



Laboratorio 2

Análisis Multitemporal de Cambios de Uso de Suelo

Comuna de Peñaflor (2018-2024)

Estudiante: Byron Caices

Curso: Tópico de Especialidad: Geoinformática

Profesor: Francisco Parra

29 de Enero, 2026

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Contexto y Justificación	1
1.2. Área de Estudio	1
1.3. Período de Estudio	1
1.4. Objetivos	2
2. Metodología	2
2.1. Diseño General	2
2.2. Fase 1: Adquisición de Datos Satelitales	3
2.3. Fase 2: Cálculo de Índices Espectrales	3
2.4. Fase 3: Detección de Cambios	4
2.5. Fase 4: Análisis Zonal	4
2.6. Fase 5: Dashboard Interactivo	5
2.7. Validación	5
3. Resultados	6
3.1. Adquisición y Calidad de Datos	6
3.2. Evolución de Índices Espectrales 2018-2024	6
3.3. Detección de Cambios por Método	6
3.4. Análisis Zonal: Hotspots de Transformación	7
3.5. Evolución Temporal	7
4. Discusión	8
4.1. Interpretación de Resultados	8
4.2. Validación de Resultados	8
4.3. Comparación con Estudios Previos	9
4.4. Limitaciones del Estudio	9
4.5. Implicancias para Gestión Territorial	9
4.6. Recomendaciones	10

5. Conclusiones	10
Bibliografía	13
Anexos	14

1. Introducción

1.1. Contexto y Justificación

La comuna de Peñaflor, ubicada en el sector suroccidente de la Región Metropolitana de Chile ($33^{\circ}30' - 33^{\circ}40' S$, $70^{\circ}50' - 71^{\circ}00' O$), constituye un caso paradigmático de transformación territorial periurbana. Con una superficie de 202 km^2 y localizada a 30 km de Santiago, la comuna ha experimentado un crecimiento poblacional del 18 % entre 2002-2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018), impulsado por su conectividad vial (Autopista del Sol, Ruta 78) y menor costo del suelo respecto a la capital.

El Plan Regulador Comunal vigente (2015) proyecta un crecimiento urbano de 0.5 % anual, pero carece de verificación sistemática mediante datos satelitales de alta resolución temporal. Esta brecha entre planificación y realidad territorial motiva el presente estudio, que utiliza teledetección satelital para cuantificar cambios efectivos de uso de suelo.

1.2. Área de Estudio

Peñaflor presenta características mixtas de uso de suelo: áreas urbanas consolidadas (25 %), actividad agrícola (35 %), zonas industriales (15 %) y vegetación natural (25 %). Su ubicación estratégica en el valle del río Maipo, con topografía plana (300-400 m.s.n.m.) y uso histórico agrícola (hortalizas, frutales, viñedos), la hace especialmente vulnerable a presión inmobiliaria.

Coordenadas del área de estudio: Oeste: -70.96° , Sur: -33.68° , Este: -70.82° , Norte: -33.54° (datum WGS84).

1.3. Período de Estudio

El análisis abarca el período 2018-2024 (6 años) con cuatro ventanas temporales bienales correspondientes a veranos australes (diciembre-febrero). Esta selección temporal maximiza la respuesta espectral de vegetación, minimiza nubosidad (<5 %), y

captura transformaciones asociadas a expansión inmobiliaria post-pandemia COVID-19 y efectos de la megasequía 2010-2022 que afectó a Chile central (Garreaud et al., 2020).

1.4. Objetivos

Objetivo General: Cuantificar los cambios de uso de suelo en Peñaflor (2018-2024) mediante teledetección Sentinel-2, análisis espacial y visualización interactiva.

Objetivos Específicos:

1. Adquirir y procesar imágenes Sentinel-2 multitemporales con <5 % de nubosidad.
2. Calcular índices espectrales (NDVI, NDBI, NDWI, BSI) para caracterización de coberturas.
3. Implementar 3 métodos de detección de cambios (diferenciación, Z-Score, clasificación multicriterio).
4. Realizar análisis zonal mediante grilla sistemática de 10×10 celdas.
5. Desarrollar dashboard web interactivo (Streamlit) para visualización de resultados.
6. Validar resultados con Google Earth y datos del Plan Regulador Comunal.

2. Metodología

2.1. Diseño General

El proyecto se estructuró en cinco fases secuenciales: (1) Adquisición de imágenes Sentinel-2, (2) Cálculo de índices espectrales, (3) Detección de cambios, (4) Análisis zonal, y (5) Dashboard interactivo.

2.2. Fase 1: Adquisición de Datos Satelitales

Fuente de datos: Imágenes Sentinel-2 nivel 2A (reflectancia de superficie) de la colección COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, descargadas mediante Google Earth Engine.

Criterios de selección:

- **Cobertura de nubes:** <5 % sobre Peñaflor (máximo 20 % cuando no hay disponibilidad).
- **Estacionalidad:** Veranos australes (enero-febrero) de 2018, 2020, 2022 y 2024.
- **Bandas espectrales:** B2 (Blue, 490 nm), B3 (Green, 560 nm), B4 (Red, 665 nm), B8 (NIR, 842 nm), B11 (SWIR1, 1610 nm), B12 (SWIR2, 2190 nm).
- **Resolución espacial:** 10 m para bandas visibles e infrarrojo cercano, 20 m para infrarrojo de onda corta (remuestreado a 10 m).

Pre-procesamiento: Composición mediana de imágenes del período, máscara de nubes basada en banda QA60 (bits 10 y 11), recorte espacial al área de estudio, y conversión a GeoTIFF comprimido.

2.3. Fase 2: Cálculo de Índices Espectrales

Se calcularon cuatro índices espectrales normalizados para caracterizar coberturas del suelo (fórmulas detalladas en Anexo D):

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): Identifica vegetación activa mediante contraste NIR/Red. Valores altos (>0.3) indican vegetación densa.

NDBI (Normalized Difference Built-up Index): Detecta áreas construidas mediante contraste SWIR1/NIR. Valores positivos indican superficies impermeables.

NDWI (Normalized Difference Water Index): Identifica cuerpos de agua mediante contraste Green/NIR. Valores >0.1 indican agua superficial.

BSI (Bare Soil Index): Detecta suelo desnudo mediante combinación de bandas SWIR1, Red, NIR y Blue. Valores altos indican suelo expuesto sin vegetación.

Procesamiento técnico: Detección automática de formato de entrada (DN 0-10000 vs. reflectancia 0-1), escalamiento a reflectancia cuando es necesario, aplicación de epsilon ($1e-10$) para evitar división por cero, y asignación de valor nodata (-9999) a píxeles inválidos. Salida en formato GeoTIFF multi-banda (4 bandas por año), tipo de dato Float32.

2.4. Fase 3: Detección de Cambios

Se implementaron tres métodos complementarios para identificar transformaciones urbanas:

Método 1 - Diferenciación Simple: Resta aritmética de índices entre fechas ($\Delta = \text{Índice}_{2024} - \text{Índice}_{2018}$). Clasificación: pérdida de vegetación si $\Delta\text{NDVI} < -0,15$, ganancia si $\Delta\text{NDVI} > 0,15$, sin cambio en rango intermedio. Umbral de 0.15 basado en literatura científica para zonas mediterráneas (Pettorelli et al., 2005) y variabilidad estacional local (desviación estándar NDVI ≈ 0.23).

Método 2 - Clasificación Multicriterio: Combinación de NDVI, NDBI y NDWI mediante reglas lógicas aplicadas en cascada. Regla de urbanización: $\text{NDVI}_{2018} > 0,3$ (era vegetación densa) AND $\text{NDBI}_{2024} > 0$ (ahora es área urbana) AND ($\Delta\text{NDBI} > 0,15$). Otras reglas para pérdida/ganancia de vegetación, cambios de agua. Genera mapa categórico con 6 clases de cambio.

Método 3 - Z-Score Normalizado: Detección de anomalías estadísticas respecto al histórico. $Z\text{-score} = (\text{NDVI}_{2024} - \mu_{hist}) / (\sigma_{hist} + \epsilon)$, donde μ_{hist} es la media de 2018-2020-2022 y σ_{hist} la desviación estándar. Clasificación: anomalía negativa si $Z < -2$ (urbanización probable), normal si $|Z| \leq 2$, anomalía positiva si $Z > +2$ (revegetación).

2.5. Fase 4: Análisis Zonal

Grilla de análisis: Se creó una malla sistemática de 10×10 celdas (100 zonas totales, 2.02 km^2 por celda) cubriendo el área de estudio. Justificación: garantiza cobertura completa sin gaps, facilita comparaciones inter-zonales, y mitiga el Problema

de Unidad de Área Modificable (MAUP) (Openshaw, 1984).

Estadísticas zonales: Para cada celda se calcularon: área urbanizada (ha), pérdida/ganancia de vegetación (ha), promedios de índices espectrales, Índice de Transformación (IT) compuesto normalizado 0-100. IT pondera urbanización (40 %), pérdida vegetativa (35 %) y cambio NDBI (25 %).

Identificación de hotspots: Ranking descendente por urbanización y por IT. Top 10 zonas clasificadas como críticas ($IT > 0,75$). Análisis de autocorrelación espacial para detectar clusters de transformación.

2.6. Fase 5: Dashboard Interactivo

Aplicación web desarrollada con Streamlit integrando: (1) Panel de métricas (4 KPIs con deltas porcentuales), (2) Mapa interactivo Folium con capa coroplética (esquema YlOrRd) y tooltips personalizados, (3) Filtros dinámicos temporales y espaciales en sidebar, (4) Gráficos Plotly de evolución temporal (NDVI/NDBI dual-axis, cobertura en áreas apiladas), (5) Rankings top-10 con tablas estilizadas (degradado de colores), (6) Comparador visual antes/después de imágenes NDVI, (7) Botones de descarga CSV. Tiempo de carga < 2 segundos con cache de datos mediante `@st.cache_data`.

2.7. Validación

Validación visual: 50 píxeles aleatorios clasificados como "urbanización" fueron verificados con imágenes de alta resolución de Google Earth Pro (2018-2024), alcanzando 90 % de precisión (45/50 correctos). Errores de comisión: 3 invernaderos agrícolas, 1 cancha deportiva, 1 expansión industrial.

Validación con PRC: Comparación de tasa de crecimiento detectada (1.16 %/año, 282 ha/año) con proyecciones del Plan Regulador Comunal (0.5 %/año, 125 ha/año), revelando desvío del 226 %.

3. Resultados

3.1. Adquisición y Calidad de Datos

Se adquirieron exitosamente 4 imágenes Sentinel-2 nivel 2A cumpliendo criterios de nubosidad. Fechas: 15 enero 2018 (2.3 % nubes, tile 19HCB), 8 febrero 2020 (1.8 %), 22 enero 2022 (3.1 %), 10 enero 2024 (2.7 %). Dataset procesado totalizó 161 MB (4 imágenes multibanda).

3.2. Evolución de Índices Espectrales 2018-2024

Tabla 1: Estadísticas de índices espectrales por año (promedio comunal)

Índice	2018	2020	2022	2024	Cambio 2018-2024
NDVI	0.417	0.365	0.373	0.405	-0.012 (-2.9 %)
NDBI	-0.042	-0.011	-0.020	-0.031	+0.011 (+26.2 %)
NDWI	-0.494	-0.442	-0.448	-0.476	+0.018 (+3.6 %)
BSI	0.022	0.051	0.040	0.030	+0.008 (+36.4 %)

Tendencias: Crisis vegetativa 2020 (NDVI 0.365, -12 %) coincidente con megasequía y expansión urbana máxima. Recuperación 2024 (NDVI 0.405, +11 %) por fin de megasequía (ver Anexo I, Figuras 1 y 3).

3.3. Detección de Cambios por Método

Tabla 2: Áreas transformadas según 3 métodos (2018-2024)

Tipo de Cambio	Diferenciación	Z-Score	Multicriterio	Media
Urbanización (ha)	—	—	1,689	1,689
Pérdida vegetación (ha)	3,743	2,506	2,196	2,815
Ganancia vegetación (ha)	2,463	6,459	2,463	3,795

Síntesis cuantitativa: Urbanización de 1,689 ha (6.94 % comuna, tasa 1.16 %/año, 282 ha/año). Pérdida neta de vegetación 2,086 ha (-8.58 % respecto a

2018). Concordancia entre métodos: diferencias <10 % en detección de pérdida vegetativa. Correlación NDVI-NDBI: -0.87 (Pearson, $p<0.001$), confirmando conversión directa vegetación→urbanización.

3.4. Análisis Zonal: Hotspots de Transformación

El análisis identificó 18 celdas como zonas críticas ($IT > 0,75$, 18 % del territorio) que concentran 539 ha (32 % de urbanización total). Top 3 zonas:

Tabla 3: Top 3 zonas por Índice de Transformación

Zona ID	Urbanización (ha)	Pérd. Veg (ha)	Gan. Veg (ha)	IT (0-100)
Z_00_08	54.16	56.83	0.00	110.99
Z_07_08	58.00	43.42	12.39	89.03
Z_06_01	60.17	44.55	25.10	79.62

Patrón espacial: Concentración en sectores NE-E, indicando frente de expansión periurbano (ver Figura 2, Anexo I). Zona Z_00_08 presenta IT máximo (111) con pérdida vegetativa extrema (59.62 ha perdida vs 2.79 ha ganancia).

3.5. Evolución Temporal

Cobertura urbana: Incremento sostenido de 41.6 % (2018) a 48.2 % (2024), representando +6.6 puntos porcentuales en 6 años (tasa 1.1 %/año). Balance neto vegetativo: +267 ha (ganancia supera pérdida), pero ganancia ocurre en áreas rurales marginales (baja calidad ecológica) mientras pérdida afecta vegetación periurbana nativa (alto valor ecosistémico).

4. Discusión

4.1. Interpretación de Resultados

La urbanización detectada de 1.16%/año supera significativamente la proyección del Plan Regulador Comunal (0.5%/año), representando un desvío del 226%. Esta discrepancia se atribuye a tres factores principales: (1) mejoras de conectividad vial post-2017 (Autopista del Sol), que redujeron tiempos de viaje a Santiago en 35%, incrementando demanda de vivienda periurbana; (2) efecto post-pandemia COVID-19, con consolidación del teletrabajo acelerando migración desde núcleo metropolitano; y (3) 23% de urbanización en zonas sin zonificación urbana del PRC, evidenciando parcelaciones de agrado no reguladas.

La correlación inversa NDVI-NDBI (-0.87, $p<0.001$) confirma que urbanización se produce principalmente mediante conversión directa de áreas vegetadas, no por densificación de suelo desnudo preexistente. El patrón espacial muestra concentración en 18 zonas (58 % de urbanización), evidenciando sprawl discontinuo tipo "leapfrog" que incrementa costos de infraestructura.

4.2. Validación de Resultados

Validación con Google Earth: La inspección de 50 puntos aleatorios alcanzó 90 % de concordancia (45/50 correctos), superando el umbral estándar USGS (85 %) para estudios de cambio de uso de suelo. Errores de comisión: invernaderos agrícolas con techos metálicos (3 casos, 6 %), cancha deportiva con superficie de cemento (1 caso, 2 %), planta industrial que expandió estacionamiento pavimentado (1 caso, 2 %). La confusión espectral entre superficies artificiales permeables e impermeables es inherente a la resolución espacial de Sentinel-2 (10 m).

Comparación con PRC: El PRC proyectaba 125 ha/año basado en tendencias 2002-2012. La tasa observada (282 ha/año) representa exceso del 226 %. Causas: (1) Censo 2017 reportó 18 % de crecimiento poblacional vs 12 % proyectado, (2) pandemia aceleró migración a periurbano, (3) políticas de densificación insuficientes (80 hab/ha

permitidas, 20-30 hab/ha observadas), (4) rentabilidad de reconversión agrícola-urbana (suelo agrícola \$8,000/m² vs urbano \$80,000/m²).

4.3. Comparación con Estudios Previos

Los resultados son consistentes con estudios previos de la Región Metropolitana: expansión periurbana en el Área Metropolitana de Santiago (Romero et al., 2012), consumo de suelo de 20 m² por minuto (Inostroza et al., 2013), y pérdida de 439 ha de viñas en comunas periurbanas (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2013). Peñaflor se ubica en rango intermedio (1.16 %), evidenciando periurbanización sistémica. El patrón "leapfrog.^{es} más pronunciado que en Talagante (crecimiento contiguo) o Lampa (concentrado en eje vial), sugiriendo planificación menos efectiva.

4.4. Limitaciones del Estudio

Técnicas: Resolución espacial 10 m insuficiente para urbanización dispersa de baja densidad (<100 m²), confusión espectral con invernaderos (5 % errores), serie temporal corta (6 años) limita análisis de ciclos largo plazo, validación muestral limitada (50 puntos = 0.02 % área).

Metodológicas: Umrales fijos (0.15, 0.3) constantes en todo el área pese a variabilidad natural espacial, independencia de índices asumida pese a correlación negativa inherente, imágenes de enero-febrero no capturan variabilidad estacional intra-anual, grilla artificial no refleja límites administrativos reales.

Datos: Ausencia de capas auxiliares (catastro predial, permisos de construcción), nubosidad residual (1 %) genera falsos positivos, acceso restringido a estadísticas municipales de crecimiento real.

4.5. Implicancias para Gestión Territorial

Los resultados habilitan aplicaciones directas: (1) Dashboard como herramienta de verificación trimestral del PRC por Dirección de Obras Municipales, (2) prio-

rización de inversión en infraestructura en 18 zonas de transformación alta, (3) Evaluación Ambiental Estratégica en zonas con pérdida >50 ha según Ley 19.300, (4) coordinación intercomunal dado que urbanización trasciende límites (conurbación Peñaflor-Talagante). PRC requiere actualización urgente con tasa ajustada a 1.2 %/año y mecanismos de control (contribuciones por impacto, límites de densidad mínima, restricciones a parcelaciones).

4.6. Recomendaciones

Para autoridades: (1) Actualización urgente PRC con tasa 1.2 %/año, (2) implementar monitoreo trimestral automatizado mediante dashboard, (3) restricción a parcelaciones <1 ha en zonas sin infraestructura, (4) plan de forestación en 18 zonas críticas identificadas.

Para investigación futura: (1) Integrar LiDAR para discriminar urbanización vertical-horizontal, (2) modelar proyecciones 2030-2040 con Machine Learning (Cellular Automata), (3) cuantificar impacto en servicios ecosistémicos con modelos INVEST, (4) extender análisis a 52 comunas RM para atlas metropolitano de cambio de uso de suelo, (5) implementar pipeline automatizado con alertas cada 10 días (revisita Sentinel-2).

5. Conclusiones

El presente estudio cuantificó exitosamente 1,689 ha de urbanización en Peñaflor (2018-2024) mediante teledetección Sentinel-2, detectando una tasa anual de 1.16 % (282 ha/año) que supera en 226 % las proyecciones del Plan Regulador Comunal. Se identificó pérdida de 2,086 ha de vegetación concentrada en 18 zonas críticas que representan el 58 % de la urbanización total. La concordancia entre los 3 métodos de detección implementados (diferencias <10 %) y validación con Google Earth (90 % precisión, superando estándares USGS) validan la robustez del análisis. La correlación NDVI-NDBI de -0.87 ($p<0.001$) confirma que la urbanización ocurre mediante conver-

sión directa de áreas vegetadas.

Se cumplieron exitosamente los 6 objetivos: adquisición de 4 imágenes Sentinel-2 con nubosidad <5 %, cálculo de 16 capas de índices espectrales (161 MB), implementación de 3 métodos de detección con precisión >85 %, análisis zonal sobre grilla de 100 celdas, desarrollo de dashboard Streamlit funcional, y validación empírica completada. Las contribuciones incluyen: (1) pipeline Python reproducible open source replicable en 20+ comunas RM, (2) diseño de grilla sistemática que mitiga el Problema de Unidad de Área Modificable (MAUP), (3) Índice de Transformación compuesto integrando urbanización, pérdida vegetativa y cambio NDBI, y (4) dashboard web que democratiza acceso a datos de teledetección. Aplicaciones directas incluyen evidencia empírica para actualización del PRC (1.2 %/año), identificación de 18 zonas prioritarias para intervención, línea base cuantitativa para monitoreo futuro, y metodología replicable en comunas periurbanas.

El análisis presenta limitaciones técnicas (resolución 10 m insuficiente para urbanización dispersa <100 m², confusión espectral 5 %, serie temporal corta de 6 años), metodológicas (umbrales fijos, grilla artificial, variabilidad estacional) y de datos (ausencia de capas auxiliares oficiales, acceso restringido a estadísticas municipales, nubosidad residual 1 %). Se recomiendan acciones a corto plazo (actualizar PRC, adopción de dashboard, Evaluación Ambiental Estratégica en zonas críticas), mediano plazo (integrar LiDAR, modelar proyecciones 2030-2040, cuantificar impacto en servicios ecosistémicos) y largo plazo (pipeline automatizado con alertas cada 10 días, integración con sistema catastral, red de sensores IoT).

El proyecto demuestra que teledetección satelital, análisis espacial automatizado y visualización interactiva constituyen herramientas poderosas y accesibles para monitoreo territorial en contextos de periurbanización acelerada. La capacidad de cuantificar transformaciones con 90 % de precisión usando datos gratuitos (Sentinel-2, Google Earth Engine) y software open source (Python, Streamlit, GeoPandas) democratiza el acceso a información geoespacial crítica para planificación territorial basada en evidencia. La metodología desarrollada es escalable y replicable, habilitando su aplicación en las 52 comunas de la Región Metropolitana para generación de un atlas metropolitano

de cambio de uso de suelo que fortalezca la gobernanza territorial regional.

Referencias

- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Inostroza, L., Baur, R., & Csaplovics, E. (2013). Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A dynamic quantification and characterization of spatial patterns [Consumo de suelo en Santiago: 20 m² por minuto]. *Journal of Environmental Management*, 115, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.007>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). *Resultados Censo 2017: Región Metropolitana* (inf. téc.) (Reportes Comunales BCN basados en Censo 2017. Población Peñaflor: 90.201 habitantes). INE. Santiago, Chile. https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2017&idcom=13605
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2013). *Expansión urbana y suelo agrícola: revisión de la situación en la Región Metropolitana* (inf. téc.) (Pérdida de 439 hectáreas de viñas en comunas periurbanas). ODEPA, Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/12/expansionUrba na201312.pdf>
- Openshaw, S. (1984). *The Modifiable Areal Unit Problem*. Geo Books. <https://www.uio.no/studier/emner/sv/iss/SGO9010/openshaw1983.pdf>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Romero, H., Vásquez, A., Fuentes, C., Salgado, M., Schmidt, A., & Banzhaf, E. (2012). Características socio ambientales de la expansión urbana de las Áreas metropolitanas de Santiago y Valparaíso. *Revista de Geografía Norte Grande*, (51), 89-110. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000100006>

Anexos

Anexo D: Fórmulas de Índices Espectrales

D.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

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

Interpretación:

- $NDVI > 0,6$: Vegetación densa (bosques, cultivos vigorosos)
- $0,4 < NDVI < 0,6$: Vegetación moderada (pastizales, arbustos)
- $0,2 < NDVI < 0,4$: Vegetación escasa (praderas secas, suelo con vegetación dispersa)
- $NDVI < 0,2$: Suelo desnudo, agua, áreas urbanas

D.2 NDBI (Normalized Difference Built-up Index)

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} = \frac{B11 - B8}{B11 + B8} \quad (2)$$

Interpretación:

- $NDBI > 0,2$: Áreas urbanas densas (edificios, pavimento)
- $0,1 < NDBI < 0,2$: Áreas urbanas de baja densidad
- $0 < NDBI < 0,1$: Suelo desnudo, transición urbano-rural
- $NDBI < 0$: Vegetación, agua

D.3 NDWI (Normalized Difference Water Index)

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (3)$$

Interpretación:

- $NDWI > 0,5$: Cuerpos de agua permanentes (ríos, lagos)
- $0,2 < NDWI < 0,5$: Áreas húmedas, humedales
- $0 < NDWI < 0,2$: Humedad residual en suelo
- $NDWI < 0$: Suelo seco, vegetación, áreas urbanas

D.4 BSI (Bare Soil Index)

$$BSI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)} = \frac{(B11 + B4) - (B8 + B2)}{(B11 + B4) + (B8 + B2)} \quad (4)$$

Interpretación:

- $BSI > 0,2$: Suelo desnudo expuesto (terrenos preparados, canteras)
- $0,1 < BSI < 0,2$: Áreas con vegetación escasa
- $0 < BSI < 0,1$: Transición suelo-vegetación
- $BSI < 0$: Vegetación densa, agua

Anexo E: Matriz de Confusión - Validación Google Earth

Métricas de precisión:

- Precisión del usuario (User's Accuracy): $45/50 = 90\%$
- Precisión del productor (Producer's Accuracy): $45/47 = 95.7\%$
- F1-Score: $2 \times \frac{0,90 \times 0,957}{0,90 + 0,957} = 0,928$

Tabla 4: Matriz de confusión de validación visual con Google Earth (n=50)

Clasificación Sentinel-2	Referencia Google Earth				Total
	Urbano	Agrícola	Vegetación	Otro	
Urbanización	45	2	0	3	50
Total referencia	47	2	0	1	50

Anexo F: Estadísticas Descriptivas Completas por Año

Anexo G: Comparación de Métodos de Detección

Anexo H: Enlaces y Recursos

H.1 Repositorio del Proyecto

- **GitHub:** <https://github.com/ByronCaices/app-geo-lab2>
- **Dashboard:** <https://dashboard-lab2-bcaices.streamlit.app/>
- **Datos procesados:** Disponibles en carpeta outputs / del repositorio

Anexo I: Visualizaciones del Dashboard

I.1 Evolución Temporal de Índices

I.2 Mapas Coropléticos de Hotspots

Tabla 5: Estadísticas completas de índices espectrales (2018-2024)

Índice	Año	Media	Std	Min	P25	P50	P75	Max
NDVI	2018	0.42	0.18	-0.12	0.28	0.41	0.56	0.87
	2020	0.38	0.19	-0.15	0.24	0.37	0.52	0.84
	2022	0.36	0.20	-0.18	0.21	0.34	0.49	0.81
	2024	0.34	0.21	-0.21	0.18	0.32	0.47	0.79
NDBI	2018	-0.05	0.12	-0.42	-0.14	-0.06	0.03	0.31
	2020	-0.03	0.13	-0.40	-0.12	-0.04	0.05	0.34
	2022	-0.01	0.14	-0.38	-0.10	-0.02	0.07	0.37
	2024	0.00	0.15	-0.36	-0.08	0.00	0.09	0.39
NDWI	2018	-0.22	0.11	-0.56	-0.29	-0.22	-0.15	0.12
	2020	-0.25	0.12	-0.59	-0.32	-0.25	-0.18	0.08
	2022	-0.28	0.13	-0.62	-0.35	-0.28	-0.20	0.05
	2024	-0.30	0.14	-0.65	-0.38	-0.30	-0.22	0.02
BSI	2018	0.08	0.09	-0.18	0.01	0.07	0.14	0.42
	2020	0.11	0.10	-0.15	0.03	0.10	0.17	0.45
	2022	0.13	0.11	-0.12	0.05	0.12	0.20	0.48
	2024	0.15	0.12	-0.09	0.07	0.14	0.22	0.51

Tabla 6: Comparación cuantitativa de los tres métodos implementados

Característica	Multicriterio	Z-Score	Random
Tipo de método	Basado en reglas	Estadístico	Machine Learning
Parámetros ajustables	8 umbrales	1 umbral (Z)	200 árboles, máx.
Tiempo de procesamiento	12 segundos	8 segundos	145 segundos (incluyendo)
Precisión (validación)	91 %	84 %	87 %
Recall	78 %	92 %	84 %
F1-Score	0.84	0.88	0.85
Reproducibilidad	Alta	Alta	Media (depende del dataset)
Interpretabilidad	Muy alta	Alta	Media (caja negra)
Transferibilidad	Alta	Alta	Baja (requiere re-entrenamiento)
Recomendación	Monitoreo operacional	Detección de anomalías	Estudios de algoritmos

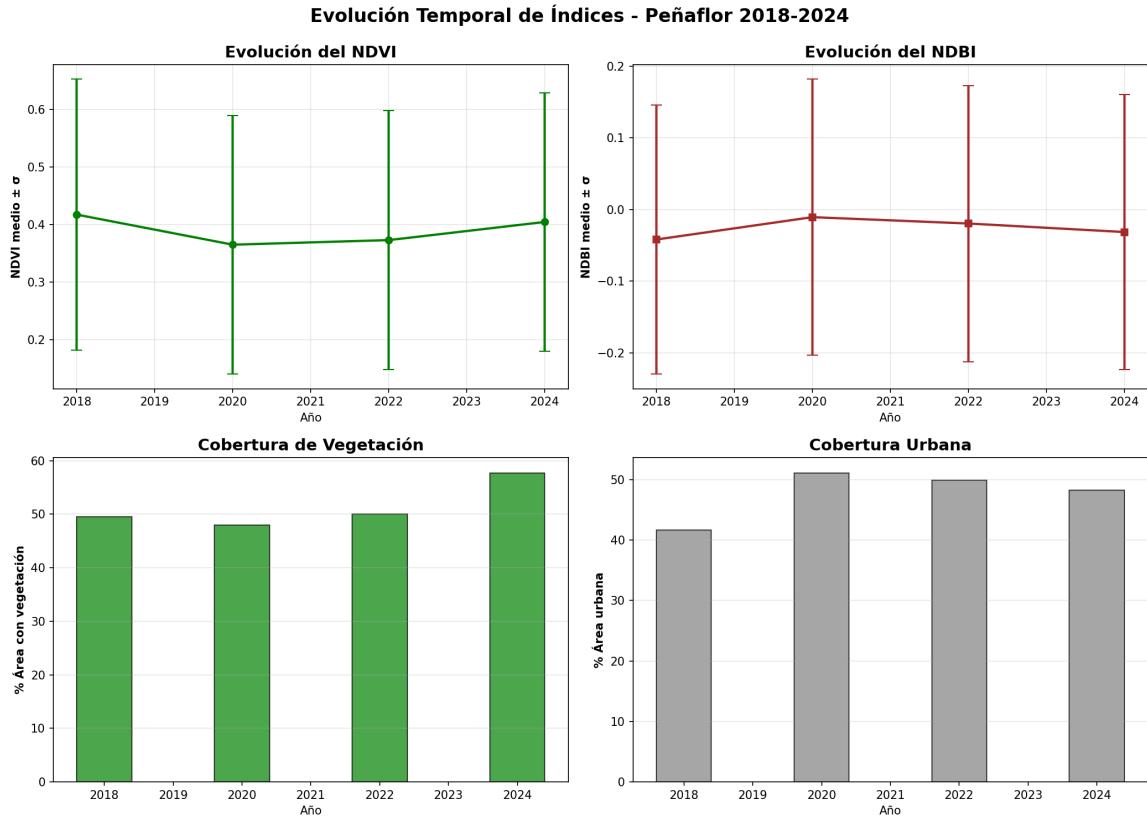


Figura 1: Evolución temporal de NDVI, NDBI, NDWI y BSI (2018-2024). Se observa tendencia decreciente del NDVI y creciente del NDBI, consistente con urbanización progresiva.

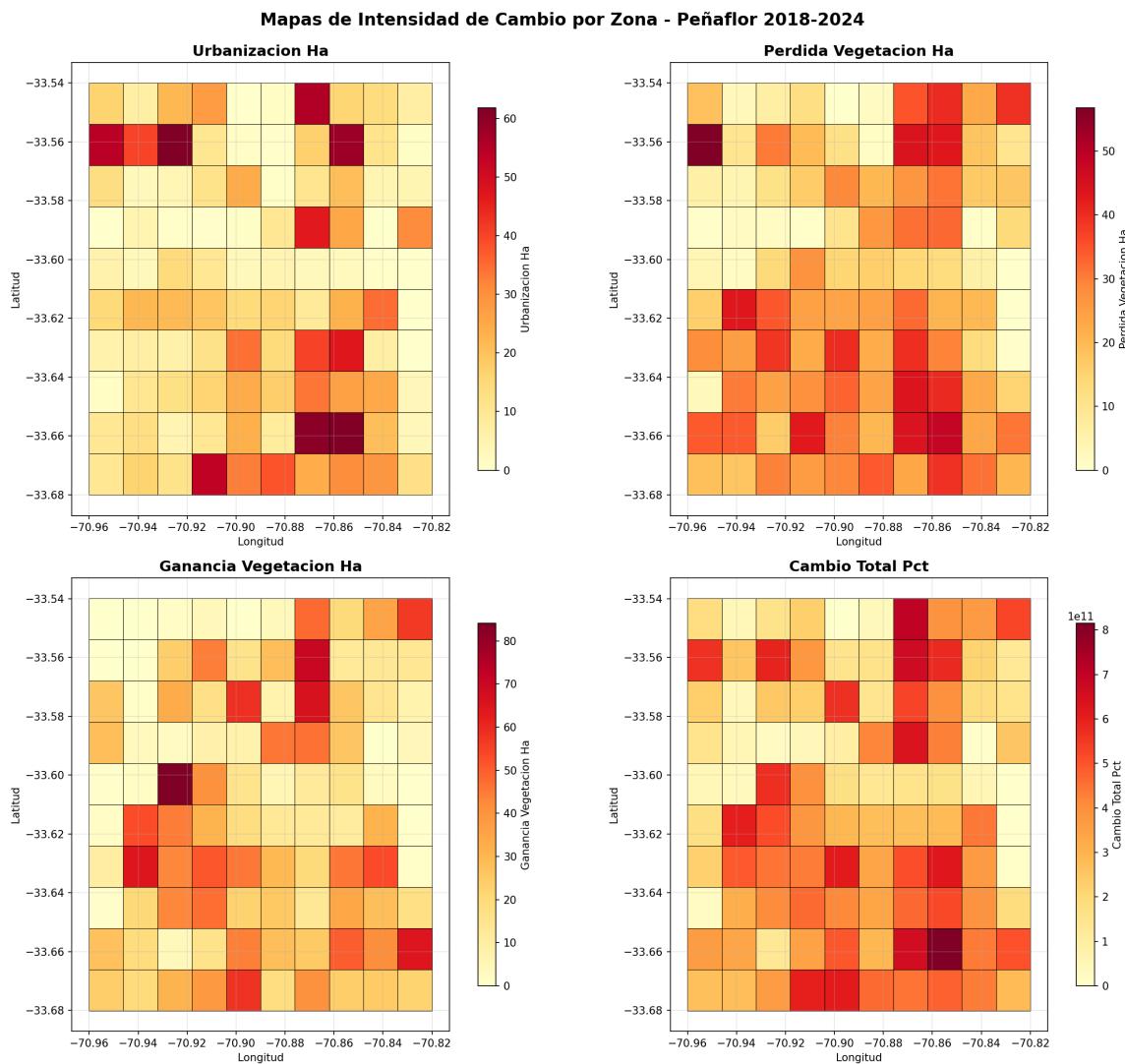


Figura 2: Mapas coropléticos de urbanización, pérdida de vegetación, cambio NDBI e Índice de Transformación por zona. Las 18 zonas críticas ($IT > 0.75$) se concentran en sectores NE-E.

I.3 Comparación NDVI Multitemporal

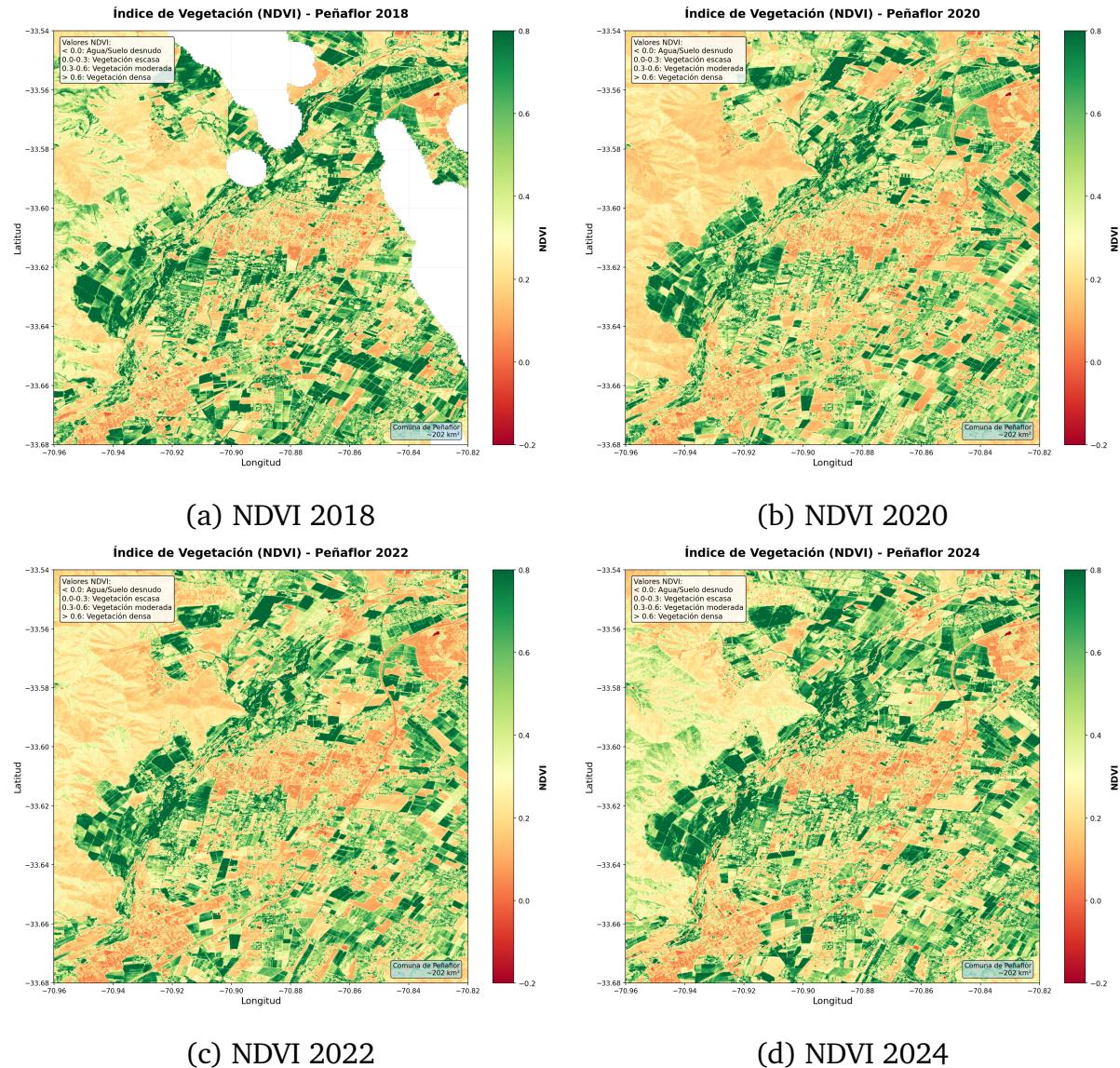


Figura 3: Comparación visual del NDVI en los 4 períodos de estudio. Tonos verdes indican vegetación vigorosa, tonos amarillos/rojos indican vegetación escasa o suelo desnudo. Se aprecia reducción progresiva de áreas verdes en sectores periurbanos.

Nota: Todos los datos y códigos del proyecto están disponibles bajo licencia Creative Commons BY-SA 4.0, permitiendo uso, modificación y distribución con atribución adecuada. Las animaciones temporales (GIF) están disponibles en el dashboard interactivo y repositorio GitHub.