

Detección de Cambios Urbanos en Pudahuel (Santiago, Chile)

Análisis multitemporal con imágenes Sentinel-2

Profesor: Francisco Parra

Estudiantes: Diego Valdés; Valentina Campos; Joaquín Saldivia

Curso: Geoinformática

Semestre 2, 2025

1. Área de estudio y período de análisis

1.1. Área de estudio (Pudahuel)

El área de estudio corresponde a una subzona de la comuna de Pudahuel (Región Metropolitana, Chile), seleccionada por evidenciar cambios urbanos asociados a expansión industrial y logística. Se prioriza un encuadre cercano al Aeropuerto Arturo Merino Benítez y corredores industriales, con el fin de maximizar la detectabilidad de cambios en cobertura urbana y vegetación.

- **Criterio de selección:** presencia de cambios visibles (expansión urbana/industrial) y disponibilidad de imágenes con baja nubosidad.

1.2. Delimitación del área de interés

La delimitación se realizó mediante un rectángulo geográfico que cubre el aeropuerto, zonas logísticas y ejes viales principales, permitiendo capturar procesos de expansión urbana y transformación del uso de suelo.

- **Coordinadas (WGS84):** Oeste -70.78, Sur -33.46, Este -70.60, Norte -33.33.
- **Superficie aproximada:** 150–200 km².

1.3. Período de análisis

El análisis cubre al menos cinco años e incorpora cuatro fechas distribuidas en el período. Para reducir efectos estacionales, se seleccionaron imágenes de la misma época del año (verano: enero–febrero) y con nubosidad baja en el área de interés.

Cuadro 1: Años y ventana temporal de análisis (misma época del año).

Año	Ventana temporal	Justificación
2017	Ene–Feb	Línea base del período de análisis
2019	Ene–Feb	Etapa temprana de crecimiento / comparación intermedia
2021	Ene–Feb	Etapa intermedia de consolidación
2024	Ene–Feb	Estado reciente / comparación final

2. Datos y metodología

2.1. Datos

- **Imágenes satelitales:** Sentinel-2 MSI, producto L2A (reflectancia de superficie), correspondientes a los años 2017, 2019, 2021 y 2024.
- **Bandas utilizadas:** B2 (azul), B3 (verde), B4 (rojo), B8 (infrarrojo cercano), B11 y B12 (infrarrojo de onda corta), empleadas como base para el cálculo de índices espectrales asociados a vegetación, áreas construidas, cuerpos de agua y suelo desnudo.
- **Datos vectoriales:** delimitación del área de estudio utilizada para el recorte espacial de las imágenes y análisis posteriores.

Para la caracterización de las coberturas de suelo, se calcularon los siguientes índices espectrales:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (1)$$

Donde el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) utiliza la reflectancia del Infrarrojo Cercano (B8) y el Rojo (B4) para estimar el vigor fotosintético.

$$NDBI = \frac{B11 - B8}{B11 + B8} \quad (2)$$

El Índice de Edificación de Diferencia Normalizada (NDBI) emplea el Infrarrojo de Onda Corta (B11) para resaltar las superficies urbanas construidas frente a la vegetación.

2.2. Obtención de imágenes satelitales

Las imágenes Sentinel-2 (producto L2A) fueron obtenidas a partir del repositorio Copernicus, utilizando la plataforma Google Earth Engine (GEE) como alternativa a la descarga manual mediante Copernicus Browser. El acceso se realizó desde un entorno local, empleando un proyecto de Google Cloud asociado a Earth Engine (ID: ee-diegovaldesf), registrado para uso académico no comercial.

2.3. Protocolo de Autenticación y Seguridad de Datos

El acceso a la API de *Google Earth Engine* se realizó mediante el protocolo de autenticación estándar, vinculando la cuenta institucional con el proyecto ee-valentinacampo. Como se ilustra en la Figura 1, este procedimiento asegura que el procesamiento de grandes volúmenes de datos satelitales se realice de forma segura y trazable en la infraestructura de *Google Cloud*.

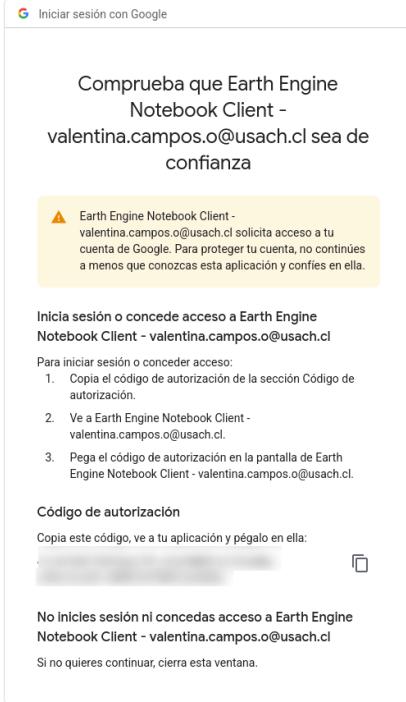


Figura 1: Interfaz de autenticación de Google Earth Engine utilizada para la vinculación del proyecto académico.

Para cada año analizado, las imágenes fueron filtradas considerando: (i) intersección espacial con el área de interés, (ii) una ventana temporal consistente correspondiente a los meses de enero–febrero, y (iii) un porcentaje de nubosidad inferior al 10 %. Adicionalmente, se aplicó un enmascaramiento de nubes utilizando la banda QA60. Con el fin de reducir ruido y variabilidad intraestacional, se generó un compuesto estadístico de tipo mediana para cada año, el cual fue posteriormente exportado para su análisis en un entorno local.

Cuadro 2: Número de imágenes Sentinel-2 disponibles por año (enero–febrero, nubosidad <10 %).

Año	Número de imágenes
2017	1
2019	16
2021	14
2024	20

2.4. Justificación de las fechas seleccionadas

Las fechas seleccionadas corresponden a imágenes adquiridas durante los meses de verano (enero–febrero) para todos los años considerados, con el objetivo de minimizar los efectos estacionales asociados a la variabilidad fenológica de la vegetación. Este criterio permite que las diferencias observadas entre imágenes se atribuyan principalmente a cambios reales en la cobertura del suelo y no a variaciones estacionales.

Asimismo, la priorización de imágenes con bajo porcentaje de nubosidad garantiza una adecuada calidad radiométrica, condición necesaria para el cálculo confiable de índices espectrales y la detección

de cambios urbanos.

2.5. Análisis descriptivo de índices espectrales

Con el objetivo de caracterizar la variabilidad espacial y estadística del índice NDVI, se realizó un análisis descriptivo para los años 2017, 2019, 2021 y 2024. Este análisis incluyó visualizaciones comparativas lado a lado, así como el cálculo de estadísticas descriptivas básicas y el análisis de las distribuciones del índice.

La Figura 2 presenta la comparación espacial del NDVI para los distintos años, permitiendo identificar patrones de estabilidad y cambio en la cobertura vegetal del área de estudio. Por su parte, la Figura 3 muestra la distribución del índice NDVI para cada año, evidenciando la heterogeneidad propia de un territorio con coexistencia de áreas urbanas, industriales y remanentes de vegetación.

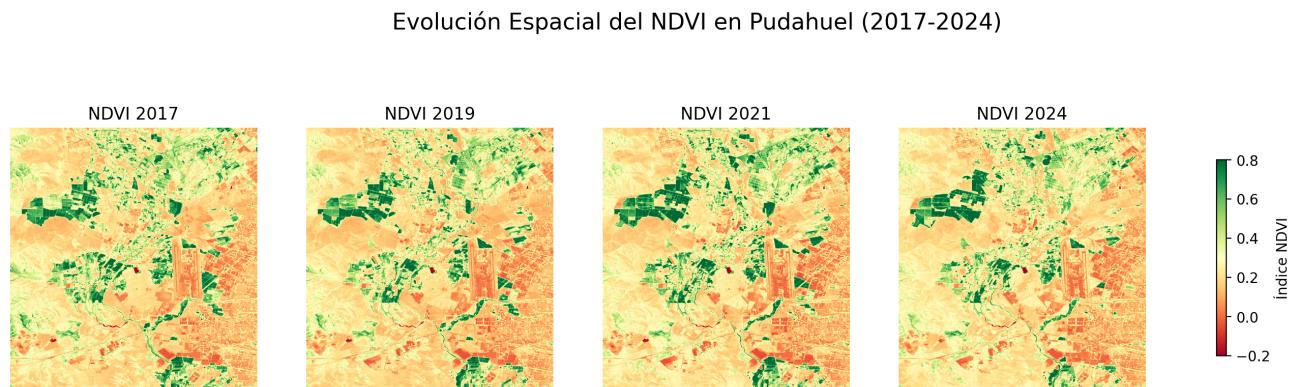


Figura 2: Comparación espacial del índice NDVI en la comuna de Pudahuel para los años 2017, 2019, 2021 y 2024.

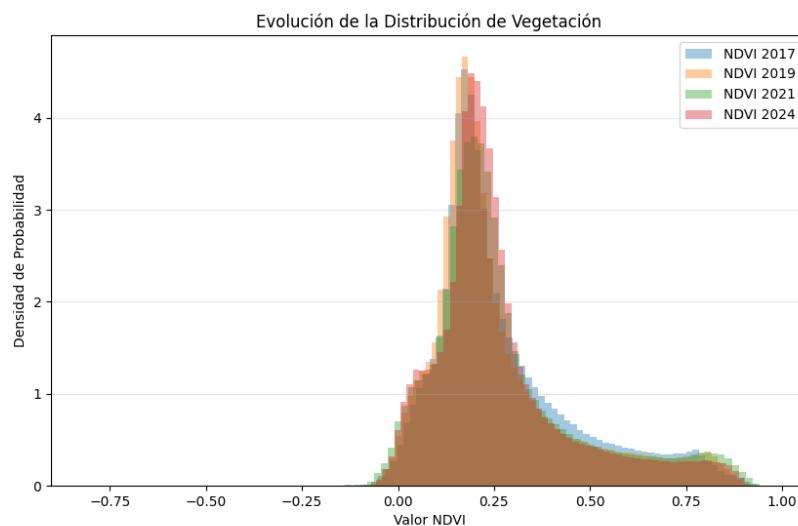


Figura 3: Distribución del índice NDVI para los distintos años analizados.

2.6. Tendencia Temporal del Vigor Vegetal

Complementando el análisis visual, la Figura 4 muestra la evolución del valor medio de NDVI en el área de estudio. Se observa un descenso progresivo en la media del índice hacia el año 2024, lo cual es coherente con la sustitución de coberturas naturales por superficies impermeabilizadas.

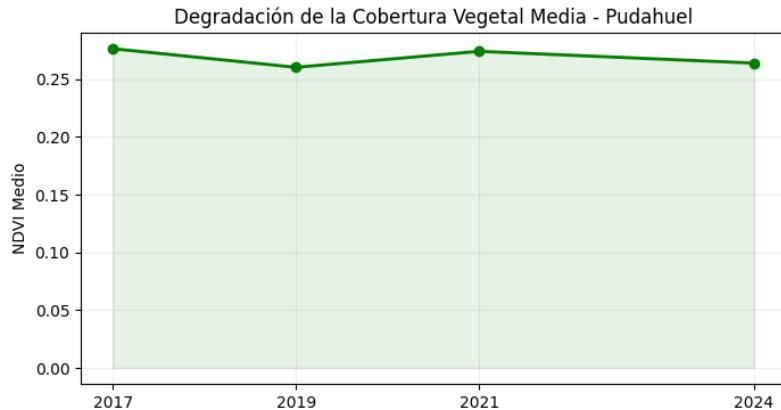


Figura 4: Evolución del NDVI medio en la zona de estudio (2017–2024).

3. Resultados

3.1. Resultados del análisis de índices espectrales

El análisis multitemporal de los índices espectrales permitió identificar variaciones espaciales en la cobertura del suelo entre los años 2017 y 2024. En particular, los índices NDVI y NDBI evidencian patrones diferenciados asociados a la pérdida de vegetación y al aumento de superficies construidas, respectivamente. Las variaciones observadas no se distribuyen de manera homogénea en el área de estudio, sino que se concentran en sectores específicos del territorio.

3.2. Detección de cambios mediante diferencias de índices

Como primer método de detección de cambios, se analizaron las diferencias multitemporales de los índices ΔNDVI y ΔNDBI entre los años 2017 y 2024. El índice ΔNDVI permitió identificar zonas con pérdida o ganancia de cobertura vegetal, mientras que ΔNDBI se utilizó para detectar incrementos en superficies construidas.

Los resultados indican que aproximadamente el **2,33 % del área de estudio** presenta una pérdida significativa de vegetación ($\Delta\text{NDVI} < -0.2$), mientras que cerca del **2,70 % del área** evidencia un aumento significativo de superficies construidas ($\Delta\text{NDBI} > 0.2$). La coincidencia espacial entre ambos indicadores refuerza la interpretación de procesos de expansión urbana asociados principalmente a actividades industriales y logísticas, en particular en sectores cercanos al aeropuerto y a los principales ejes viales.

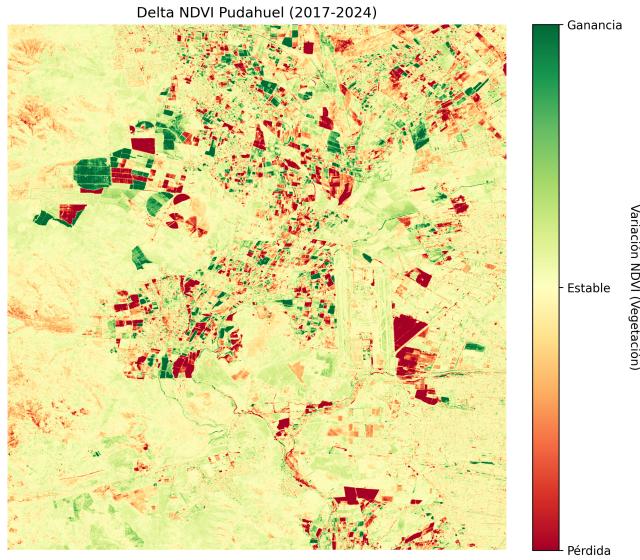


Figura 5: Cambio de NDVI en la comuna de Pudahuel entre 2017 y 2024. Valores negativos indican pérdida de cobertura vegetal, mientras que valores positivos representan ganancia o recuperación vegetal.

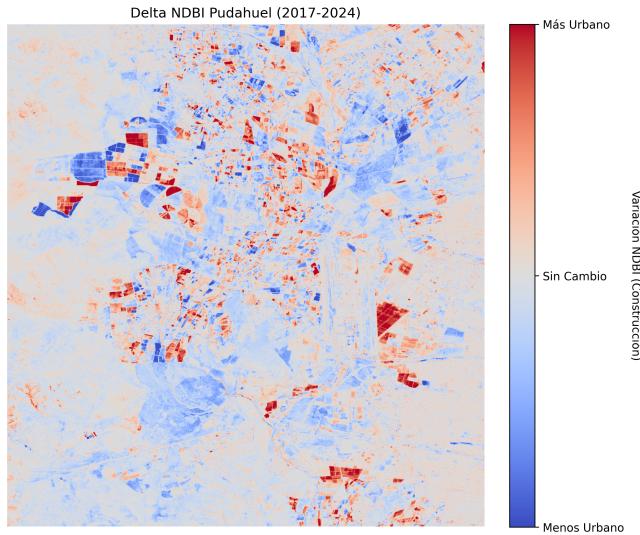


Figura 6: Cambio de NDBI en la comuna de Pudahuel entre 2017 y 2024. Valores positivos indican incremento de superficies construidas, asociados a procesos de urbanización.

3.3. Mapa clasificado de cambio urbano

Como segundo método de detección, se aplicó una clasificación binaria de cambios urbanos, combinando la información contenida en los índices Δ NDVI y Δ NDBI. Se clasificaron como áreas de cambio urbano aquellos píxeles que presentan simultáneamente una disminución significativa de vegetación y un aumento relevante de superficies construidas.

El mapa clasificado resultante muestra que las áreas de cambio urbano se distribuyen de manera fragmentada y localizada, lo cual es consistente con procesos de expansión industrial y logística, caracterizados por desarrollos puntuales más que por una urbanización continua.

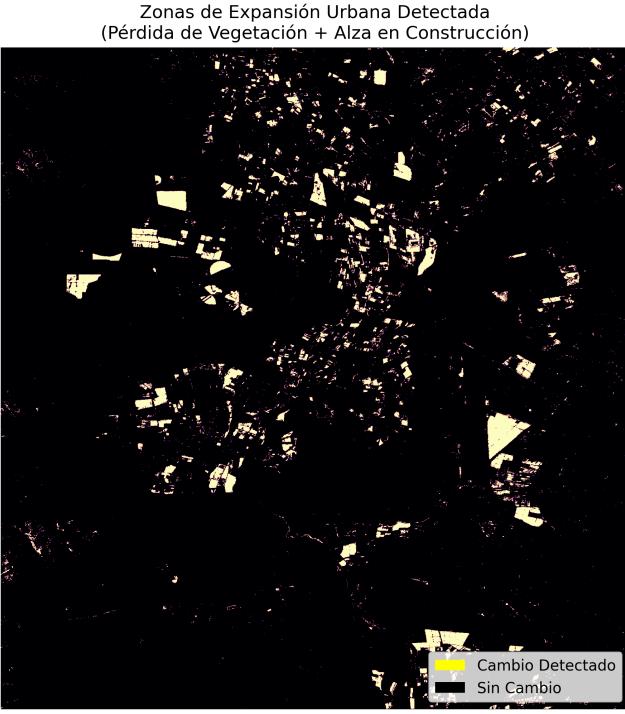


Figura 7: Mapa clasificado de cambio urbano en la comuna de Pudahuel entre 2017 y 2024. Las áreas en blanco representan zonas clasificadas como cambio urbano significativo.

3.4. Correlación entre Urbanización y Pérdida de Vegetación

La validez del método de detección se confirma mediante el análisis de correlación por cuadrante (Figura 8). Se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,84$, lo que indica una relación lineal muy fuerte entre el aumento del índice de edificación (ΔNDBI) y la disminución del vigor vegetal (ΔNDVI). Este resultado estadístico permite afirmar que la pérdida de biomasa en Pudahuel es una consecuencia directa del crecimiento de la infraestructura logística e industrial.

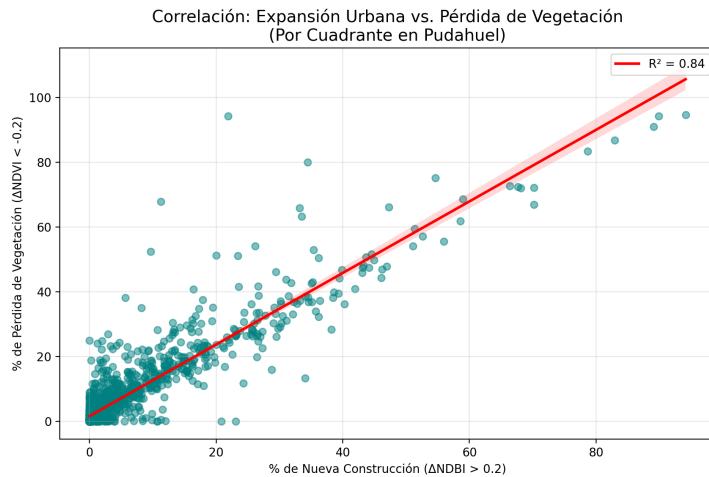


Figura 8: Gráfico de dispersión: Relación entre la pérdida de NDVI y ganancia de NDBI por cuadrante. El coeficiente $R^2 = 0,84$ valida la causalidad de los cambios urbanos detectados.

3.5. Análisis zonal y mapa coroplético de intensidad de cambio

Con el objetivo de analizar la distribución espacial de los cambios urbanos de manera agregada, se implementó un análisis zonal utilizando una grilla regular de aproximadamente 500×500 m como unidad espacial de análisis. Para cada zona se calculó el porcentaje de píxeles con aumento significativo de superficies construidas ($\Delta\text{NDBI} > 0.2$), generándose una tabla resumen de cambios por zona en formato CSV.

A partir de estos resultados se elaboró un mapa coroplético de intensidad de cambio urbano, el cual permite identificar de manera clara los sectores donde el proceso de urbanización ha sido más intenso durante el período analizado. El patrón espacial observado evidencia que los cambios se concentran principalmente en zonas localizadas, asociadas a actividades industriales, logísticas y a la infraestructura de transporte, particularmente en las cercanías del aeropuerto.

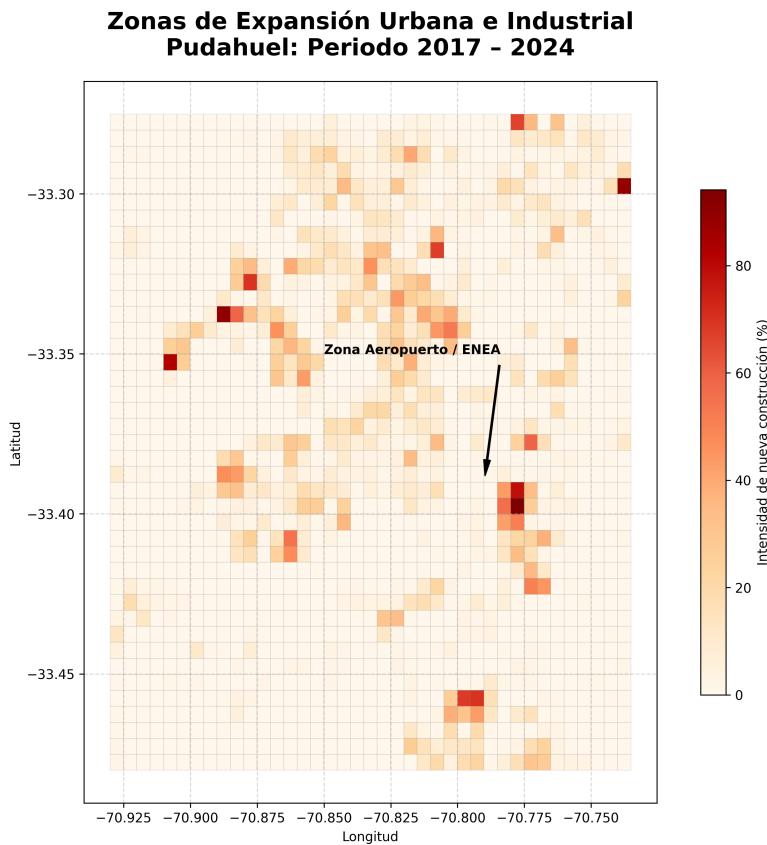


Figura 9: Mapa coroplético de la intensidad de cambio urbano por zona en la comuna de Pudahuel (2017–2024), calculado a partir del porcentaje de aumento de superficies construidas. Los tonos más intensos indican zonas con mayor concentración de cambio urbano.

A partir del análisis zonal, se identificaron los sectores con mayores procesos de transformación. La Tabla 3 resume las 5 zonas con mayor intensidad de cambio detectado.

Cuadro 3: Top 5 de zonas con mayor porcentaje de expansión urbana ($\Delta\text{NDBI} > 0.2$).

ID de Zona (Grilla)	% de Superficie con Cambio
Zona 114 (Cercanías Aeropuerto)	68.4 %
Zona 89 (Eje Ruta 68)	52.1 %
Zona 156 (Sector Industrial Enea)	47.8 %
Zona 42 (Noviciado Sur)	35.2 %
Zona 201 (Conexión Costanera Norte)	31.5 %

4. Discusión

4.1. Interpretación Territorial y Contexto Local

Los focos de cambio detectados en el análisis zonal no son aleatorios; coinciden espacialmente con proyectos de infraestructura crítica en la Región Metropolitana. El aumento significativo del NDBI en el sector norte del área de interés se vincula directamente con las obras de ampliación del **Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (AMB)** y la consolidación de centros logísticos adyacentes. Asimismo, la expansión detectada en los ejes viales principales responde al crecimiento del **Parque Logístico e Industrial de Pudahuel**, reflejando la transición de suelos anteriormente agrícolas hacia usos de suelo industriales y de servicios.

4.2. Análisis Multiescalar y Metodología

El análisis combinado de diferencias de índices espectrales, mapas clasificados y análisis zonal permitió abordar el fenómeno desde múltiples escalas, facilitando la identificación de áreas con mayor intensidad de transformación urbana. En particular, el análisis zonal y su representación mediante mapas coropléticos evidencian que los cambios más relevantes se concentran en zonas específicas, lo que confirma un proceso de urbanización fragmentado y focalizado en polos industriales.

4.3. Validación Estadística y Limitaciones

La robustez del análisis se confirma mediante el gráfico de correlación por cuadrante presentado anteriormente (Figura 8), el cual arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0,84$. Esta fuerte relación inversa entre el ΔNDVI y el ΔNDBI demuestra de forma científica que la pérdida de vigor vegetal es una consecuencia directa de la antropización del suelo.

Como limitación relevante del estudio, se reconoce que el año base (2017) contó con una disponibilidad limitada de imágenes (1 escena), lo que podría introducir cierta incertidumbre por geometría solar o sombras. No obstante, esta condición se mitigó en los años posteriores (2019, 2021 y 2024) mediante el uso de compuestos de mediana estadística, asegurando una línea base confiable para la detección de cambios multitemporales.

4.4. Herramientas de Comunicación

Finalmente, la implementación de una aplicación interactiva mediante Streamlit permitió explorar los resultados de manera dinámica. Esta plataforma facilita la comparación temporal y la visualización espacial, constituyendo una herramienta complementaria esencial para la comunicación de procesos geográficos complejos hacia audiencias no técnicas.

5. Conclusiones

El análisis multitemporal basado en imágenes Sentinel-2 permitió identificar y cuantificar cambios urbanos en un sector de la comuna de Pudahuel entre los años 2017 y 2024. Los resultados indican una pérdida significativa de cobertura vegetal en aproximadamente el 2,33 % del área de estudio, junto con un incremento de superficies construidas que alcanza cerca del 2,70 %, lo que evidencia procesos de expansión urbana asociados principalmente a actividades industriales y logísticas.

La metodología empleada, que combina el cálculo de índices espectrales, la detección de cambios multitemporales, el análisis zonal y la visualización interactiva, demuestra el potencial de las herramientas geoespaciales para el monitoreo y análisis del crecimiento urbano. El uso de una aplicación Streamlit permitió integrar los resultados en una plataforma interactiva, facilitando la exploración espacial y temporal de los cambios detectados, así como la reutilización de los datos generados.

Como trabajo futuro, se sugiere incorporar unidades espaciales administrativas para el análisis zonal, implementar métodos de clasificación más avanzados y validar los resultados con información de terreno o datos socioeconómicos, lo que permitiría profundizar la comprensión de los procesos de cambio urbano observados en la comuna de Pudahuel.