

SSPECTRA: PROPOSICIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE DETECCIÓN DE CAMBIOS Y OBJETOS EN IMÁGENES SATELITALES PARA LA VIGILANCIA FRONTERIZA¹

JONATHAN ENRIQUE RUIZ APABLAZA²

Resumen: *la vigilancia de fronteras enfrenta crecientes desafíos que requieren innovación tecnológica. Este estudio presenta SSPECTRA, un sistema prototipo basado en inteligencia artificial que combina detección de cambios bitemporales mediante redes siamesas y detección de objetos con modelos YOLO aplicados a imágenes satelitales. El desarrollo, aún experimental, fue validado con conjuntos de datos públicos (LEVIR-CD, xView), demostrando factibilidad técnica para identificar modificaciones en el terreno y vehículos en zonas extensas. Como proyecto institucional del Instituto Geográfico Militar (IGM) del Ejército de Chile, SSPECTRA podría integrarse en el Sistema Integrado de Frontera (SIFRON), generando alertas tempranas de alto valor para la seguridad fronteriza y constituyendo un aporte tecnológico de desarrollo nacional.*

Palabras clave: *vigilancia fronteriza, imágenes satelitales, detección de cambios, detección de objetos, inteligencia artificial.*

Abstract: *Border surveillance faces growing challenges that demand technological innovation. This study presents SSPECTRA, a prototype system based on artificial intelligence that integrates bi-temporal change detection using Siamese networks and object detection with YOLO models applied to satellite imagery. The development, still experimental, was validated with public datasets (LEVIR-CD, xView), showing technical feasibility to identify terrain modifications and vehicles across extensive areas. As an institutional project of the Instituto Geográfico Militar (IGM) of the Chilean Army, SSPECTRA could be integrated into the Integrated Border System (SIFRON), generating early*

-
- 1 SSPECTRA: Strategic System for Protection, Evaluation and Control of Transboundary Risk with Automation. Sistema desarrollado en el marco institucional del Instituto Geográfico Militar (IGM), organismo dependiente del Ejército de Chile.
 - 2 Analista de Investigación y Desarrollo del Instituto Geográfico Militar (IGM); Docente e Investigador Asociado al Centro de Investigación de Desastres y Gestión Sostenible de Recursos de la Universidad Bernardo O'Higgins (UBO); especialista en proyectos, geomática y sistemas de información geográfica. Ingeniero en Geomensura y Cartografía de la Universidad Bernardo O'Higgins, Magister en Formulación y Evaluación de Proyectos de la Universidad Autónoma de Chile, Master in Business and Administration (MBA) y Master in Project Management (MPM) de la Universidad Isabel I de Castilla de España. Correo electrónico: jrui@igm.cl

alerts of high value for border security and constituting a nationally developed technological contribution.

Keywords: *Border surveillance; satellite imagery; change detection; object detection; artificial intelligence.*

INTRODUCCIÓN

El monitoreo eficaz de zonas fronterizas extensas es fundamental para la seguridad nacional y militar. Tradicionalmente, la vigilancia fronteriza ha requerido el despliegue de personal y recursos significativos; sin embargo, los avances tecnológicos recientes están transformando este ámbito. Gobiernos de distintos países han implementado herramientas de vigilancia aérea y satelital para reforzar el control de sus fronteras.³ Actualmente existen miles de satélites en órbita y muchos de ellos se utilizan con fines de seguridad: monitorear campamentos, detectar construcciones ilegales o identificar rutas irregulares utilizadas en el tránsito transfronterizo.

Estas capacidades han dado lugar al concepto de “frontera inteligente”, en el cual sistemas automatizados de sensores, drones y observación satelital actúan como un muro virtual de alta tecnología en apoyo a las fuerzas de seguridad. En el ámbito militar, dichas tecnologías prometen mejorar la comprensión del entorno al proporcionar información oportuna sobre actividades en zonas remotas o de difícil acceso.

No obstante, la explotación manual de la gran cantidad de datos generados por sensores y satélites presenta serias limitaciones. En escenarios recientes, por ejemplo, analistas de inteligencia han descubierto la presencia de vehículos camuflados en zonas boscosas cercanas a fronteras únicamente tras examinar meticulosamente imágenes satelitales de alta resolución. Este escenario resalta la limitación del factor humano ante el volumen de datos, donde la capacidad del analista para integrar y procesar la información, aunque irremplazable, se ve desbordada por la magnitud de los datos.⁴

La detección de cambios (*Change Detection*, CD) en imágenes de teledetección ha sido identificada como una capacidad clave en múltiples escenarios prácticos, tanto civiles como militares.⁵ Consiste en reconocer las diferencias significativas que ocurren en una misma región

3 PRIVACY INTERNATIONAL. Satellite and Aerial Surveillance for Migration: A Tech Primer. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://privacyinternational.org/explainer/4595/satellite-and-aerial-surveillance-migration-tech-primer>

4 GAETE Moreno, Andrea. Uso del Big Data para el análisis de problemas y la toma de decisiones. *Revista Ensayos Militares*, vol. 5, N° 2, 2019, pp. 115-126. [En línea]. Disponible en: <https://revistaensayosmilitares.cl/index.php/acague/article/view/38>

5 SHI Wenzhong, ZHANG Min, ZHANG Rui, CHEN Shanxiong y ZHAN, Zhao. Change detection based on artificial intelligence: State-of-the-art and challenges. *Remote Sensing*, vol. 12, N° 10, 2020, p. 1688. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs12101688>; YANG Li, CHEN Yining, SONG Shiji, LI, Fan y HUANG Gao. Deep siamese networks based change detection with remote sensing images. *Remote Sensing*, vol. 13, N° 17, 2021, p. 3394. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs13173394>

entre dos o más imágenes tomadas en distintos momentos. En el ámbito civil, esta técnica se ha aplicado exitosamente para evaluar desastres naturales, monitorear la deforestación y actualizar cartografía. En el ámbito militar, juega un papel importante en el reconocimiento estratégico de instalaciones, la detección de construcciones clandestinas y la verificación de cumplimiento de tratados de armamento.

Los métodos clásicos de detección de cambios se basaban en comparativas píxel a píxel entre imágenes –restando una imagen de otra o calculando índices de cambio– seguidas de umbralización para distinguir las zonas modificadas.⁶ Sin embargo, estos enfoques tradicionales enfrentan dificultades ante diferencias sutiles o ruidos, y requieren imágenes bitemporales de alta calidad alineadas casi perfectamente.

El advenimiento del aprendizaje profundo revolucionó el campo de la detección de cambios, permitiendo extraer características más robustas y de alto nivel semántico de las imágenes. Los modelos modernos tratan la detección de cambios como un problema de segmentación semántica binaria: la red recibe un par de imágenes (antes y después) y aprende a resaltar las áreas donde ocurrió un cambio. En particular, las arquitecturas siamesas (*Siamese*) han demostrado gran eficacia: dos ramas de red neuronal convolucional procesan en paralelo las dos imágenes, compartiendo pesos para extraer características comparables, cuyas diferencias se analizan para decidir dónde hay cambios.

Investigaciones recientes han explorado también la incorporación de módulos de *Transformer* de Visión (ViT), arquitecturas que dividen la imagen en parches y analizan sus interacciones para capturar relaciones de larga distancia, mejorando la detección de cambios sutiles en contextos complejos. Tang *et al.* (2024), por ejemplo, propusieron un modelo siamés basado en Swin-Unet que alcanzó resultados prometedores en conjuntos de datos públicos, demostrando el alto potencial de estas técnicas.⁷

Por otro lado, la detección de objetos en imágenes satelitales de alta resolución consiste en identificar y localizar entidades discretas –vehículos, aeronaves, infraestructuras– mediante recuadros delimitadores (*bounding boxes*). Se trata de un campo ampliamente estudiado en visión por computador; no obstante, el contexto aeroespacial presenta desafíos particulares: tamaño pequeño de los objetos, variabilidad de escalas y congestión visual en escenas urbanas o de terreno.

⁶ *Ibidem*, YANG *et al.*, 2021.

⁷ TANG, Yizhuo, CAO, Zhengtao, GUO, Ningbo y JIANG Mingyong. A Siamese Swin-Unet for image change detection. Scientific Reports, vol. 14, art. N° 4577. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54096-8>

Entre los enfoques de detección de objetos, la familia de algoritmos YOLO (*You Only Look Once*) se ha destacado por su eficiencia en tiempo real y alta exactitud.⁸ Introducido originalmente por Redmon *et al.* en 2015, YOLO consolida la detección de objetos en una sola pasada de red neuronal, a diferencia de métodos anteriores basados en propuestas regionales múltiples.

Versiones sucesivas –como YOLOv8 y YOLO-NAS– han incorporado mejoras arquitectónicas significativas, incluyendo redes backbone⁹ más potentes y estrategias avanzadas de aumento de datos (data augmentation). Estudios han demostrado que, con el entrenamiento apropiado, estos algoritmos pueden lograr sobre un 84% de precisión en la identificación de objetos en imágenes aéreas de satélite.¹⁰ En contextos militares, esto significa que un modelo bien entrenado podría localizar vehículos, embarcaciones o aeronaves en imágenes de reconocimiento con alto grado de acierto, inclusive en condiciones de camuflaje o con objetos de tamaño reducido.

Considerando estos avances, el proyecto SSPECTRA –desarrollado en el marco institucional del Instituto Geográfico Militar (IGM),¹¹ organismo dependiente del Ejército de Chile– se planteó integrar ambas capacidades en un solo sistema de vigilancia automatizada a partir de imágenes satelitales. El sistema apunta a mejorar las capacidades militares de reconocimiento y vigilancia estratégica, permitiendo alertas tempranas ante situaciones como: la construcción súbita de infraestructuras en zonas fronterizas, cambios significativos en el terreno que pudieran indicar preparativos militares o actividades ilícitas, o la presencia inusual de vehículos y equipamiento en puntos estratégicos.

Esto contribuiría directamente al alistamiento operacional de la Fuerza Terrestre y, en particular, al fortalecimiento del Sistema Integrado de Frontera (SIFRON),¹² iniciativa estratégica del Estado de Chile que desde 2023 integra tecnología avanzada y despliegue de las Fuerzas Armadas para controlar los más de 1.055 kilómetros de frontera norte del país. Como producto de desarrollo nacional, SSPECTRA fomentaría además el crecimiento tecnológico institucional al desarrollar competencias propias en análisis automatizado de imágenes satelitales.

8 REDMON, Joseph, DIVVALA, Santosh, GIRSHICK, Ross y FARHADI, Ali. You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 779-788. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7780460>

9 Red backbone: estructura de red neuronal convolucional profunda que actúa como extractor de características visuales de propósito general (p. ej., ResNet, EfficientNet). Sobre ella se añaden capas adicionales especializadas en la tarea de detección.

10 ADEGUN, Adewole A.; DOMBEU, Jean Vincent Fonou; VIRIRI, Serestina y ODINDI, John. State-of-the-Art Deep Learning Methods for Objects Detection in Remote Sensing Satellite Images. *Sensors*, vol. 23, N° 13, 2023, p. 5849. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s23135849>

11 El Instituto Geográfico Militar (IGM) es un organismo dependiente del Ejército de Chile, servicio oficial y técnico del Estado en materia geográfica y cartográfica desde 1922. Cuenta con profesionales especializados en Geografía, Cartografía, Geodesia, Fotogrametría y Procesamiento de Imágenes. En 2024 fue reconocido como socio oficial de UN Global Geodetic Centre of Excellence (UN-GGCE). [En línea]. Disponible en: <https://www.igm.cl>

12 MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL (MDN). Sistema Integrado de Frontera (SIFRON). Iniciado en 2023, con inversión de 13 millones de dólares. Contempla drones, cámaras térmicas, puestos de observación fronteriza (POF) y comunicación satelital en tiempo real. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.com/chile/chile-refuerza-frontera-norte-tecnologia-sistema-sifron>

Finalmente, precisando la importancia del proyecto SSPECTRA, ella está dada por una investigación y desarrollo de carácter institucional impulsado desde el IGM, que busca proporcionar al Estado chileno, sus Fuerzas Armadas, Carabineros y organismos de control fronterizo una herramienta de análisis satelital automatizada de producción nacional. Su valor radica en la soberanía tecnológica que otorga: a diferencia de soluciones comerciales extranjeras, SSPECTRA se diseña con las particularidades del territorio y las necesidades operacionales chilenas. El sistema tiene potencial de doble uso (militar y civil), pudiendo apoyar además el monitoreo de desastres naturales, deforestación y actualización cartográfica –áreas de competencia directa del IGM.

I. ESTADO DEL ARTE GLOBAL EN TELEDETECCIÓN Y APRENDIZAJE PROFUNDO

La convergencia de la teledetección con el aprendizaje profundo (*Deep Learning*) ha marcado el estado del arte en el monitoreo geoespacial, impulsando las capacidades de Detección de Cambios (CD) y Detección de Objetos (OD), elementos clave del proyecto SSPECTRA.

1. Detección de Cambios (*Change Detection, CD*)

El campo de la Detección de Cambios ha evolucionado significativamente, superando los métodos tradicionales de comparación a nivel de píxel.¹³

a) Arquitecturas de redes neuronales

Las Redes Convolucionales Siamesas (SCNN, *Siamese Convolutional Neural Networks*) y sus variantes son el estándar de facto en detección de cambios. Estas arquitecturas procesan de manera independiente, pero con pesos compartidos, el par de imágenes multitemporales. Esto asegura que se extraigan características comparables y robustas a las variaciones de iluminación o sensores, enfocándose puramente en las diferencias del paisaje.¹⁴

b) Segmentación semántica para CD

La tendencia actual trata la detección de cambios como un problema de segmentación semántica binaria (cambio/no-cambio), utilizando modelos como UNet y sus extensiones siamesas. Estos modelos no solo indican que ha habido un cambio, sino que también delimitan con precisión el área afectada.

¹³ YANG *et al.*, 2021, *op. cit.*

¹⁴ SHI *et al.*, 2020, *op. cit.*

c) Enfoques con Transformer

Los Transformers de Visión (*ViT*, *Vision Transformers*) están ganando terreno debido a su capacidad para modelar dependencias de larga distancia en la imagen.¹⁵ Esto resulta crucial en imágenes satelitales extensas, permitiendo al modelo considerar el contexto amplio de un cambio –por ejemplo, la aparición de una estructura en relación con caminos cercanos o patrones de asentamiento– lo que mejora la detección de cambios sutiles y distribuidos.

2. Detección de Objetos (*Object Detection*, *OD*)

En cuanto a la localización y clasificación de entidades específicas, el uso de imágenes satelitales presenta retos únicos: objetos pequeños, variabilidad de escala y orientación arbitraria.

a) La familia de algoritmos YOLO

La familia de algoritmos YOLO sigue dominando las soluciones de detección en tiempo real debido a su alta velocidad y precisión. Versiones más recientes, como YOLOv8 o YOLO-NAS, han introducido mejoras arquitectónicas –redes backbone más potentes y estrategias de data augmentation mejoradas– que resultan en un mejor rendimiento, especialmente en la detección de objetos pequeños típicos en imágenes aéreas y satelitales.¹⁶

b) Objetos con orientación (*OBB*)

Dado que los objetos en imágenes satelitales –vehículos, aeronaves– suelen aparecer con cualquier orientación, el estado del arte se ha desplazado hacia modelos que predicen recuadros delimitadores orientados (*Oriented Bounding Boxes*, *OBB*), en lugar de los tradicionales rectángulos horizontales. Esto reduce el ruido de fondo y mejora la precisión en escenas congestionadas.

c) Detección de “*Dark Vessels*”

En el ámbito marítimo, un área de intensa investigación militar y de seguridad es la detección de buques que apagan su Sistema de Identificación Automática (AIS), conocidos como “*Dark Vessels*”, combinando modelos de aprendizaje profundo –incluyendo Transformers para predicción de ruta– con imágenes satelitales ópticas o de radar (SAR).¹⁷

¹⁵ TANG *et al.*, 2024, *op. cit.*

¹⁶ LAM *et al.*, 2018, *op. cit.*, REDMON *et al.*, 2016, *op. cit.*

¹⁷ DÍEZ; Benito, MOREU Enrique; GAMAZO, José María; CIRUELO Sanz, Luis; CHAPARRO Parra, Victor; NARANJO, Martínez, Manuel y GÓMEZ-ESPINOSA Martín, Roberto. Implementación de un sistema basado en Deep Learning para la detección de dark vessels en imagen satelital a través de la predicción de ruta. SEDA. 2024. [En línea]. Disponible en: https://seda.hi-iberia.es/wp-content/uploads/2024/11/DetectorDe_DarkVessels_v1.4-1.pdf

3. Sistemas similares en otras fuerzas armadas

La propuesta de SSPECTRA se enmarca en una tendencia global de incorporar inteligencia artificial para el análisis automatizado de imágenes satelitales con fines militares y de seguridad. A continuación, se sintetizan los sistemas más relevantes desarrollados por otras fuerzas armadas:

Estados Unidos - Project Maven: Lanzado en 2017 por el Departamento de Defensa de EE.UU., aplica visión artificial al análisis automatizado de imágenes de drones y satélites para mejorar la denominada “cadena de ataque” (Kill Chain). El presupuesto de inteligencia artificial del Pentágono alcanzó aproximadamente 1.800 millones de dólares en el ejercicio fiscal 2024, lo que refleja el alto nivel de inversión en estas capacidades.¹⁸

España - Análisis de Imágenes por IA (AIIA): Las Fuerzas Armadas españolas desarrollaron el proyecto AIIA, que emplea redes neuronales convolucionales para la identificación de amenazas en tiempo real a partir de imágenes satelitales. El sistema se integra en la arquitectura C4ISR (Comando, Control, Comunicación, Computación, Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento) para la toma de decisiones operacionales.¹⁹

Brasil - Amazonia SAR: El Ejército de Brasil emplea el sistema Amazonia SAR (*Synthetic Aperture Radar*) para el monitoreo de actividades ilegales en la Amazonía, generando mapas de imágenes satelitales que calculan índices de deforestación desde 2004 y permiten detectar actividades transfronterizas en zonas selváticas de difícil acceso.²⁰

A diferencia de estos sistemas, desarrollados por potencias de mayor presupuesto y con apoyo de grandes empresas tecnológicas (Maxar, Planet Labs, Palantir), SSPECTRA representa una iniciativa de desarrollo nacional, adaptada a las condiciones geográficas particulares de Chile y orientada a las capacidades institucionales del IGM. Esto le otorga un valor estratégico adicional en términos de soberanía tecnológica y adaptabilidad a las necesidades operacionales del Ejército de Chile.

18 El Departamento de Defensa de EE. UU. lanzó en 2017 el Project Maven, programa que aplica visión artificial al análisis automatizado de imágenes satelitales y de drones para acelerar la identificación de objetivos en el campo de batalla. El presupuesto de inteligencia artificial del Pentágono alcanzó aproximadamente 1.800 millones de dólares en el año fiscal 2024. Ver: [En línea]. Disponible en: <https://ts2.tech/es/como-la-ia-esta-remodelando-el-futuro-de-la-guerra-lo-que-necesitas-saber-ahora/>

19 Las fuerzas armadas españolas desarrollaron el proyecto de Análisis de Imágenes por IA (AIIA), que emplea redes neuronales convolucionales para la identificación de amenazas en tiempo real a partir de imágenes satelitales, integrado en sistemas C4ISR (Comando, Control, Comunicación, Computación, Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento). Ver: [En línea]. Disponible en: <https://tabladacentenariaaviacion.es/innovacion-tecnologica-en-las-fuerzas-armadas-espanolas-desde-satelites-a-inteligencia-artificial/>

20 Brasil emplea el sistema Amazonia SAR (*Synthetic Aperture Radar*) para el monitoreo de actividades ilegales en la Amazonía, generando mapas de imágenes satelitales que calculan el índice de deforestación desde 2004. Ver: ARMENTERAS, D. *et al.* (2016), citado en innovaciones tecnológicas en las fuerzas militares de los países del mundo. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4762/476268162010/html/>

4. Integración de Capacidades (CD y OD)

El enfoque de SSPECTRA de integrar CD y OD en un sistema único refleja una frontera actual en la investigación aplicada. Más allá de las aplicaciones civiles de monitoreo ambiental o urbano,²¹ los sistemas avanzados de vigilancia combinan estas capacidades para generar alertas inteligentes. La detección de un cambio de terreno súbito (CD), seguida de la localización y clasificación de objetos (OD) en esa nueva área, ofrece un nivel superior de conciencia situacional, esencial para tareas de reconocimiento estratégico y verificación de cumplimiento de acuerdos.

La tendencia global se orienta hacia la fusión de datos de múltiples sensores (ópticos, SAR, hiperspectrales) y diferentes resoluciones (Sentinel-2, imágenes de alta resolución comercial) para aumentar la robustez del sistema ante condiciones climáticas adversas o camuflaje.²² Este contexto confirma que la integración propuesta por SSPECTRA está alineada con el estado del arte mundial en aplicación de inteligencia artificial para el análisis automatizado de imágenes satelitales en contextos de seguridad y defensa.

II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

El desarrollo de SSPECTRA se realizó en torno a dos módulos principales, correspondientes a las tareas de detección de cambios (CD) y detección de objetos (OD). A continuación, se detalla la implementación de cada módulo, los datos empleados para su entrenamiento y validación, así como la forma en que se integraron conceptualmente dentro del sistema global.

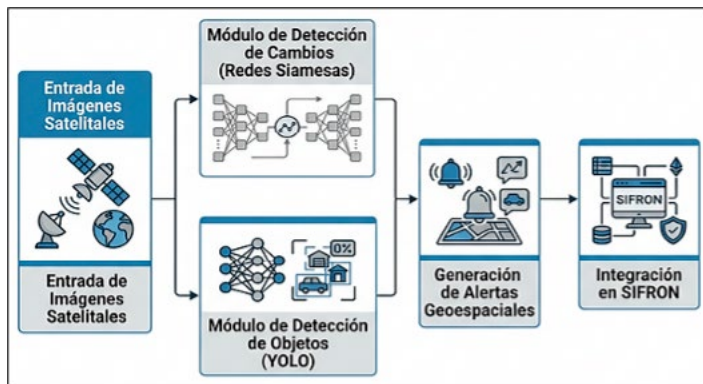


Figura N°1: Arquitectura conceptual del sistema SSPECTRA.

Fuente: Elaboración propia.

21 EO DATA ANALYTICS. Detección de cambios: cuándo usarla y ejemplos prácticos. 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/deteccion-de-cambios/>

22 FLYPIX AI. Comprensión de los datos satelitales en tiempo real y su impacto. 18 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://flypix.ai/es/blog/real-time-satellite-data/>

1. Módulo de Detección de Cambios (CD)

Para detectar cambios entre imágenes satelitales de distintas fechas se implementó un modelo de red neuronal de arquitectura siamesa. En concreto, se utilizó un diseño inspirado en enfoques recientes basados en Transformer y U-Net siamés:²³ cada imagen bitemporal (antes y después) se procesa por un mismo codificador neuronal (compartiendo pesos) que extrae sus características visuales; luego, se calcula una representación de diferencia entre las características de ambas imágenes, la cual se pasa a un decodificador tipo U-Net para obtener un mapa de cambios segmentado (imagen binaria donde los píxeles cambiados aparecen marcados). Este enfoque aprovecha la capacidad de la red de aprender directamente de ejemplos acerca de cuáles diferencias son relevantes, tratándolo como un problema de segmentación de cambios.²⁴

Para el entrenamiento y prueba del módulo se recurrió al conjunto de datos público LEVIR-CD, un benchmark abierto para detección de cambios en construcciones civiles, introducido por Chen y Shi (2020).²⁵ Contiene 637 pares de imágenes satelitales de muy alta resolución (0,5 m por píxel) centradas en áreas urbanas antes y después de desarrollos inmobiliarios, con máscaras que indican dónde se construyeron o demolieron edificaciones. Cada imagen tiene un tamaño de 1024 × 1024 píxeles.

El modelo se entrenó con técnicas de aprendizaje supervisado, minimizando una función de pérdida de tipo entropía cruzada entre la máscara predicha y la real, utilizando el optimizador AdamW en un ambiente PyTorch. Debido a restricciones de hardware, se optó por un tamaño de imagen de entrada moderado (256×256 píxeles) y un batch size pequeño, acumulando gradientes para compensar.

Las métricas de evaluación se calculan a nivel de píxel, dada la naturaleza de segmentación del problema, y se basan en la Matriz de Confusión:

- Verdadero Positivo (VP): Píxel de cambio detectado correctamente.
- Falso Positivo (FP): Píxel clasificado como cambio, pero que en realidad no cambió.
- Falso Negativo (FN): Píxel de cambio que el modelo no detectó.

Las métricas aplicadas son: (i) Precisión ($P = VP / (VP + FP)$): proporción de alertas correctas; (ii) Recuperación ($R = VP / (VP + FN)$): proporción de cambios reales detectados; (iii) Medida F1 = $2 \cdot P \cdot R / (P + R)$: balance entre ambas; e (iv) Índice IoU = $VP / (VP + FP + FN)$: solapamiento entre la máscara predicha y la real.

²³ TANG *et al.*, 2024, *op. cit.*

²⁴ YANG *et al.*, 2021, *op. cit.*

²⁵ CHEN, Hao, y SHI, Zhenwei. spatial-temporal attention-based method and a new dataset for remote sensing image change detection. *Remote Sensing*, vol. 12, N° 10, 1662, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs12101662>

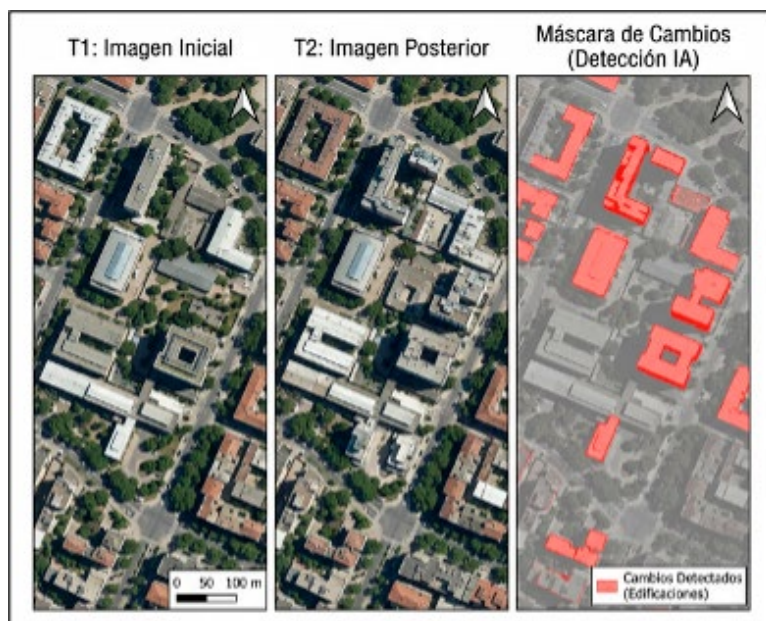


Figura N°2: Modelo de detección de cambios aplicado a imágenes satelitales.

Fuente: Elaboración propia.

2. Módulo de Detección de Objetos (OD)

El segundo componente de SSPECTRA se enfocó en la identificación de objetos de interés militar dentro de imágenes satelitales de alta resolución. Dado el énfasis en vigilancia terrestre, se seleccionó el tráfico vehicular y el equipamiento móvil como los principales objetivos a detectar (vehículos militares ligeros, camiones de transporte, buses, tanques, entre otros). Para esta tarea se utilizó un detector de la familia YOLO, reconocido por su equilibrio entre rapidez y precisión.²⁶

En particular, se empleó un modelo YOLO preentrenado de tamaño reducido (YOLO nanométrico) como punto de partida, afinándolo posteriormente (*fine-tuning*) con datos de imágenes satelitales etiquetadas. Para ello se aprovechó el conjunto de datos público xView (2018),²⁷ uno de los mayores corpus abiertos de imágenes satelitales anotadas. Contiene imágenes capturadas por satélites *WorldView-3* con resolución espacial de ~0,3 m por píxel, cubriendo aproximadamente 1.400 km² e incorporando más de 1 millón de instancias de objetos en 60 categorías distintas.

²⁶ REDMON *et al.*, 2016, *op. cit.*,

²⁷ LAM *et al.* (xView), 2018, *op. cit.*

Para los fines de SSPECTRA, se filtraron del xView aquellas clases relevantes a vehículos terrestres, agrupándolas en diez categorías (automóvil pequeño, camioneta pick-up, autobús, camión utilitario, camión de carga, camión con contenedor, cabeza de camión tractor, camión con plataforma, camión cisterna, entre otros). El modelo fue entrenado con estas etiquetas adaptadas, utilizando un tamaño de entrada de imagen de 640×640 píxeles y realizando aumentos de datos (rotaciones, inversiones y escalados aleatorios) para robustecer la detección.

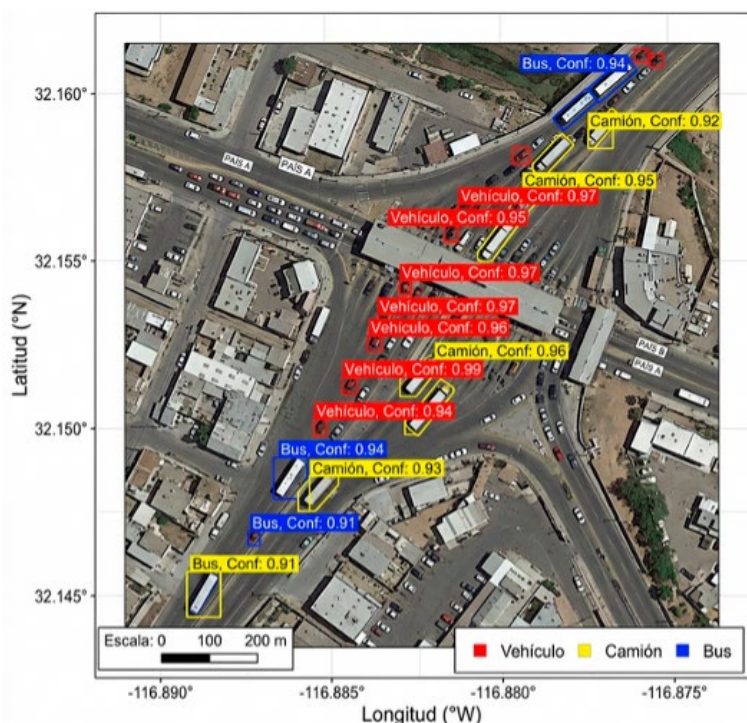


Figura N°3: Modelo de detección de objetos aplicado a imágenes satelitales.

Fuente: Elaboración propia

3. Integración y Flujo de Trabajo

Aunque los módulos CD y OD se desarrollaron y evaluaron por separado en esta fase, el concepto de SSPECTRA es que operen de forma complementaria sobre imágenes satelitales entrantes. En un escenario operacional, el flujo previsto es el siguiente: a medida que nuevas imágenes de un área fronteriza son adquiridas, el módulo de detección de cambios las compara con imágenes previas de la misma zona para identificar lugares con modificaciones recientes. Esos puntos calientes detectados son entonces analizados por el módulo de detección de objetos, el cual buscaría vehículos, equipos o instalaciones en esas ubicaciones y sus alrededores. El resultado es una alerta georreferenciada que puede integrarse directamente en los sistemas de mando y control del SIFRON.



Figura N°4: Diagrama de flujo operacional de SSPECTRA.

Fuente: Elaboración propia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al encontrarse el proyecto en fase experimental y a la espera de recursos para la infraestructura de hardware necesaria, los resultados cuantitativos obtenidos hasta el momento son preliminares. No obstante, se lograron demostrar las funcionalidades básicas de ambos módulos en entornos controlados con datos de referencia, lo que valida la viabilidad técnica de la propuesta.

En el módulo de detección de cambios, la red siamesa entrenada sobre LEVIR-CD identificó correctamente las áreas de construcción o demolición en la mayoría de los pares de imágenes de prueba. Las máscaras de cambios generadas mostraron alta correspondencia con las referencias reales (*ground truth*) en edificios de tamaño medio a grande, presentando omisiones en cambios minúsculos y detecciones falsas en regiones con sombras pronunciadas o diferencias de iluminación entre las imágenes bitemporales.

En cuanto al módulo de detección de objetos, los resultados iniciales mostraron que el modelo YOLO afinado con datos de xView alcanzó una precisión moderada en la identificación de vehículos en escenas satelitales. El detector reconoció correctamente vehículos grandes (camiones y autobuses) con altas probabilidades, y detectó vehículos más pequeños con menor confianza. La métrica mAP@0,5 (precisión promedio a umbral IoU 0,5) obtenida rondó valores en el orden de 0,50-0,60 en las clases principales, razonable considerando que no se agotó el proceso de optimización del modelo debido a las limitaciones de hardware.

IV. LIMITACIONES

Como todo desarrollo en etapa inicial, SSPECTRA enfrenta varias limitaciones que deben reconocerse y abordarse en futuros trabajos:

a) Datos de entrenamiento representativos. Los modelos se entrenaron con conjuntos de datos genéricos (LEVIR-CD, xView) que, si bien son relevantes, no reflejan necesariamente

las condiciones exactas de la zona fronteriza de interés. La falta de datos reales anotados del teatro de operaciones limita la capacidad de ajustar los algoritmos al caso de uso específico.

b) Infraestructura computacional. El entrenamiento de modelos profundos demanda recursos significativos de cómputo (GPUs de alta gama, gran memoria RAM), recursos con los que no se cuenta plenamente en esta fase experimental. Fue necesario utilizar modelos de tamaño reducido y entrenarlos con menos épocas de las ideales, lo que repercute en la precisión final. El proyecto se encuentra actualmente en espera de recursos para adquirir la infraestructura necesaria.

c) Resolución y frecuencia de imágenes. La efectividad de SSPECTRA depende de imágenes satelitales de alta resolución espacial (<1 m/píxel) y de una frecuencia temporal adecuada. En una primera instancia, el sistema está pensado para utilizar fuentes de acceso libre (*open source*), lo que podría limitar parcialmente la eficacia en comparación con datos comerciales de muy alta resolución. La definición de un proveedor de imágenes –tanto libre como comercial– es una tarea pendiente para el despliegue operacional.

d) Detecciones falsas y capacitación del usuario. Como todo sistema automatizado, SSPECTRA puede generar falsos positivos y falsos negativos. Los analistas humanos deben estar entrenados para interpretar las salidas del sistema críticamente, validando las alertas con otras fuentes de información.

e) Integración en la cadena de mando. Más allá de la tecnología, queda la tarea de integrar SSPECTRA en los procesos de inteligencia militar existentes. Esto incluye adaptar formatos de reporte, asegurar que el sistema pueda recibir nuevas imágenes y difundir alertas en tiempo real a las unidades correspondientes, así como mantener la seguridad de la información analizada.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el desarrollo inicial de SSPECTRA, un sistema basado en inteligencia artificial para la vigilancia transfronteriza mediante imágenes satelitales, concebido como un proyecto de desarrollo tecnológico nacional impulsado desde el Instituto Geográfico Militar (IGM) del Ejército de Chile. Se implementaron y evaluaron dos módulos complementarios: uno de detección de cambios bitemporales en el terreno y otro de detección de objetos móviles (vehículos) en imágenes de alta resolución. Trabajando en conjunto, estos componentes permitirían identificar rápidamente tanto alteraciones físicas en la frontera como la presencia de unidades móviles no autorizadas, aportando una capacidad de alerta temprana de gran valor para la seguridad militar y la gestión del Estado.

El valor estratégico de SSPECTRA reside, entre otros aspectos, en su potencial de integrarse con el Sistema Integrado de Frontera (SIFRON), que desde 2023 opera en la macrozona norte con una

inversión de 13 millones de dólares y ha logrado reducir los ingresos irregulares en casi un 50% respecto al período previo a su implementación. SSPECTRA podría complementar este ecosistema con capacidad de análisis satelital automatizado, incorporando una capa de inteligencia geoespacial que actualmente no está disponible en el sistema.

Además de su utilidad para las Fuerzas Armadas, Carabineros y organismos de control fronterizo, el sistema tiene vocación de doble uso (militar y civil), pudiendo apoyar tareas de cartografía actualizada, monitoreo de desastres naturales y control de deforestación, áreas de competencia directa del IGM.

Aunque el sistema se encuentra en fase experimental y los resultados obtenidos sobre datos de referencia son preliminares, confirman la factibilidad de la aproximación. Apoyándose en técnicas de aprendizaje profundo, SSPECTRA pudo aprender patrones complejos de cambio e identificar objetos pequeños en escenas abarrotadas, tareas que tradicionalmente requerían mucha dedicación de analistas humanos.

Quedan importantes pasos por delante: refinar los modelos con datos satelitales reales de la frontera objetivo, escalar la infraestructura computacional para entrenar modelos más precisos, y robustecer la integración de ambos módulos en un flujo de trabajo unificado. Con las inversiones adecuadas en datos, tecnología e infraestructura, SSPECTRA podría convertirse en el corto plazo en un complemento tecnológico de alto valor para la vigilancia continua de fronteras y otras zonas estratégicas del país, representando un aporte concreto de la institución al desarrollo científico y tecnológico nacional en el ámbito de la defensa.

BIBLIOGRAFÍA

ADEGUN, Adewole A.; DOMBEU, Jean Vincent Fonou; VIRIRI, Serestina y ODINDI, John. State-of-the-Art Deep Learning Methods for Objects Detection in Remote Sensing Satellite Images. *Sensors*, vol. 23, N° 13, 2023, p. 5849. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s23135849>

CHEN, Hao y SHI, Zhenwei. A spatial-temporal attention-based method and a new dataset for remote sensing image change detection. *Remote Sensing*, vol. 12, N° 10, 2020, p. 1662. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs12101662>

DÍEZ, Benito Enrique; MOREU Gamazo, José María; CIRUELO Sanz, Luis; CHAPARRO Parra, Víctor; NARANJO Martínez, Manuel y GÓMEZ-ESPINOSA Martín, Roberto. Implementación de un sistema basado en Deep Learning para la detección de dark vessels en imagen satelital a través de la predicción de ruta. SEDA. 2024. Disponible en: https://seda.hi-iberia.es/wp-content/uploads/2024/11/DetectorDe_DarkVessels_v1.4-1.pdf

- EO DATA ANALYTICS. Detección de cambios: cuándo usarla y ejemplos prácticos. 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/deteccion-de-cambios/>
- FLYPIX AI. Comprensión de los datos satelitales en tiempo real y su impacto. 18 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://flypix.ai/es/blog/real-time-satellite-data/>
- GAETE Moreno, Andrea. Uso del Big Data para el análisis de problemas y la toma de decisiones. *Revista Ensayos Militares*, vol. 5, N° 2, 2019, pp. 115-126. [En línea]. Disponible en: <http://revistaensayosmilitares.cl/index.php/acague/article/view/38>
- LAM, Darius; KUZMA, Richard; MCGEE, Kevin; DOOLEY, Samuel; LAIELLI, Michael; KLARIC, Matthew; BULATOV, Yaroslav y MCCORD, Brendan. xView: Objects in context in overhead imagery. *arXiv preprint arXiv:1802.07856*. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1802.07856>
- MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL DE CHILE. Sistema Integrado de Fronteras (SIFRON). 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.com/chile/chile-refuerza-frontera-norte-tecnologia-sistema-sifron>
- PRIVACY INTERNATIONAL. Satellite and Aerial Surveillance for Migration: A Tech Primer. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://privacyinternational.org/explainer/4595/satellite-and-aerial-surveillance-migration-tech-primer>
- REDMON, Joseph; DIVVALA, Santosh; GIRSHICK, Ross y FARHADI, Ali. You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 779-788. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
- SHI, Wenzhong; ZHANG, Min; ZHANG, Rui; CHEN, Shankang y ZHAN, Zhao. Change detection based on artificial intelligence: State-of-the-art and challenges. *Remote Sensing*, vol. 12, N° 10, 2020, p. 1688. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs12101688>
- TANG, Yizhuo; CAO, Zhengtao; GUO, Ningbo y JIANG, Mingyong. A Siamese Swin-Unet for image change detection. *Scientific Reports*, vol. 14, 2024, p. 4577. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54096-8>
- YANG, Li; CHEN, Yining; SONG, Shiji; LI, Fan y HUANG, Gao. Deep siamese networks based change detection with remote sensing images. *Remote Sensing*, vol. 13, N° 17, 2021, p. 3394. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs13173394>