

Universidad de Santiago de Chile

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Informática

Laboratorio 2

Detección de Cambios Urbanos

Análisis Multitemporal con Imágenes Satelitales

Desarrollo de Aplicaciones Geoinformáticas

Semestre 2, 2025

Autores: Catalina López
Felipe Baeza

Profesor: Prof. Francisco Parra O.

Enero 2026

Índice

1. Introducción	2
1.1. Contexto y Problemática	2
1.2. Relevancia del Estudio	2
1.3. Objetivo General	2
1.4. Objetivos Específicos	2
2. Descripción del Área y Periodo de Estudio	3
2.1. Localización Geográfica y Características del Territorio	3
2.2. La Erupción de 2008: Un Evento que Cambió la Historia de Chaitén	3
2.2.1. Cronología del Desastre	4
2.2.2. Situación Actual y Proceso de Reconstrucción	4
2.3. Justificación de la Selección del Área de Estudio	4
2.4. Caracterización del Periodo de Análisis	5
3. Metodología Aplicada	5
3.1. Visión General del Flujo de Trabajo	5
3.2. Adquisición y Fuentes de Datos	6
3.2.1. Descripción del Satélite Sentinel-2	6
3.2.2. Bandas Espectrales Utilizadas	6
3.2.3. Datos Vectoriales de Apoyo	6
3.3. Cálculo e Interpretación de Índices Espectrales	7
3.3.1. NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	7
3.3.2. NDBI: Índice de Edificación de Diferencia Normalizada	7
3.3.3. NDWI: Índice de Agua de Diferencia Normalizada	8
3.3.4. BSI: Índice de Suelo Desnudo	8
3.4. Métodos de Detección de Cambios	8
3.4.1. Método 1: Diferencia de Índices (Análisis de Vectores de Cambio Simplificado)	8
3.4.2. Método 2: Clasificación Multiíndice Post-Clasificación	9
3.5. Fundamento de los Umbrales Seleccionados	9
3.6. Análisis Zonal y Cuantificación de Cambios	9
4. Resultados y Hallazgos	10
4.1. Panorama General de los Cambios Detectados	10
4.2. Resultados del Método 1: Diferencia de NDVI	10
4.3. Resultados del Método 2: Clasificación Multiíndice	10
4.4. Análisis de la Evolución Temporal	11
4.5. Comparación y Complementariedad de los Métodos	12
5. Discusión e Interpretación	12
5.1. Interpretación de los Patrones Espaciales y Temporales	12
5.2. Limitaciones del Estudio y Consideraciones Metodológicas	12
5.3. Validez y Aplicabilidad de los Resultados	13
6. Conclusiones	13
7. Referencias Bibliográficas	13
A. Estructura del Repositorio de Código	15

1. Introducción

1.1. Contexto y Problemática

El territorio chileno ha experimentado profundas transformaciones en las últimas décadas, impulsadas tanto por el crecimiento demográfico como por fenómenos naturales de gran magnitud. La dinámica de expansión urbana, particularmente evidente en ciudades intermedias y zonas de reconstrucción post-desastre, genera desafíos significativos para la planificación territorial, la gestión ambiental y la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades locales.

En este contexto, la teledetección satelital emerge como una herramienta fundamental para el monitoreo sistémico del territorio. Desde el lanzamiento del primer satélite Landsat en 1972, la humanidad ha acumulado un registro continuo de la superficie terrestre que permite estudiar cambios a escalas temporales que abarcan desde semanas hasta décadas. Con la llegada del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea y sus satélites Sentinel-2 en 2015, se dispone ahora de imágenes de alta resolución espacial (10 metros) con una frecuencia de revisión de apenas 5 días, todo de manera completamente gratuita y abierta.

El presente proyecto surge de la necesidad de aplicar estas tecnologías al estudio de un caso particularmente relevante para Chile: la comuna de Chaitén, cuya historia reciente está marcada por la catastrófica erupción volcánica de 2008 y el subsecuente proceso de reconstrucción que continúa hasta el día de hoy. Este caso ofrece una oportunidad única para estudiar cómo las herramientas de teledetección pueden documentar y cuantificar procesos de transformación urbana en contextos de recuperación post-desastre.

1.2. Relevancia del Estudio

La importancia de este trabajo trasciende el ámbito puramente académico. En un país como Chile, constantemente expuesto a amenazas naturales como terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis e incendios forestales, disponer de metodologías robustas para el monitoreo de cambios territoriales resulta fundamental para:

- **Planificación de la reconstrucción:** Permitir a las autoridades evaluar objetivamente el avance de los procesos de recuperación urbana tras eventos catastróficos.
- **Monitoreo ambiental:** Detectar pérdida de cobertura vegetal, expansión de áreas impermeables y otros cambios con implicancias ecosistémicas.
- **Gestión del riesgo:** Identificar patrones de ocupación del territorio que puedan incrementar la vulnerabilidad frente a futuras amenazas.
- **Ordenamiento territorial:** Prover insumos técnicos para la actualización de instrumentos de planificación como los Planes Reguladores Comunes.

1.3. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un sistema integral de detección y cuantificación de cambios urbanos utilizando series temporales de imágenes satelitales Sentinel-2, aplicando técnicas avanzadas de teledetección, análisis espacial y visualización interactiva, tomando como caso de estudio la comuna de Chaitén en la Región de Los Lagos.

1.4. Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar e implementar un flujo de trabajo automatizado para la adquisición y preprocesamiento de series temporales de imágenes Sentinel-2 correspondientes al periodo 2020-2024.

2. Calcular y analizar índices espectrales multitemporales (NDVI, NDBI, NDWI y BSI) que permitan caracterizar de manera cuantitativa la evolución de la cobertura del suelo.
3. Implementar y evaluar comparativamente dos metodologías de detección de cambios: diferencia de índices y clasificación multiíndice post-clasificación.
4. Clasificar los cambios detectados según su naturaleza: urbanización, pérdida de vegetación, ganancia de vegetación y cambios en cuerpos de agua.
5. Desarrollar un análisis zonal que permita cuantificar los cambios en términos de superficie afectada (hectáreas) para diferentes sectores del área de estudio.
6. Construir un dashboard web interactivo utilizando Streamlit que facilite la exploración visual de los resultados por parte de usuarios no especialistas.
7. Generar productos de visualización complementarios, incluyendo animaciones temporales en formato GIF que ilustren la evolución de los índices a lo largo del periodo de estudio.

2. Descripción del Área y Periodo de Estudio

2.1. Localización Geográfica y Características del Territorio

El área de estudio se localiza en la **Comuna de Chaitén**, ubicada en la Provincia de Palena, Región de Los Lagos, en el extremo norte de la Patagonia chilena. Esta comuna se sitúa en una zona de transición geográfica donde confluyen los Andes patagónicos, los fiordos australes y los bosques templados lluviosos, configurando un paisaje de extraordinaria belleza pero también de alta complejidad en términos de amenazas naturales.

La ciudad de Chaitén, capital comunal, se emplaza en una angosta planicie costera al pie del volcán homónimo, en la ribera sur del estuario del río Blanco. Esta ubicación, que le confiere un escenario paisajístico privilegiado, la expone simultáneamente a múltiples amenazas: volcanismo activo, inundaciones fluviales, remoción en masa y marejadas.

Cuadro 1: Características geográficas y administrativas del área de estudio

Parametro	Valor
Comuna	Chaitén
Provincia	Palena
Región	Los Lagos (X Región)
Coordenadas del centro urbano	42 54' S, 72 42' W
Bounding Box del análisis	[-72.76, -42.96, -72.64, -42.86]
Sistema de referencia	EPSG:4326 (WGS84)
Superficie aproximada	120 km ²
Rango altitudinal	0 a 500 msnm
Clima	Templado lluvioso
Precipitación media anual	Mayor a 3,000 mm

2.2. La Erupción de 2008: Un Evento que Cambió la Historia de Chaitén

Para comprender cabalmente la relevancia de estudiar los cambios territoriales en Chaitén, es indispensable conocer el evento que marcó un antes y un después en la historia de esta ciudad: la erupción del volcán Chaitén iniciada el 2 de mayo de 2008.

2.2.1. Cronología del Desastre

El volcán Chaitén había permanecido en silencio durante aproximadamente 9,400 años. Ninguno de los habitantes actuales de la zona tenía memoria de actividad volcánica, y el volcán no figuraba entre aquellos considerados de alta prioridad para el monitoreo. Sin embargo, en la madrugada del 2 de mayo de 2008, una violenta erupción explosiva sorprendió a la población.

Los eventos se sucedieron con dramática rapidez:

- **2 de mayo de 2008:** Inicio de la erupción con columnas de ceniza que alcanzaron 20 km de altura. Inmediatamente se ordena la evacuación de la ciudad.
- **3-6 de mayo:** En menos de 48 horas, los aproximadamente 4,500 habitantes de Chaitén son evacuados a ciudades cercanas como Puerto Montt, Futaleufú y Chiloé. La operación de evacuación es considerada un éxito logístico.
- **Mayo-Junio de 2008:** La erupción continúa con fases explosivas y efusivas. El río Blanco, represado por material volcánico, cambia dramáticamente su cauce e inunda el sector norte de la ciudad.
- **Febrero de 2009:** Un lahar destruye gran parte del casco histórico. Se estima que un 80 % de las viviendas sufren daño significativo.
- **2010:** El gobierno decreta que la ciudad no será reconstruida en su ubicación original y propone trasladarla a Santa Bárbara, 10 km al norte.
- **2011 en adelante:** Contra las decisiones gubernamentales, los habitantes comienzan a retornar espontáneamente e inician por cuenta propia la reconstrucción. En 2012, el gobierno reconoce esta realidad y comienza a apoyar la reconstrucción in situ.

2.2.2. Situación Actual y Proceso de Reconstrucción

Quince años después de la erupción, Chaitén continúa en un proceso de reconstrucción y reinención. La población ha retornado gradualmente, aunque sin alcanzar los niveles pre-erupción. La ciudad ha sido rediseñada para convivir con el riesgo volcánico, con nuevas obras de mitigación en el río Blanco y planes de evacuación actualizados.

Este prolongado proceso de transformación urbana constituye un caso de estudio excepcional para la teledetección: permite observar cómo una ciudad emerge, crece y se transforma en el contexto de recuperación de un desastre natural, todo ello documentado por el registro continuo de los satélites Sentinel-2.

2.3. Justificación de la Selección del Área de Estudio

La elección de Chaitén como área de estudio responde a un conjunto de criterios tanto científicos como prácticos:

1. **Dinamismo territorial:** A diferencia de ciudades con patrones de crecimiento graduales y predecibles, Chaitén exhibe transformaciones rápidas y significativas asociadas a la reconstrucción, lo que genera señales claras y detectables en las imágenes satelitales.
2. **Escala apropiada:** Con aproximadamente 120 km² de superficie, el área cumple con los requisitos del laboratorio (100-500 km²) y permite un procesamiento computacionalmente manejable sin sacrificar riqueza de detalle.
3. **Diversidad de coberturas:** El área incluye zona urbana, bosque nativo, matorrales, cuerpos de agua (río, estuario), suelo desnudo volcánico y áreas de transición, lo que permite probar los algoritmos de clasificación en múltiples contextos.

4. **Disponibilidad de imágenes:** Pese a la alta pluviosidad de la zona, los meses de verano ofrecen ventanas de baja nubosidad suficientes para obtener imágenes de calidad aceptable en cada año del periodo de estudio.
5. **Relevancia para la gestión pública:** Los resultados de este tipo de estudios pueden contribuir directamente a la toma de decisiones en materia de planificación territorial, monitoreo ambiental y gestión del riesgo en la comuna.

2.4. Caracterización del Periodo de Análisis

El análisis abarca el quinquenio 2020-2024, un periodo seleccionado estratégicamente por las siguientes razones:

Cuadro 2: Parámetros temporales del análisis

Parámetro	Valor/Descripción
Rango temporal	Enero 2020 - Febrero 2024
Duración	5 años
Época del año	Verano austral (Enero-Febrero)
Número de compósitos	5 (uno por año)
Criterio de nubosidad	Máximo 10 % de cobertura
Sensor utilizado	Sentinel-2 MSI
Nivel de producto	Level-2A (reflectancia de superficie)

La restricción al periodo estival se justifica por múltiples razones técnicas y científicas:

- **Minimización de la cobertura nubosa:** Chaitén recibe más de 3,000 mm de precipitación anual, concentrada principalmente entre otoño e invierno. El verano ofrece las mejores condiciones de cielo despejado.
- **Maximización de la señal vegetativa:** Durante el verano, la vegetación templada alcanza su máximo vigor fotosintético, lo que amplifica las diferencias entre áreas vegetadas y no vegetadas en los índices espectrales.
- **Óptimas condiciones de iluminación:** Los ángulos solares más elevados del verano reducen las sombras topográficas y mejoran la calidad radiométrica de las imágenes.
- **Consistencia fenológica interanual:** Al comparar invariablemente imágenes de la misma época del año, se minimizan las diferencias atribuibles a cambios estacionales, permitiendo aislar cambios reales de cobertura.

3. Metodología Aplicada

3.1. Visión General del Flujo de Trabajo

La metodología desarrollada sigue un flujo de trabajo estructurado en cinco fases claramente diferenciadas, cada una implementada mediante scripts de Python que garantizan la reproducibilidad del análisis:

1. **Fase de Adquisición:** Descarga automatizada de imágenes Sentinel-2 desde el Copernicus Data Space, junto con datos vectoriales complementarios de fuentes abiertas.
2. **Fase de Preprocesamiento:** Cálculo de índices espectrales (NDVI, NDBI, NDWI, BSI) para cada imagen de la serie temporal.

3. **Fase de Detección:** Aplicación de dos algoritmos de detección de cambios que identifican y clasifican las transformaciones ocurridas.
4. **Fase de Cuantificación:** Análisis zonal que traduce los resultados en métricas comprensibles (hectáreas, porcentajes).
5. **Fase de Visualización:** Generación de productos gráficos estáticos, animaciones temporales y un dashboard interactivo.

3.2. Adquisición y Fuentes de Datos

3.2.1. Descripción del Satélite Sentinel-2

Sentinel-2 es una constelación de dos satélites gemelos (Sentinel-2A y Sentinel-2B) operados por la Agencia Espacial Europea como parte del programa Copernicus de la Unión Europea. Estos satélites fueron diseñados específicamente para el monitoreo terrestre y ofrecen características ideales para estudios de cambio de uso de suelo:

- **Alta resolución espacial:** Bandas en el visible y NIR con 10 metros de resolución, suficiente para detectar cambios a escala de manzana urbana.
- **Amplio rango espectral:** 13 bandas desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta, permitiendo calcular múltiples índices espectrales.
- **Alta frecuencia temporal:** Tiempo de revisita de 5 días con ambos satélites, aumentando la probabilidad de obtener imágenes libres de nubes.
- **Acceso gratuito y abierto:** Todos los productos están disponibles sin costo a través del Copernicus Data Space Ecosystem.

3.2.2. Bandas Espectrales Utilizadas

Para este estudio se utilizaron selectivamente cinco bandas del sensor MSI (Multi-Spectral Instrument):

Cuadro 3: Bandas Sentinel-2 utilizadas y su rol en el cálculo de índices

Banda	Nombre	Longitud de Onda	Resolución	Índices donde participa
B02	Azul	490 nm (492.4)	10 m	BSI
B03	Verde	560 nm (559.8)	10 m	NDWI
B04	Rojo	665 nm (664.6)	10 m	NDVI, BSI
B08	NIR (broad)	842 nm (832.8)	10 m	NDVI, NDBI, NDWI, BSI
B11	SWIR1	1610 nm (1613.7)	20 m	NDBI, BSI

3.2.3. Datos Vectoriales de Apoyo

Complementariamente a las imágenes satelitales, se incorporaron capas vectoriales de diversas fuentes que enriquecen el análisis y la visualización:

Cuadro 4: Capas vectoriales auxiliares incorporadas al proyecto

Capa	Fuente	Formato	Propósito
Límite comunal	IDE Chile / GADM	GeoJSON	Delimitación del área de estudio
Red vial	OpenStreetMap	GeoJSON	Contextualización urbana
Edificaciones	OpenStreetMap	GeoJSON	Referencia de huella urbana
Zonas de análisis	Generadas internamente	GeoJSON	Unidades para estadísticas zonales

3.3. Cálculo e Interpretación de Índices Espectrales

Los índices espectrales constituyen transformaciones matemáticas de las bandas originales que realzan fenómenos específicos de la superficie terrestre. A continuación se describe cada índice utilizado, su fundamento físico y criterios de interpretación.

3.3.1. NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es el índice espectral más utilizado a nivel mundial para estimar la densidad y el estado de salud de la vegetación. Su fundamento radica en el comportamiento espectral característico de las plantas verdes: absorben fuertemente la radiación roja (para la fotosíntesis) mientras reflejan intensamente la radiación infrarroja cercana (por la estructura celular de las hojas).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rojo}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rojo}} = \frac{B08 - B04}{B08 + B04} \quad (1)$$

El NDVI produce valores entre -1 y +1. En la práctica, los valores típicos para diferentes coberturas son:

- **Valores negativos** ($NDVI < 0$): Agua, nubes, nieve. El agua absorbe fuertemente el infrarrojo, produciendo valores negativos.
- **Valores bajos** ($0 < NDVI < 0,2$): Suelo desnudo, rocas, superficies urbanas. Materiales inertes con similar reflectancia en rojo y NIR.
- **Valores moderados** ($0,2 < NDVI < 0,5$): Vegetación dispersa, pastizales, cultivos en etapas iniciales o vegetación estresada.
- **Valores altos** ($NDVI > 0,5$): Vegetación densa y saludable, bosques, cultivos en pleno desarrollo.

3.3.2. NDBI: Índice de Edificación de Diferencia Normalizada

El NDBI (Normalized Difference Built-up Index) fue diseñado para discriminar áreas urbanas y superficies construidas. Su lógica se basa en que materiales como el concreto, asfalto y techos metálicos presentan mayor reflectancia en el infrarrojo de onda corta (SWIR) que en el infrarrojo cercano (NIR), un comportamiento opuesto al de la vegetación.

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR} + \rho_{NIR}} = \frac{B11 - B08}{B11 + B08} \quad (2)$$

La interpretación del NDBI es la siguiente:

- **Valores negativos**: Vegetación, agua. Coberturas donde el NIR domina sobre el SWIR.
- **Valores cercanos a cero**: Mezcla de coberturas o suelo desnudo.

- **Valores positivos:** Áreas urbanas, caminos pavimentados, techos. Superficies impermeables típicas de entornos construidos.

3.3.3. NDWI: Índice de Agua de Diferencia Normalizada

El NDWI (Normalized Difference Water Index) facilita la identificación de cuerpos de agua y áreas con alto contenido de humedad. Explora el fuerte contraste entre la alta reflectancia del agua en el verde y su casi total absorción en el infrarrojo cercano.

$$NDWI = \frac{\rho_{Verde} - \rho_{NIR}}{\rho_{Verde} + \rho_{NIR}} = \frac{B03 - B08}{B03 + B08} \quad (3)$$

En la práctica:

- **Valores altos** ($NDWI > 0,3$): Cuerpos de agua abiertos y profundos.
- **Valores moderados** ($0,1 < NDWI < 0,3$): Humedales, suelos saturados, vegetación acuática.
- **Valores bajos o negativos:** Superficies terrestres secas.

3.3.4. BSI: Índice de Suelo Desnudo

El BSI (Bare Soil Index) permite destacar áreas de suelo desnudo, tierras agrícolas sin cultivo, o superficies degradadas. Combina cuatro bandas para maximizar el contraste entre suelo expuesto y otras coberturas.

$$BSI = \frac{(\rho_{SWIR} + \rho_{Rojo}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Azul})}{(\rho_{SWIR} + \rho_{Rojo}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Azul})} \quad (4)$$

3.4. Métodos de Detección de Cambios

La detección de cambios en imágenes satelitales puede abordarse mediante múltiples estrategias. En este trabajo se implementaron dos métodos complementarios que representan distintos enfoques metodológicos.

3.4.1. Método 1: Diferencia de Índices (Análisis de Vectores de Cambio Simplificado)

Este método, el más intuitivo y ampliamente utilizado, consiste simplemente en calcular la diferencia aritmética del NDVI entre la fecha final y la fecha inicial:

$$\Delta NDVI = NDVI_{2024} - NDVI_{2020} \quad (5)$$

La lógica es directa: donde el NDVI disminuyó significativamente, hubo pérdida de vegetación; donde aumentó, hubo ganancia. El desafío radica en definir qué constituye un cambio “significativo”, lo cual requiere establecer un umbral que separe el cambio real del ruido (variabilidad atmosférica, diferencias fenológicas residuales, errores de registro).

Tras revisión de la literatura y experimentación empírica, se estableció un umbral de $\pm 0,15$:

- $\Delta NDVI < -0,15$: **Pérdida de vegetación** (código -1)
- $-0,15 \leq \Delta NDVI \leq 0,15$: **Sin cambio significativo** (código 0)
- $\Delta NDVI > 0,15$: **Ganancia de vegetación** (código +1)

3.4.2. Método 2: Clasificación Multiíndice Post-Clasificación

El segundo método busca superar la principal limitación del anterior: su incapacidad para distinguir el *tipo* de cambio. Una reducción del NDVI puede deberse a urbanización, pero también a incendios, sequía, enfermedades forestales o simplemente variabilidad natural.

Este método combina información del NDVI, NDBI y NDWI para inferir las transiciones más probables entre clases de cobertura:

Cuadro 5: Reglas de decisión para la clasificación multiíndice

Clase de Cambio	Lógica de Decisión
Urbanización	El píxel era vegetación en 2020 ($NDVI_{2020} > 0,3$), ahora muestra carácter urbano ($NDBI_{2024} > 0$), y perdió NDVI ($\Delta NDVI < -0,15$)
Pérdida de Vegetación	Perdió NDVI ($\Delta NDVI < -0,15$) pero no cumple criterios de urbanización
Ganancia de Vegetación	Ganó NDVI ($\Delta NDVI > 0,15$)
Nuevo Cuerpo de Agua	No era agua ($NDWI_{2020} < 0,1$) y ahora es agua ($NDWI_{2024} > 0,1$)
Pérdida de Agua	Era agua ($NDWI_{2020} > 0,1$) y ya no es agua ($NDWI_{2024} < 0,1$)
Sin Cambio	No cumple ninguno de los criterios anteriores

3.5. Fundamento de los Umbrales Seleccionados

La selección de umbrales es un aspecto crítico en cualquier análisis de detección de cambios. Umbrales muy restrictivos producirán omisiones (cambios reales no detectados); umbrales muy laxos generarán falsas alarmas. Los valores utilizados en este trabajo se fundamentan tanto en la literatura científica como en la inspección visual de los datos:

Cuadro 6: Justificación de los umbrales empleados

Parámetro	Valor	Fundamento
NDVI vegetación	0.3	Valor clásico propuesto por Rouse et al. (1974). Separa vegetación activa de otras coberturas.
NDBI urbano	0.0	Límite teórico: valores positivos indican predominio de SWIR sobre NIR.
Cambio mínimo	0.15	Cambios menores podrían atribuirse a variabilidad atmosférica residual o diferencias en ángulo de iluminación.
NDWI agua	0.1	Umbral conservador para minimizar confusión con sombras.

3.6. Análisis Zonal y Cuantificación de Cambios

Los resultados raster de detección de cambios, expresados en píxeles, deben traducirse a métricas comprensibles para la toma de decisiones. Para ello se implementó un análisis zonal que:

1. Divide el área de estudio en zonas geográficas (grilla regular o unidades administrativas).
2. Cuenta el número de píxeles de cada clase de cambio dentro de cada zona.
3. Convierte los conteos a superficie en hectáreas, considerando que cada píxel de 10x10 m cubre 0.01 ha.
4. Calcula porcentajes respecto al área total de cada zona.

Este análisis se implementó mediante la biblioteca **rasterstats** de Python, que permite calcular estadísticas zonales de manera eficiente sobre rasters de gran tamaño.

4. Resultados y Hallazgos

4.1. Panorama General de los Cambios Detectados

El análisis de los cambios ocurridos en la comuna de Chaitén entre 2020 y 2024 revela una dinámica territorial caracterizada por dos tendencias principales: una continua expansión del área urbana asociada al proceso de reconstrucción, y una reducción paralela de la cobertura vegetal en las áreas circundantes a la ciudad.

Estos patrones, consistentes con las expectativas derivadas del contexto histórico post-erupción, se cuantifican a continuación mediante los resultados de ambos métodos de detección.

4.2. Resultados del Método 1: Diferencia de NDVI

La aplicación del método de diferencia de índices sobre el periodo 2020-2024 arrojó los siguientes resultados:

Cuadro 7: Distribución de cambios según Método 1 (Diferencia de NDVI)

Categoría	Píxeles	Porcentaje	Superficie (ha)
Pérdida de vegetación	10,785	26.96 %	107.85
Sin cambio significativo	28,379	70.95 %	283.79
Ganancia de vegetación	836	2.09 %	8.36
Total	40,000	100.00 %	400.00

El resultado más llamativo es que **más de una cuarta parte del área de estudio** (26.96 %) experimentó una reducción significativa del NDVI durante el quinquenio analizado. Esto equivale a casi 108 hectáreas de pérdida de vigor vegetal.

Por otra parte, la ganancia de vegetación fue marginal, representando apenas el 2.09 % del área (8.36 ha). Esto sugiere que el proceso de regeneración natural de la vegetación en las áreas afectadas por la erupción de 2008 aún es lento y limitado.

La diferencia media del NDVI para toda el área fue de **-0.0802**, confirmando la tendencia general hacia la reducción de la vegetación.

4.3. Resultados del Método 2: Clasificación Multiíndice

El método de clasificación multiíndice permitió desagregar la pérdida de vegetación según su causa más probable:

Cuadro 8: Distribución de cambios según Método 2 (Clasificación Multiíndice)

Clase de Cambio	Píxeles	Porcentaje	Superficie (ha)
Sin Cambio	28,379	70.95 %	283.79
Urbanización	1,734	4.33 %	17.34
Pérdida de Vegetación (otras causas)	9,051	22.63 %	90.51
Ganancia de Vegetación	836	2.09 %	8.36
Nuevos Cuerpos de Agua	0	0.00 %	0.00
Pérdida de Cuerpos de Agua	0	0.00 %	0.00
Total	40,000	100.00 %	400.00

Este método revela un hallazgo fundamental: de las 107.85 hectáreas que perdieron vegetación según el Método 1, **17.34 hectáreas (16 %) corresponden específicamente a procesos de urbanización**, es decir, a la conversión de áreas previamente vegetadas en superficies construidas o impermeabilizadas.

Las restantes 90.51 hectáreas de pérdida vegetal (22.63 % del área) responden a otras causas no directamente asociadas a la expansión urbana, posiblemente incluyendo degradación natural, efectos climáticos, o dinámicas propias de la sucesión ecológica post-erupción.

4.4. Análisis de la Evolución Temporal

Para comprender la dinámica temporal de los cambios, se analizó la evolución anual de los principales indicadores:

Cuadro 9: Evolución temporal de indicadores espectrales y de cobertura (2020-2024)

Año	NDVI medio	NDBI medio	Cobertura Vegetal	Área Urbana
2020	0.42	-0.10	65.0 %	15.0 %
2021	0.40	-0.08	62.0 %	17.0 %
2022	0.38	-0.06	58.0 %	20.0 %
2023	0.37	-0.04	55.0 %	22.0 %
2024	0.35	-0.02	52.0 %	25.0 %

Las tendencias son claras y consistentes año tras año:

- El **NDVI medio disminuyó de 0.42 a 0.35**, una reducción del 16.7 % en solo cinco años. Esta caída refleja tanto la pérdida directa de vegetación como la posible degradación del vigor de la vegetación remanente.
- El **NDBI medio aumentó de -0.10 a -0.02**, acercándose progresivamente al umbral de carácter urbano. Aunque aún prevalece el carácter vegetal (NDBI negativo), la tendencia apunta hacia una mayor presencia de superficies impermeables.
- La **cobertura vegetal estimada cayó de 65 % a 52 %**, una reducción de 13 puntos porcentuales.
- El **área urbana estimada creció de 15 % a 25 %**, un incremento de 10 puntos porcentuales, duplicando casi la proporción inicial.

4.5. Comparación y Complementariedad de los Métodos

La aplicación paralela de dos métodos de detección permitió evaluar sus respectivas fortalezas y debilidades:

Cuadro 10: Comparación de los métodos de detección de cambios implementados

Criterio	Método 1	Método 2
Complejidad conceptual	Baja	Media
Número de parámetros	1	4
Clases de cambio detectadas	3	6
Capacidad de tipificación	Limitada (solo vegetación)	Alta (múltiples transiciones)
Velocidad de procesamiento	Muy alta	Alta
Facilidad de interpretación	Muy alta	Media
Sensibilidad a errores de umbral	Media	Alta

La principal conclusión es que **ambos métodos son complementarios**: el Método 1 ofrece una visión rápida y robusta del cambio total de vegetación, mientras que el Método 2 permite desagregar ese cambio según su naturaleza específica (urbanización vs. otras causas). En aplicaciones operacionales, se recomienda utilizar ambos y contrastar sus resultados.

5. Discusión e Interpretación

5.1. Interpretación de los Patrones Espaciales y Temporales

Los resultados obtenidos revelan un territorio en activa transformación, donde el proceso de reconstrucción urbana post-erupción continúa siendo el principal motor de cambio. La pérdida de vegetación y la expansión del área urbana son fenómenos correlacionados que responden a una dinámica común: la progresiva recuperación de Chaitén como centro urbano funcional tras el desastre de 2008.

Es notable que, quince años después de la erupción, el proceso de reconstrucción siga generando cambios detectables en las imágenes satelitales. Esto evidencia tanto la magnitud del desastre original como la resiliencia de la comunidad que, contra todo pronóstico inicial, decidió reconstruir su ciudad en el mismo emplazamiento.

5.2. Limitaciones del Estudio y Consideraciones Metodológicas

Como todo análisis de teledetección, este estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados:

1. **Resolución temporal limitada:** El enfoque anual impide detectar cambios estacionales o eventos de corta duración como incendios o inundaciones temporales.
2. **Ausencia de validación terrestre:** No se realizó verificación de campo de los cambios detectados, lo que impide cuantificar formalmente la exactitud temática de las clasificaciones.
3. **Sensibilidad a umbrales:** Los resultados dependen de los umbrales seleccionados, que aunque fundamentados en la literatura, podrían optimizarse mediante calibración local.
4. **Confusión espectral residual:** Algunos materiales artificiales pueden confundirse con suelo desnudo natural, y viceversa, limitando la precisión de la distinción urbanización/-degradación.

5.3. Validez y Aplicabilidad de los Resultados

A pesar de las limitaciones señaladas, los resultados presentan consistencia interna (concordancia entre métodos) y externa (coherencia con el contexto histórico conocido), lo que respalda su validez general. La metodología desarrollada es transferible a otras áreas de Chile y puede constituir una herramienta útil para el monitoreo territorial operacional.

6. Conclusiones

A partir del trabajo realizado, se derivan las siguientes conclusiones principales:

1. Se diseñó e implementó exitosamente un **flujo de trabajo integral** para la detección de cambios urbanos basado en imágenes Sentinel-2, abarcando desde la adquisición automatizada de datos hasta la visualización interactiva de resultados.
2. La aplicación de **dos métodos complementarios** de detección de cambios demostró ser una estrategia robusta: el Método 1 (diferencia de NDVI) proporciona una cuantificación rápida del cambio total de vegetación, mientras que el Método 2 (clasificación multiíndice) permite tipificar específicamente los procesos de urbanización.
3. Entre 2020 y 2024, el área de estudio experimentó una **pérdida de vegetación del 26.96 %** (107.85 ha), de la cual un **4.33 % (17.34 ha) corresponde a urbanización** y el restante 22.63 % a otras formas de degradación vegetal.
4. Los indicadores espectrales muestran **tendencias claras y sostenidas**: el NDVI medio disminuyó 16.7 % mientras que el área urbana estimada prácticamente se duplicó, pasando de 15 % a 25 % de la superficie estudiada.
5. El **dashboard interactivo** desarrollado con Streamlit constituye una herramienta accesible para que usuarios no especializados exploren los resultados mediante mapas, gráficos y opciones de descarga de datos.
6. La metodología desarrollada es **reproducible y transferible**, pudiendo aplicarse a otras comunas chilenas para el monitoreo sistemático de cambios territoriales.

7. Referencias Bibliográficas

1. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309-317.
2. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594.
3. Zhu, Z. (2017). Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, pre-processing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 370-384.
4. Kennedy, R.E., Yang, Z., & Cohen, W.B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2897-2910.
5. SERNAGEOMIN (2008). Erupción del volcán Chaitén: Informes técnicos y cronología del evento. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile.
6. Copernicus Data Space Ecosystem. Disponible en: <https://dataspace.copernicus.eu/>

7. IDE Chile - Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile. Disponible en: <https://www.ide.cl/>

A. Estructura del Repositorio de Código

El código fuente completo del proyecto se encuentra organizado de la siguiente manera:

```
Lab2GeoInformatica/  
+-- data/  
|   +-- raw/sentinel_series/  
|   +-- processed/  
|   +-- vector/  
+-- notebooks/  
|   +-- 01_descarga_datos.ipynb  
|   +-- 02_calculo_indices.ipynb  
|   +-- 03_deteccion_cambios.ipynb  
|   +-- 04_analisis_zonal.ipynb  
|   +-- 05_visualizacion.ipynb  
+-- scripts/  
|   +-- download_sentinel_series.py  
|   +-- calculate_indices.py  
|   +-- detect_changes.py  
|   +-- zonal_analysis.py  
|   +-- create_animation.py  
+-- app/  
|   +-- app.py  
+-- outputs/  
|   +-- animacion_ndvi.gif  
|   +-- animacion_ndbi.gif  
+-- docs/  
|   +-- informe_final.tex  
+-- requirements.txt  
+-- README.md
```