombre de los archivos y el sistema de coordenadas al cual se quiere proyectar/reproyectar. Dentro de la misma, se itera la lista de bandas, se busca el archivo correspondiente en el directorio de origen, se abre, se guarda el sistema de coordenadas de origen, se calculan la transformada, el valor del ancho y el valor del alto de destino en función del sistema de coordenadas de origen y destino y el ancho y alto de la banda de origen y, por último, se escribe (guarda) esta nueva información en un nuevo archivo ráster en un nuevo directorio. De esta forma, se posibilita la automatización de tareas para trabajar con un gran número de archivos.



```
6 def reproject_raster(src_path: str, dst_path: str, band_list: list, filename_pattern: str, dst_crs: dict, file_ext: str="TIF") -> str:
7
8     """
9     Reprojection raster function
10    src_folder: folder containing the raster files
11    band_list: list of the bands to reproject. Landsat --> ["B1", "B2", "B3"]
12                Sentinel --> ["B01", "B02", "B03"]
13    filename_pattern: pattern string of the file name
14    dst_crs: destination Coordinate Reference System --> CRS or dict {"init": "EPSG:4326"}
15    file_ext: file extension. TIF by default for Landsat images. For Sentinel images use the .jp2 extension
16    """
17
18    # Define the source (parameter) src_path: str
19    source_path = Path(src_path)
20    destination_path = Path(dst_path)
21
22    # Checks wheter the destination path exists or not
23
24    if not destination_path.exists():
25
26        # Create the destination path
27        destination_path.mkdir()
28
29        # Reproject the files iterating over the list of bands
30        for band in band_list:
31
32            try:
33
34                # Define the file
35                file = next(source_path.glob(f"{filename_pattern}{band}.{file_ext}"))
36
37                # Open the file
38                source_raster = rasterio.open(file)
39
40                # Define the source CRS
41                source_crs = source_raster.crs
42
43                # Calculate the transform, width and height of the destination file
44                # based on the features of the source file and the destination CRS
45                transform, width, height = calculate_default_transform(source_crs, dst_crs,
46                                                                    source_raster.width,
47                                                                    source_raster.height,
48                                                                    *source_raster.bounds)
49
```

Figura 7. Código correspondiente a la función desarrollada con el objetivo de automatizar la reproyección de archivos ráster.

A continuación, con el objetivo de enfocar los cálculos en la zona de estudio definida, se procedió a realizar el recorte (*clip*) de cada banda. De la misma manera que para efectuar la reproyección, se desarrolló una función que permitiera llevar adelante dicha tarea (Figura 8. Código correspondiente a la función desarrollada con el objetivo de automatizar el recorte de archivos ráster.). En este caso, además de la librería mencionada anteriormente, se hizo uso de la librería **geopandas** (<https://geopandas.org/en/stable/docs.html>), la cual permite trabajar y manipular archivos que contienen información geoespacial en formato vectorial (puntos, líneas y polígonos).

Para este caso, la función recibe como entrada el directorio donde se encuentran guardados los archivos, el directorio de salida, un archivo en formato vectorial (área de interés), del cual se extrae su geometría para realizar el recorte, el patrón correspondiente al nombre de los archivos y la lista de bandas de interés.



Dentro de la misma se itera la lista de bandas y se busca el archivo correspondiente a la banda de interés en el directorio de origen, el cual se abre para aplicarle una máscara de recorte de acuerdo con el área de interés definida. A continuación, esta nueva información se escribe (guarda) en un nuevo archivo ráster, ubicado en el directorio de destino.

```
1 def clip_raster(src_path: str, dst_path: str, area_polygon: str, filename_pattern: str, band_list: list, file_extension: str = "TIF") -> str:
2
3     # Instantiate the source and destination paths and the path to the mask file
4     source_path = Path(src_path)
5     destination_path = Path(dst_path)
6     area_polygon = Path(area_polygon)
7
8     # Open the shapefile to obtain the geometry which is going to be used to make the clip
9     clip_file = gpd.read_file(area_polygon)
10    clipping_area = [clip_file.loc[0, "geometry"]]
11
12    # Creating the destination path
13    destination_path.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
14
15    # Iterate over the list of bands
16    for band in band_list:
17
18        try:
19
20            # Take the first file that matches the pattern within the path
21            file = next(source_path.glob(f"{filename_pattern}{band}*.{file_extension}"))
22
23            # Read the band
24            in_band = rasterio.open(file)
25
26            # Clip the band based on the area of interest
27            out_band, out_transform = mask(in_band, clipping_area, crop=True)
28
29            # Define the metadata of the output file and update it
30            out_meta = in_band.meta
31            out_meta.update({
32                "driver": "GTiff",
33                "height": out_band.shape[1],
34                "width": out_band.shape[2],
35                "transform": out_transform
36            })
37
38            # Define the name of the output file
39            destination_file = destination_path.joinpath(f"{file.name[:-4]}_clip{file.name[-4:]}")
40
41            # Write the output file
42            with rasterio.open(destination_file, "w", **out_meta) as out_raster:
43                out_raster.write(out_band)
```

Figura 8. Código correspondiente a la función desarrollada con el objetivo de automatizar el recorte de archivos ráster.

Una vez que las bandas fueron reproyectadas y recortadas, se procedió a realizar una operación de álgebra ráster o álgebra de bandas, donde se calculó el NDVI, el cual es usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación en base a la medición de la intensidad de la radiación de bandas del EEM que la vegetación emite o refleja. En tal sentido, dicho índice se calcula a partir de las mediciones individuales de las bandas del infrarrojo cercano (*near infrared* – NIR) y rojo de la siguiente manera:



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

En donde las variables *NIR* y *Red* están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del infrarrojo cercano y rojo, respectivamente. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual. Por lo tanto, éstos toman valores entre un rango de 0 a 1 y, como consecuencia, el NDVI varía entre -1 y 1.

Por otra parte, a lo largo de la zona de estudio y apoyándose en cartografía base actualizada, se digitalizaron en total 15 polígonos correspondientes a locaciones y caminos ubicados en diferentes áreas de actividad petrolera dentro de los límites de la zona de estudio elegida, dividiendo a esta última en tres sectores: sur, centro y norte. Una vez delimitados, se procedió a extraer valores de NDVI promedio de cada geometría para los distintos años analizados, a partir del cálculo de estadísticas de zona (*Zonal Statistics*), con el fin de observar cambios en las mismas con el paso del tiempo.

Adicionalmente, se digitalizaron dos blancos de manera aleatoria dentro de los sectores sur y centro, en zonas no afectadas por actividad hidrocarburífera, y se tomaron valores de NDVI a partir de la herramienta de muestreo puntual (*Point Sampling Tool*).

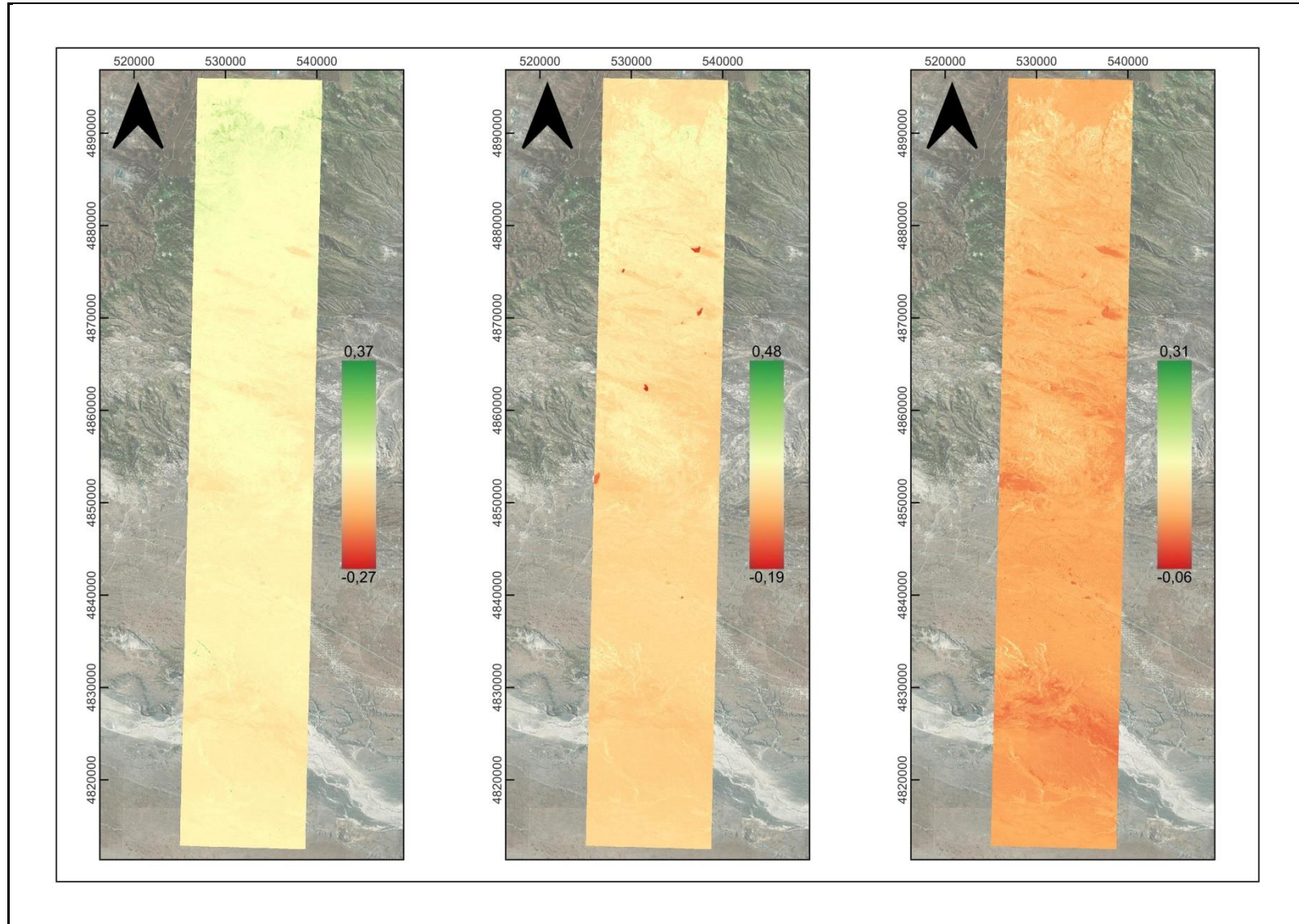
## 6.5. Presentación de los resultados

A partir del cálculo de NDVI (Figura 9), se puede observar que, para el mes de enero del año 1986, la zona de estudio elegida presenta valores mínimo y máximo de -0.27 y 0.37, respectivamente, con un valor promedio de 0.041. Para el mes de enero año 2004, el rango de NDVI estuvo comprendido entre un valor mínimo de -0.19 y un valor máximo de 0.48, siendo el valor promedio de 0.082. Por último, para el mes de enero del año 2022, el índice NDVI de la zona de estudio muestra un valor promedio de 0.04, con un valor mínimo de -0.061 y un valor máximo de 0.32 (Tabla 1).



**Tabla 1.** Valores de NDVI obtenidos para la zona de estudio.

	<b>Enero 1986</b>	<b>Enero 2004</b>	<b>Enero 2022</b>
<b>Valor mínimo</b>	-0.27	-0.19	-0.061
<b>Valor máximo</b>	0.37	0.48	0.32
<b>Valor promedio</b>	0.041	0.082	0.04

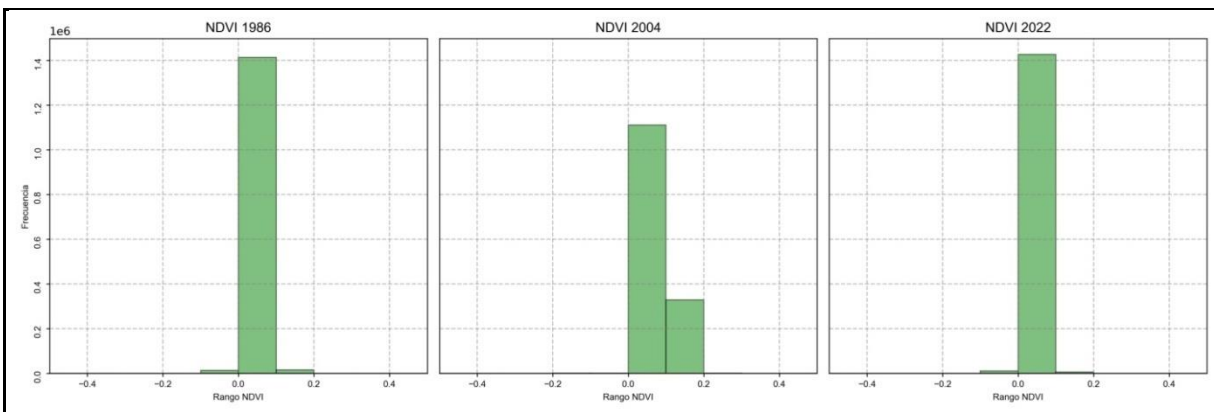


**Figura 9.** NDVI calculado para el área de estudio para los años analizados. **Izquierda:** 1986. **Centro:** 2004. **Derecha:** 2022.



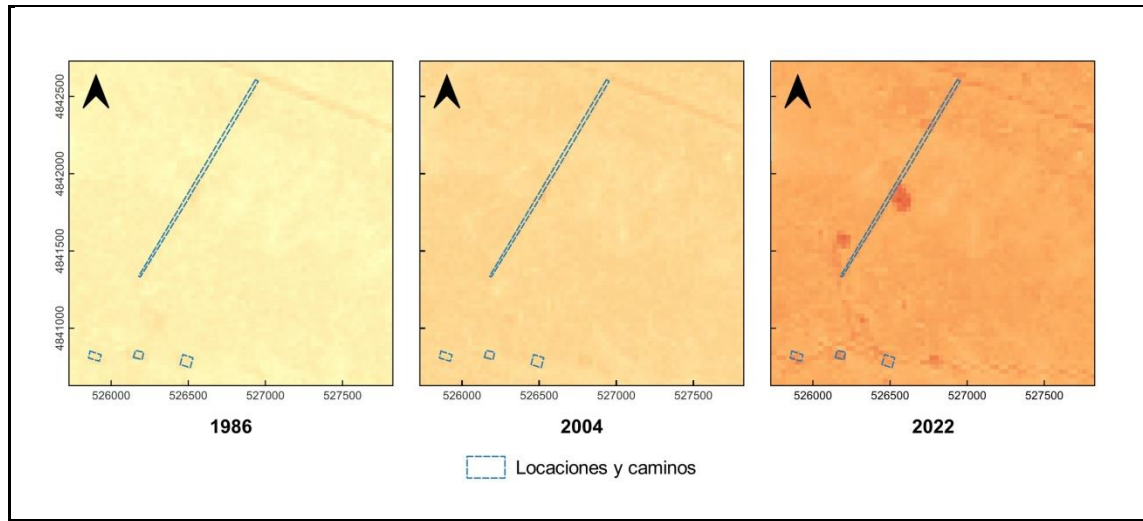
Por otro lado, a partir de la confección de histogramas de frecuencia (Figura 10), se puede observar que, para los años 1986 y 2022, los valores de NDVI se concentran en un rango comprendido entre -0.1 y 0.2 mientras que, en el año 2004, los mismos se encuentran distribuidos en un rango entre 0.0 y 0.2.

A su vez, resulta importante mencionar que, si bien en los tres casos la mayor frecuencia de valores se concentra en el rango entre 0.0 y 0.1, para el año 2004 la frecuencia de valores en el rango entre 0.1 y 0.2 es notoriamente superior respecto a los otros años.



**Figura 10.** Histograma de frecuencia de los valores de NDVI para la zona de estudio.

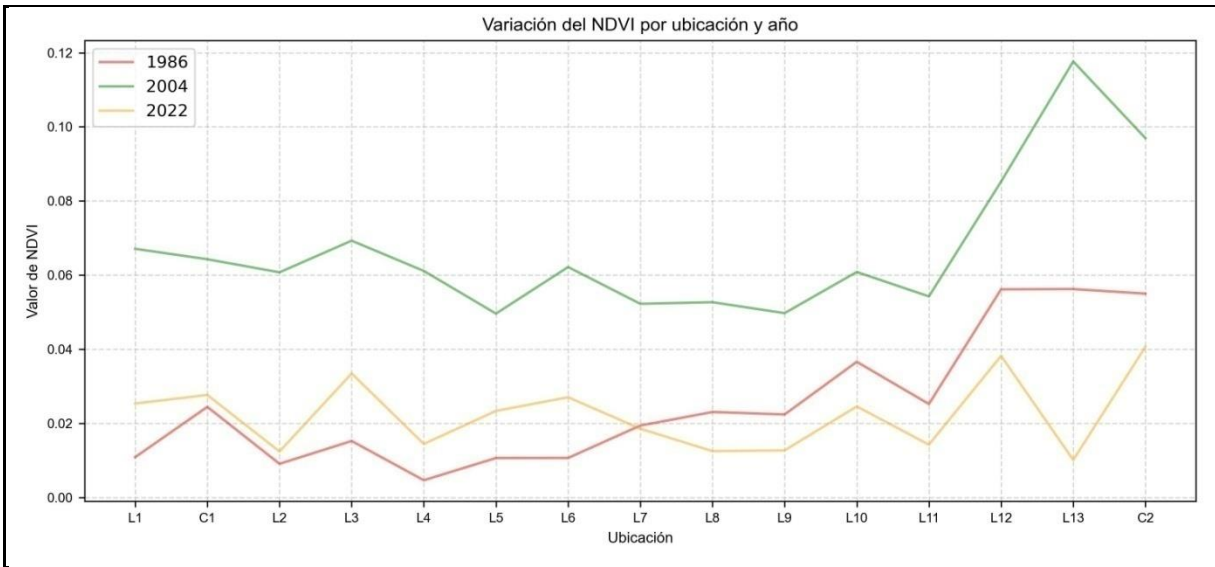
A partir de los datos extraídos de las locaciones y caminos digitalizados (Figura 11), se puede observar que el año 2004 muestra los mayores valores de NDVI (Tabla 2). Además, se observa que el año 2022 sufrió tanto aumento como descenso de los valores de NDVI respecto al año 1986 (Figura 12).



**Figura 11.** Locaciones y caminos digitalizados.

**Tabla 2.** Valores de NDVI promedio obtenidos para las locaciones y caminos digitalizados.

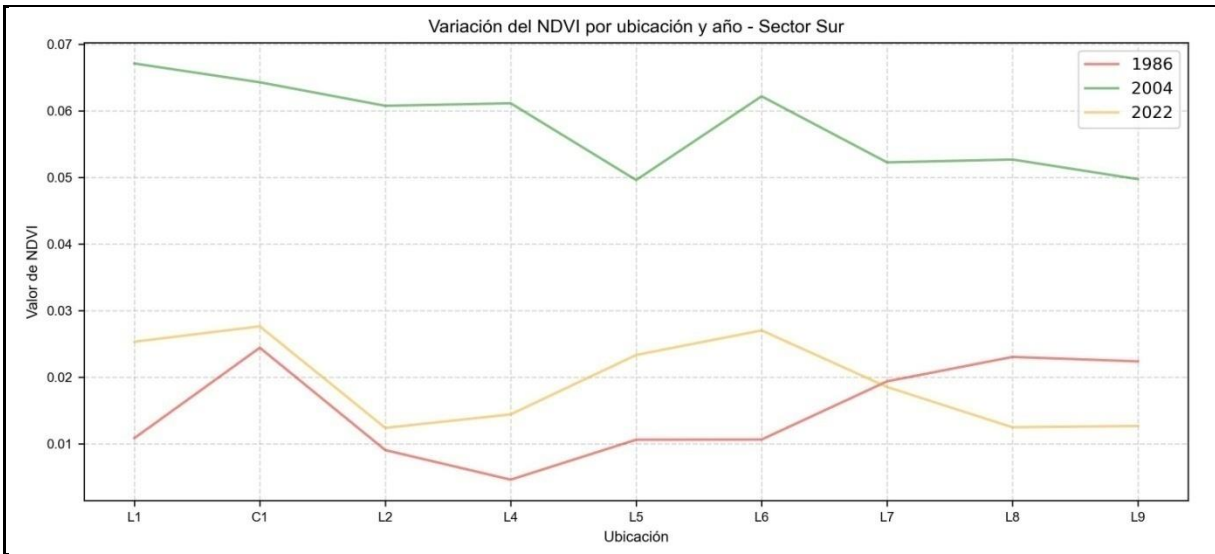
ID	Tipo	Sector	Área aproximada [m <sup>2</sup> ]	Cantidad de píxeles	NDVI 1986	NDVI 2004	NDVI 2022
L1	Locación	Sur	3328.045	5	0.01087	0.06709	0.02534
C1	Camino	Sur	28662.954	32	0.02444	0.06427	0.02765
L2	Locación	Sur	5943.717	5	0.00908	0.06074	0.01241
L3	Locación	Centro	16880.188	20	0.01523	0.06928	0.03345
L4	Locación	Sur	2642.699	4	0.00464	0.06112	0.01444
L5	Locación	Sur	41039.578	46	0.01064	0.0496	0.02335
L6	Locación	Sur	4568.443	5	0.01066	0.06217	0.02704
L7	Locación	Sur	6824.744	7	0.01939	0.05225	0.01855
L8	Locación	Sur	7853.363	9	0.02306	0.05268	0.0125
L9	Locación	Sur	7137.858	7	0.02239	0.04973	0.0127
L10	Locación	Norte	16163.891	17	0.0366	0.06083	0.02456
L11	Locación	Centro	9392.855	9	0.02521	0.05425	0.01424
L12	Locación	Centro	4546.509	6	0.05616	0.08522	0.03821
L13	Locación	Centro	8228.485	9	0.05623	0.11764	0.01012
C2	Camino	Centro	2490.574	2	0.05499	0.09695	0.04064
<b>Promedio</b>					0.02531	0.06692	0.02235
<b>Desvío estándar</b>					0.01772	0.01914	0.00984
<b>Coefficiente de variación</b>					70.02	28.60	44.03



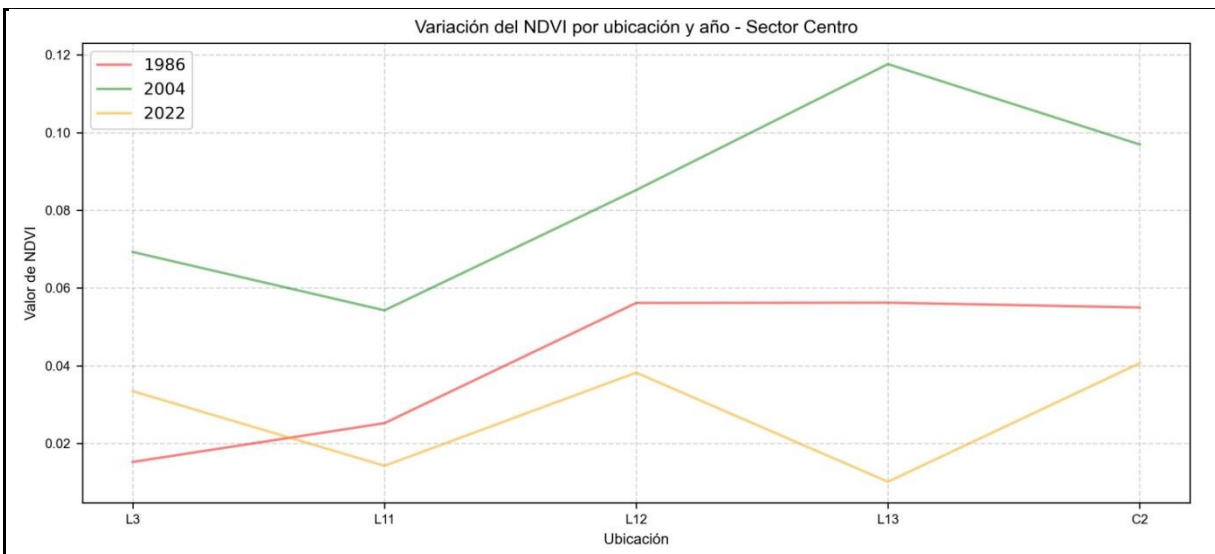
**Figura 12.** Variación del valor de NDVI de las locaciones y caminos.

A continuación, los datos se dividieron por sector (considerando solo sur y centro y descartando la zona norte, debido a que solo se contaba con un único dato) y se graficaron los valores de NDVI para cada uno, donde se observa que el año 2004 presenta los mayores valores.

Sin embargo, relacionado con los años restantes, se puede apreciar una diferencia entre sectores: para el sector sur, los valores de NDVI del año 2022 se encuentran, en su mayoría, por encima de los valores del año 1986 mientras que, en el sector central, los valores de NDVI del año 1986 se encuentran por encima de aquellos correspondientes al año 2022 (Figura 13 y Figura 14).



**Figura 13.** Variación del valor de NDVI de las locaciones y caminos del Sector Sur.



**Figura 14.** Variación del valor de NDVI de las locaciones y caminos del Sector Centro.

Con el fin de analizar estas tendencias, se llevó a cabo una prueba t de *Student* con el fin de determinar si las muestras correspondientes a cada año pertenecen a poblaciones con igual media o, por el contrario, se puede considerar que presentan diferencias significativas. En tal sentido:

$$\text{Hipótesis nula } H_0: \text{Media}_{\text{año1}} = \text{Media}_{\text{año2}}$$

$$\text{Hipótesis alternativa } H_1: \text{Media}_{\text{año1}} \neq \text{Media}_{\text{año2}}$$



Considerando un test a dos colas, con 28 grados de libertad y 10 % de significancia (5 % en cada cola), los valores corresponden a -1.7011 y 1.7011. En otras palabras, las probabilidades del estadístico t menores a -1.7011 y mayores a 1.7011 son del 5 % en cada caso. Si las probabilidades del estadístico hallado son mayores a 0.10 (10 %), se acepta la hipótesis nula, ya que no existen evidencias que indiquen o sugieran que las dos muestras provienen de poblaciones con medias diferentes. Es decir, no hay diferencias significativas en los valores de NDVI para ambos años.

En la Tabla 3, se observa que no existen diferencias significativas en el indicador NDVI para los años 1986 y 2022, por lo cual, se acepta la hipótesis nula de igualdad de medias. No obstante, los valores obtenidos para el año 2004 difieren significativamente respecto a los años 1986 y 2022. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, lo cual indica que las muestras del año 2004 provienen de poblaciones que tienen diferentes medias.

**Tabla 3.** Resultados de la probabilidad del estadístico t de la prueba de *Student*.

	1986	2004	2022
1986			
2004	$1.16 \times 10^{-6}$		
2022	0.58	$8.09 \times 10^{-8}$	

Seguidamente, la información obtenida de las locaciones y caminos se vinculó con datos correspondientes a registros históricos de temperatura media y precipitación acumulada de los últimos cuatro meses del año anterior, previos a la toma de la imagen (Tabla 4). A su vez, se vinculó la información correspondiente a la cubierta sedimentaria y región geomorfológica en la cual se asientan las zonas con desarrollo de actividad petrolera.

**Tabla 4.** Datos de temperatura media mensual y precipitación mensual acumulada de los últimos cuatro meses anteriores a la toma de las imágenes.

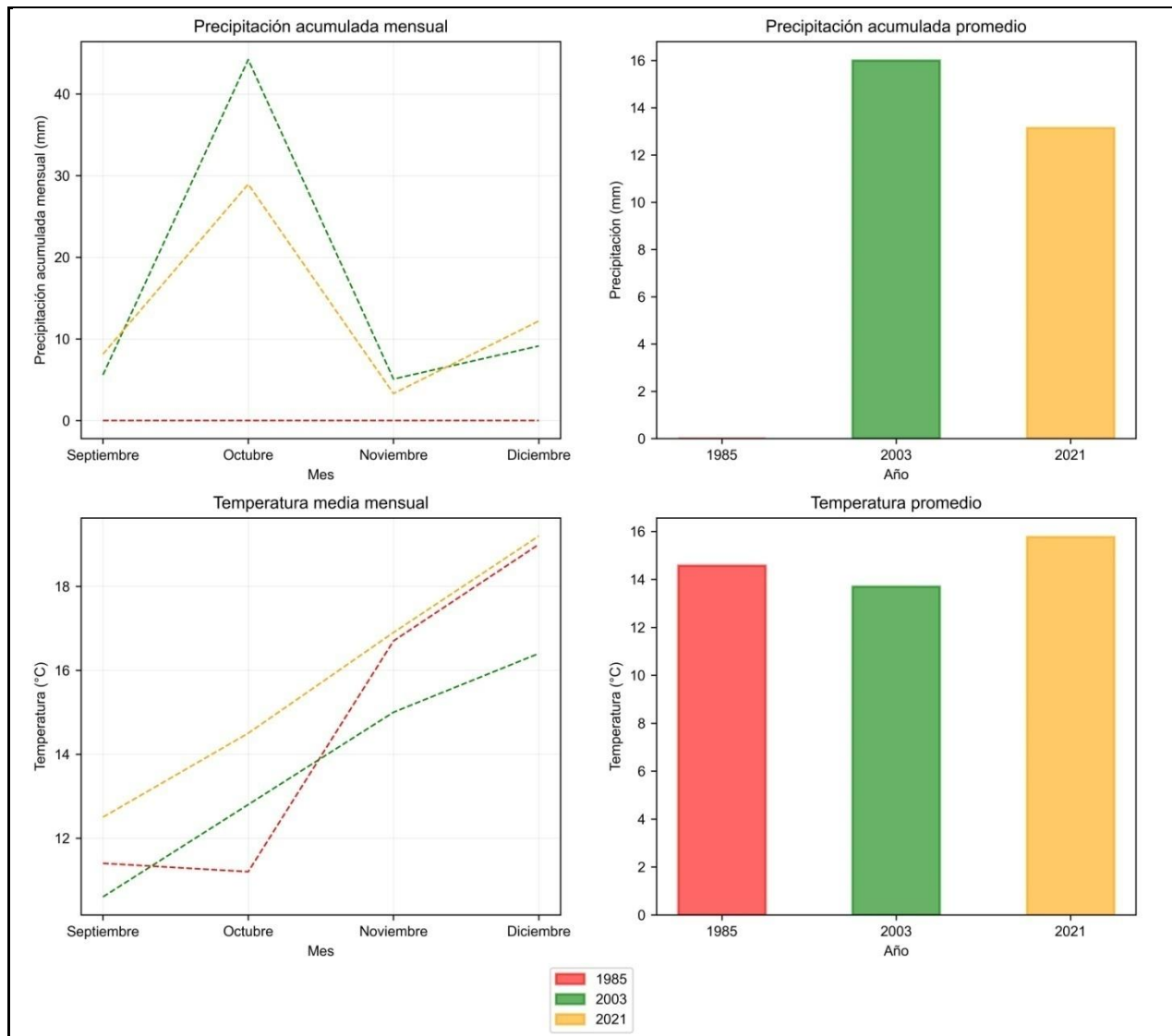
Año	Mes	T° media mensual (°C)	PP acumulada mensual (mm)
1985	Septiembre	11.4	0
	Octubre	11.2	0
	Noviembre	16.7	0
	Diciembre	19	0



Año	Mes	T° media mensual (°C)	PP acumulada mensual (mm)
2003	Septiembre	10.6	5.59
	Octubre	12.8	44.21
	Noviembre	15	5.08
	Diciembre	16.4	9.13
2021	Septiembre	12.5	8.13
	Octubre	14.5	28.95
	Noviembre	16.9	3.3
	Diciembre	19.2	12.19

En relación con los datos climáticos, en líneas generales se observa que el año 2003 constituye el año más frío y más húmedo, mientras que los años 1985 y 2021 presentan patrones climáticos similares, constituyendo años más cálidos y secos (Figura 15). Adicionalmente, se puede observar que:

- Los registros del año 1985 indican que no llovió mientras que, en términos de temperatura, se registró un valor promedio de 14.60 °C.
- El año 2003 registró los mayores valores de precipitación, con un valor acumulado de 64.01 mm y un promedio mensual de 16.00 mm. En cuanto a temperatura, registró un valor promedio de 13.70 °C.
- El año 2021 presentó un valor de precipitación acumulada de 52.57 mm, con un promedio mensual de 13.14 mm. Adicionalmente, registró un valor promedio de temperatura de 15.80 °C, el cual lo hace el más cálido entre los tres.
- El mes de octubre resulta ser el mes más lluvioso tanto para el año 2003 como para el 2021.
- Para los años 2003 y 2021, septiembre resulta ser el mes más frío mientras que, en el año 1985, octubre muestra el menor valor de temperatura.
- Para los tres años, diciembre resulta ser el mes más cálido.



**Figura 15.** Datos climáticos para los últimos cuatro meses de cada año anterior a la toma de las imágenes empleadas.

En relación con la caracterización geológica y geomorfológica, se puede observar que las locaciones y caminos estudiados se apoyan sobre cubiertas sedimentarias dominadas principalmente por granulometrías psefíticas y psamíticas gruesas a medianas y se ubican en sectores geomorfológicos correspondientes principalmente a geoformas fluviales, acompañadas por zonas de pedimentos de flanco y planicies cubiertas de grava (Meseta Espinosa).

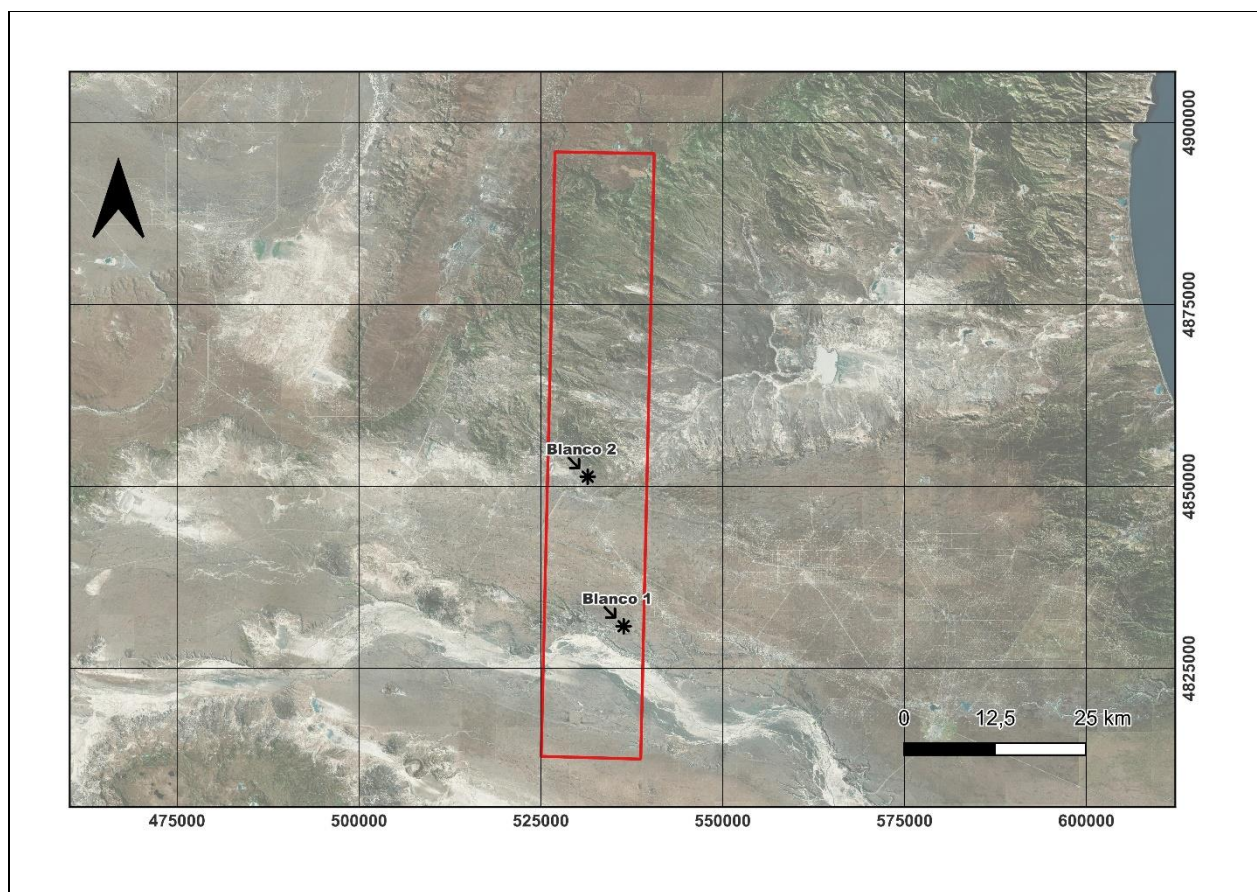
A partir de los valores extraídos de dos blancos definidos (Tabla 5; Figura 16), los cuales abarcan un área de 900 m<sup>2</sup> (un píxel), se puede observar que, para ambos



sectores, se mantiene la tendencia observada con anterioridad, donde los valores del año 2004 resultan ser los mayores. A su vez, en el caso del sector sur, el valor de NDVI del año 1986 está por encima del valor correspondiente al año 2022, dándose la situación inversa en el sector centro. En relación con esto, la media de los blancos resulta ser consistente con las medias de las locaciones y caminos evaluados anteriormente.

**Tabla 5.** Valores de NDVI de los blancos seleccionados.

Blanco	Sector	NDVI 1986	NDVI 2004	NDVI 2022
1	Sur	0.03013	0.06385	0.02247
2	Centro	0.01298	0.05359	0.02799
<b>Promedio</b>		0.021555	0.05872	0.02523

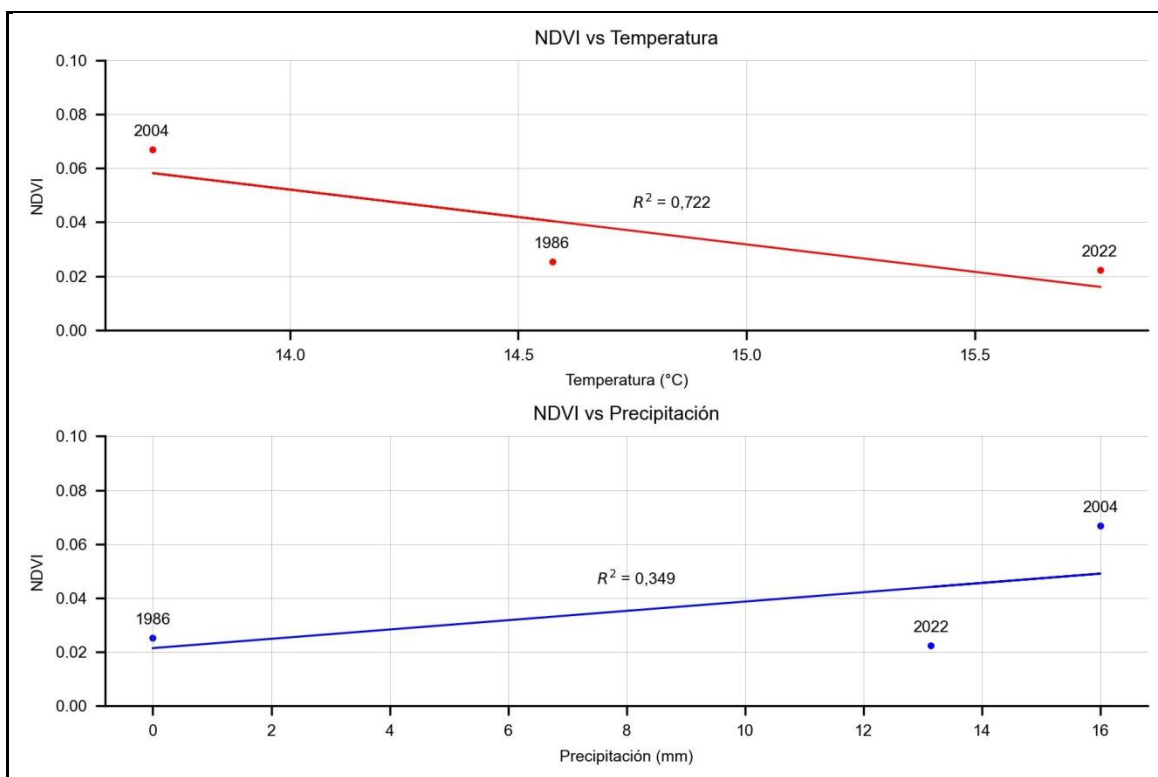


**Figura 16.** Ubicación de los blancos definidos.



Finalmente, se graficaron los valores de NDVI promedio de cada serie de tiempo en función de los valores promedio de temperatura y precipitación acumulada de los últimos cuatro meses del año anterior.

Si bien se deben tener en cuenta las limitaciones de los datos, está información constituye una primera aproximación que permite observar que la relación entre NDVI y la temperatura resulta ser inversamente proporcional, mientras que la relación entre NDVI y la precipitación es directamente proporcional (Figura 17), de acuerdo con los datos del 2003 y 2021, ya que los registros del año 1985 indican que no llovió. La relación inversa indica que los valores de NDVI serán mayores a medida que la temperatura disminuya mientras que la relación directa revela que los valores de NDVI serán mayores a medida que aumenten las precipitaciones.



**Figura 17.** Correlación entre NDVI y las variables climáticas.

De acuerdo con los resultados presentados previamente, para la escala de trabajo y la resolución de las imágenes empleadas, se puede decir que los valores obtenidos correspondientes al índice vegetal no indican afectación ambiental como consecuencia de las actividades hidrocarburíferas desarrolladas en la zona de estudio.



Por el contrario, los valores resultan ser semejantes a los de fondo, tomados en las zonas consideradas como blancos, observándose variaciones consistentes vinculadas con las características climáticas correspondientes a los últimos cuatro meses previos a la toma de las imágenes.

## 7. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

El presente informe reviste el carácter de Trabajo Final Integrador y ha tenido como objetivo presentar el desarrollo de un aporte metodológico inicial para el análisis de la posible afectación ambiental en zonas que han experimentado o experimentan el desarrollo de actividades vinculadas al sector de exploración y desarrollo de hidrocarburos.

La metodología utilizada consiste en el análisis ambiental a partir de imágenes *Landsat* de diferentes años, el desarrollo de *scripts* en el lenguaje *Python* para la automatización del procesamiento de las imágenes y la ejecución de operaciones de álgebra de bandas para el cálculo de NDVI, en función de la radiación emitida por la vegetación en el rango del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo cercano y rojo.

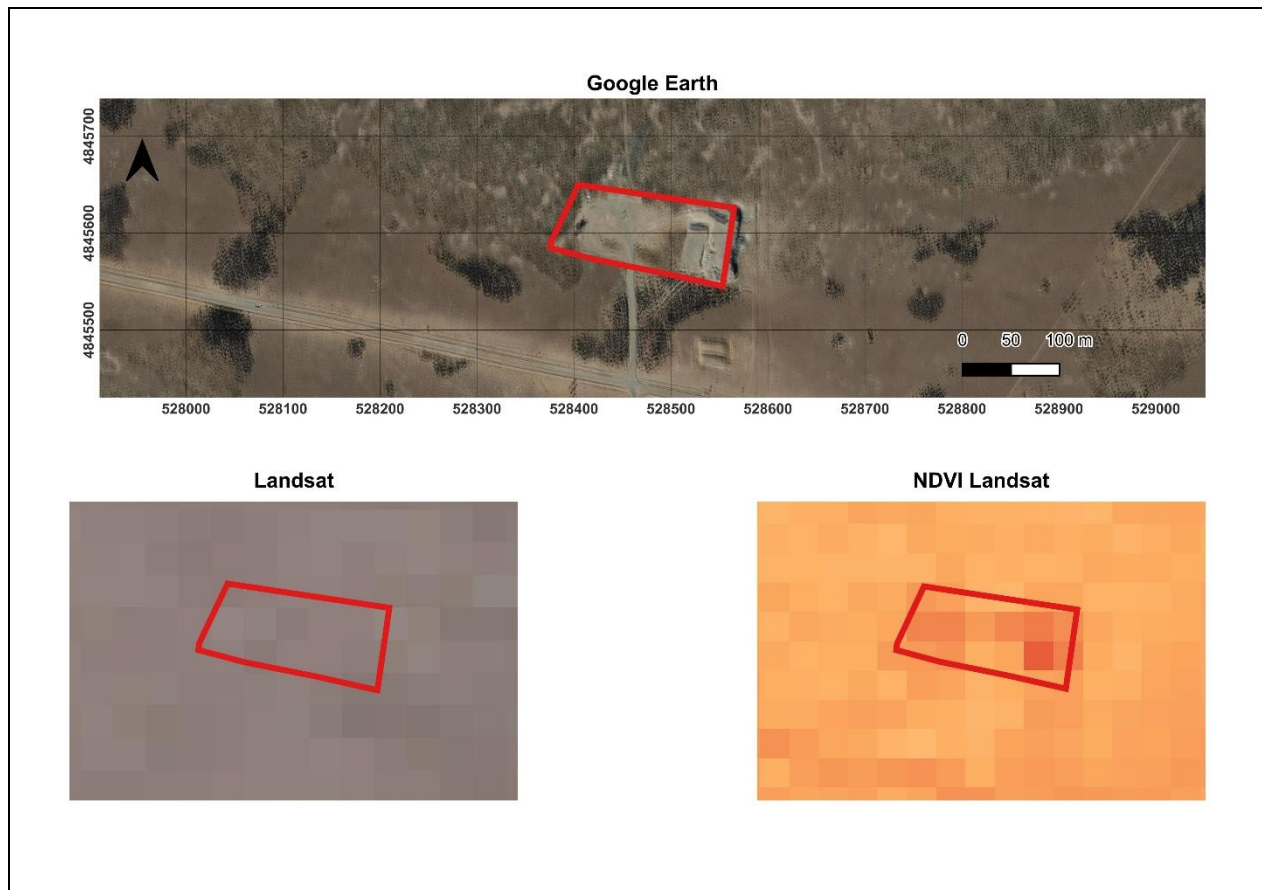
El área estudiada se encuentra en la zona central de la cuenca del Golfo de San Jorge y se caracteriza por ser una zona de estrés hídrico, ya que los valores de NDVI obtenidos se encuentran comprendidos en el rango que caracteriza estas regiones ( $\leq 0.1 - 0.3$ ). En esta área, se digitalizaron 15 polígonos correspondientes a locaciones y caminos ubicados en diferentes áreas de actividad petrolera. En función de la información extraída y presentada previamente, se puede observar que los mayores valores de NDVI correspondientes al año 2004 son significativamente diferentes a los valores de los restantes años analizados (1986 y 2022). A partir de análisis estadísticos, junto a información referente tanto a temperaturas y precipitaciones como a rasgos geológicos y geomorfológicos, se puede asumir que las diferencias en los valores del índice analizado se deben principalmente a las condiciones climáticas acaecidas durante los meses previos a la toma de la imagen. En tal sentido, los valores del año 2004 se deben a que en los últimos meses del año previo se dieron las condiciones



más húmedas y frías. Por otra parte, las características litológicas y geomorfológicas de la zona de estudio dan lugar a la mejor infiltración del agua y, por lo tanto, favorecen el incremento de los valores del mencionado índice. Adicionalmente, los valores de NDVI para los blancos analizados son consistentes con los calculados para los 15 polígonos digitalizados, con máximos para el año 2004.

A partir de la metodología presentada, se puede ver que la actividad petrolera desplegada a lo largo de la zona de estudio no influye en alto grado en términos ambientales, sino que los cambios temporales se deben a la combinación de mejores condiciones climáticas junto a las características del medio natural, al menos para la escala y resolución de trabajo utilizadas. Si bien los resultados no fueron concluyentes en cuanto a la relación con la actividad hidrocarburífera, ello no invalida la propuesta sino que pone en evidencia la necesidad de complementar la información remota con datos de mayor resolución o de otra naturaleza. En ese sentido, el estudio abre la puerta a futuras investigaciones que integren imágenes satelitales de más alta resolución y variables asociadas a la actividad hidrocarburífera, fortaleciendo la correlación entre indicadores ambientales y productivos.

En tal sentido, existen ciertas limitantes de la metodología a tener en cuenta para el análisis, como son la resolución espacial y el mismo índice NDVI. En el primer caso, se debe tener en cuenta que la resolución utilizada (30 m) asume un área de 900 m<sup>2</sup> con igual valor de NDVI, lo cual genera pérdida de detalle, debido a que muchas de las afectaciones ambientales de la actividad hidrocarburífera (locaciones, caminos, derrames, compactación del suelo y pérdida de vegetación puntual, entre otros) ocurren en superficies pequeñas en relación con el tamaño del píxel utilizado y no se pueden llegar a discriminar correctamente. Esta limitación metodológica se hace evidente al comparar un mismo sector de la zona de estudio en imágenes Landsat con imágenes de alta resolución disponibles en *Google Earth*. Mientras que en la escala Landsat un píxel abarca superficies extensas que integran distintos elementos del terreno, en *Google Earth* se observan con claridad las locaciones, caminos secundarios y áreas de vegetación degradada, que quedan diluidas dentro de un único valor de píxel en Landsat (Figura 18).



**Figura 18.** Comparación de resoluciones espaciales entre imágenes de *Google Earth* y la misión Landsat.

Este contraste refuerza la idea acerca de la necesidad de complementar el análisis con imágenes de mayor resolución espacial (como Sentinel-2 o plataformas comerciales) y con variables auxiliares relacionadas a la actividad hidrocarburífera. De esta manera, el aporte metodológico desarrollado en este trabajo constituye un punto de partida replicable y escalable, que abre la posibilidad a futuras investigaciones capaces de integrar información satelital más precisa y datos adicionales de campo o de producción, con el fin de lograr una evaluación ambiental más robusta.

En el caso del índice empleado, si bien indica variaciones en la salud de la vegetación y constituye un buen indicador de cambios en las condiciones ambientales, climáticas y de cobertura de una región, el mismo puede sufrir distorsiones en los valores de análisis cuando se aplica a zonas donde la vegetación se encuentra sobre suelos expuestos como el área de estudio, ya que factores como la temperatura o la humedad pueden ejercer influencia en las bandas de trabajo analizadas y, por lo tanto,



en los resultados ofrecidos por el indicador. En tal sentido, la combinación con otros índices, por ejemplo el índice de vegetación ajustado al suelo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI), el cual muestra una ligera variante respecto a la fórmula tradicional del NDVI, intenta evitar esta influencia del suelo sobre los resultados, añadiendo un factor adicional L en la ecuación del NDVI, lo cual permitirá trabajar en escenarios donde el desarrollo vegetal resulta incipiente.

Si bien los resultados para la zona elegida no fueron los esperados en un principio, es decir, no existen diferencias significativas, para la escala de trabajo y la resolución empleada, entre las zonas antrópicas y las zonas naturales tomadas como blanco (la variación del índice no se vincula directamente con la actividad petrolera sino con cuestiones de variabilidad climática), se observa que la metodología presentada resulta sensible a cambios en cuanto a la densidad y salud de la vegetación. Emplear imágenes de mejor resolución espacial, como se menciona previamente, aumentar la temporalidad entre las imágenes y aplicar la técnica a zonas con características climáticas diferentes a las del área de estudio, permitiría realizar o tener una mejor cuantificación de las variaciones del índice y establecer una relación más ajustada con las actividades antrópicas desarrolladas, entre ellas, la hidrocarburífera.

En tal sentido, la metodología permitiría analizar y monitorear la evolución de la vegetación en zonas de infraestructuras abandonadas, tales como caminos, picadas sísmicas, locaciones o antiguos emplazamientos de plantas de tratamiento y baterías y, de esta manera, se podrían implementar acciones que favorezcan la evolución florística de las mismas, para que sea consistente con la de las zonas no afectadas por la industria.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, W. A., Ahmed, M. A., & Al-Sharia, G. H. (2017). Using normalized difference vegetation index (NDVI) to identify hydrocarbon seepage in Kifl Oil Field and adjacent areas South of Iraq. *Journal of environment and earth science*, 7(1), 16.
- Belloso, E. 1990. Formación Chenque: Registro de la transgresión patagoniana (Terciario medio) de la Cuenca del Golfo de San Jorge, Argentina. Actas 11° Congreso Geológico Argentino, 2: 57-60.
- Béros, C., Césari, O., y Simeoni, A. 1988. Geología y Geomorfología del Noreste de Santa Cruz. Tomo II: Geología del Plio-Cuaternario, Geomorfología. Convenio de Cooperación Horizontal, Consejo Federal de Inversiones – Universidad Nacional de la Patagonia. Informe final, Inédito. Comodoro Rivadavia.
- Cobos, J., y Panza, J. L. 2001. Hoja Geológica 4769-I El Pluma, escala 1:250.000, provincia de Santa Cruz. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 319: 1-59, Buenos Aires.
- Egobueze, F. E., Rowland, E. D., & Ebizimo, D. S. (2022). Multispectral imagery for detection and monitoring of vegetation affected by oil spills and migration pattern in Niger Delta Region, Nigeria. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 15(1), 447-458.
- Hassan, R. A., & Al-Shamma, A. (2019). Environmental change detection using remote sensing and gis techniques in the area around al-ahdeb oil field, wasit governorate, iraq. *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*, 15(1), 123-133.
- Martínez, H., Dal Molín, C., Castro Godoy, S., Quintón Piegas Luna, F., Marengo, H., Dzendoletas, A., Pezzuchi, H., Parisi, C., Panza, J. L. 2020. Hoja Geológica 4769-II, Colonia Las Heras y Hoja Geológica 4766-I, Bahía Lángara. Provincia de Santa Cruz. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 426, 66 pp. Buenos Aires.
- Nullo, F. E., y Combina, A. M. 2002. Sedimentitas terciarias continentales. En Haller, M. (Ed.): Geología y Recursos Naturales de la provincia de Santa Cruz. Relatorio del 15° Congreso Geológico Argentino, I-16: 245-258, El Calafate.



Panza, J. L. (2002). La cubierta detrítica del Cenozoico superior. En Haller, M. (Ed.): Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz, Relatorio del 15° Congreso Geológico Argentino, I-17: 259-284, El Calafate.