Toledo, M.J. & Parra, J.I. (2024). Uso de fotografías y algoritmos clasificadores para detectar avance de obra en partidas de terminaciones en edificaciones. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción* (IX ELAGEC2024).

USO DE FOTOGRAFÍAS Y ALGORITMOS CLASIFICADORES PARA DETECTAR AVANCE DE OBRA EN PARTIDAS DE TERMINACIONES EN EDIFICACIONES

Mauricio Javier Toledo [1] – mauricio.toledo@unab.cl

Juan Ignacio Parra [1] – j.parramuoz1@uandresbello.edu

[1]Ingeniería Civil, Universidad Andres Bello, Santiago, Chile

RESUMEN

Actualmente, el control de avance en partidas de terminación en construcción se realiza manualmente, lo que toma mucho tiempo, es subjetivo y propenso a errores. Un control preciso y bien documentado es esencial para el éxito de cualquier proyecto. La tecnología de Machine Learning puede mejorar significativamente este proceso al eliminar la subjetividad y reducir los errores. Proponemos una metodología para medir el avance en partidas de terminación en edificaciones utilizando el algoritmo ResNet50 y fotografías obtenidas con cámaras de celular y GoPro MAX 360°. La metodología incluye un entrenamiento preliminar capturando fotografías de la instalación de tabiquería en sus cinco procesos. Procesamos las imágenes con ResNet50 para asignar a cada elemento su estado correspondiente. Aplicamos esta metodología en un caso de estudio, analizando las fotografías capturadas y asociándolas a la cantidad de obra para determinar el progreso. Generamos fichas de avance detalladas, mejorando la documentación y precisión. Los resultados del entrenamiento con ResNet50 mostraron una precisión del 94%, permitiendo una asignación confiable del estado de terminación. Validamos la metodología con encuestas a profesionales de terreno y estudiantes de ingeniería civil, obteniendo una positiva evaluación promedio de 3,5 en una escala de Likert de 1 a 4.

PALABRAS CLAVE

Control de avance; machine learning; clasificadores; terminaciones; ResNET; inteligencia artificial; construcción.

INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, el seguimiento y control del avance de obra implican supervisar y evaluar el progreso de los proyectos (Kopsida et al., 2015). Los métodos tradicionales, que dependen de inspecciones visuales manuales, resultan lentos y poco documentados, lo que puede llevar a estimaciones subjetivas y errores (Golparvard-Fard et al., 2009; Zavadskas et al., 2014; Elazouni & Abdel-Wahhab, 2017). La precisión y la documentación en el control de partidas de terminación son cruciales, especialmente en entornos interiores (Hamledari et al., 2017). La industria está adoptando nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial, para mejorar la documentación y precisión en la construcción (Baduge et al., 2022). Tecnologías como drones y teléfonos inteligentes han impactado significativamente el monitoreo del progreso (Arif & Khan, 2021). Proyectos recientes han comenzado a utilizar estas tecnologías inteligentes (Zhang et al., 2009) para el seguimiento automático del avance, desde instalaciones fuera de sitio (Martínez et al., 2021) hasta el uso en el sitio de construcción (Kim, 2020), destacando el uso de imágenes para detectar el avance en paneles de yeso (Xu et al., 2021). El desarrollo de la inteligencia artificial, especialmente el Machine Learning, está revolucionando la construcción al permitir la automatización en el seguimiento del avance (Xu et al., 2021).

La revisión de literatura muestra que los métodos actuales de control de avance aún dependen en gran medida de inspecciones manuales, lo que resulta en procesos lentos y propensos a errores (Kopsida et al., 2015). Sin embargo, la fotogrametría y el uso de imágenes para generar nubes de puntos 3D están mejorando la precisión del control (Braun et al., 2018; Yang et al., 2015; Mahami et al., 2019). Algunos autores proponen el uso de fotografías para automatizar el control de avance con modelos 3D y 4D (Roh et al., 2011; Kropp et al.,2018). La inteligencia artificial, incluyendo algoritmos como ResNet50, está siendo utilizada para automatizar la detección y el seguimiento del progreso en la construcción (Pal et al., 2022; Martínez et al., 2021). Investigaciones recientes también han demostrado que el uso de UAV para capturar fotografías y clasificarlas con CNN o YOLOv5 puede ofrecer una alta precisión en la estimación del avance (Rosas, 2021; Martínez, 2020).

Este trabajo se enfoca en determinar el avance en las partidas de terminación de instalación de tabiquería, abarcando los cinco procesos asociados: (i) instalación primera cara, (ii) instalación eléctrica y sanitaria, (iii) instalación de refuerzos, (iv) instalación segunda cara, y (v) Empaste. La investigación tiene como objetivo desarrollar una metodología basada en Machine Learning para evaluar el avance mediante fotografías capturadas con cámaras de celular y GoPro MAX 360°. Los objetivos específicos incluyen: (i) Capturar fotografías de la tabiquería en sus distintos procesos constructivos, (ii) Entrenar y evaluar algoritmos de Machine Learning, (iii) Utilizar el algoritmo seleccionado para detectar elementos en la tabiquería y controlar el avance, (iv) Comparar los tiempos de la metodología actual con la propuesta, (v) Generar fichas de avance por departamento y piso, y (vi) Validar la metodología.

METODOLOGÍA

Para esta investigación, organizamos el trabajo siguiendo el CIFE Horseshoe (Fischer, 2006) y dividimos en 4 etapas las actividades de investigación: (i) Revisión de la Literatura para buscar investigaciones previas relacionadas con el control de avance actual en la construcción, experiencias previas en el uso de imágenes en el control de avance de la construcción, y la aplicación de algoritmos de Machine Learning para el control de avance en construcción; (ii) Entrenamiento Preliminar para evaluar el desempeño de los sensores (cámaras) y algoritmos clasificadores. Para ello, escogimos un caso de estudio para definir el proceso a estudiar (instalación de tabiques) y testear el sensor más adecuado para capturar fotografías del avance (cámara celular y GoPro Max). Testeamos también el desempeño de algoritmos detectores (GoogleNet y ResNet50); (iii) Selección de un caso de estudio para desarrollar una propuesta preliminar que incluye la metodología para capturar fotografías, entrenar el algoritmo clasificador, determinar el estado de avance de la instalación de tabiquería y documentar el progreso de manera objetiva; y (iv) Validación de nuestra propuesta con encuestas aplicadas a profesionales y estudiantes avanzados de ingeniería civil. La Figura 1 presenta de manera esquemática la metodología empleada.

CASO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA ACTUAL DE CONTROL DE AVANCE

El proyecto seleccionado corresponde a la construcción de un edificio residencial de AVSA Inmobiliaria, ubicado en Juan Sabaj #15, Ñuñoa, Santiago. La construcción estaba a cargo de la constructora INGEVEC. El edificio cuenta con 159 departamentos y una superficie aproximada de 11.700 m^2 distribuidos en 15 pisos y 5 subterráneos. En el piso 1 hay 13 departamentos, del piso 2 al 7 hay 19 departamentos por piso, y del piso 8 al 15 hay 4 departamentos por piso. Durante la investigación el edificio se encontraba en la fase de terminaciones.

Para el caso de estudio utilizamos fotografías obtenidas con una cámara de celular y una GoPro MAX 360°, capturadas durante la identificación de los procesos constructivos de la tabiquería. En un periodo de 8 semanas (3 días por semana), obtuvimos aproximadamente 2.000 fotografías de cada elemento en los procesos constructivos: instalación primera cara, instalación eléctrica y sanitaria, instalación de refuerzos, instalación segunda cara y empaste.

El avance de la obra era registrado por el profesional de terreno de terminaciones o un estudiante en práctica, lo que introducía subjetividad en la medición. Esta tarea se realizaba generalmente los miércoles, entre las 10:00 y 12:00 hrs. La instalación de tabiques la realizaba una cuadrilla de 7 trabajadores (2 maestros y 5 ayudantes), aumentando a 10 para tareas específicas como la instalación eléctrica y sanitaria.

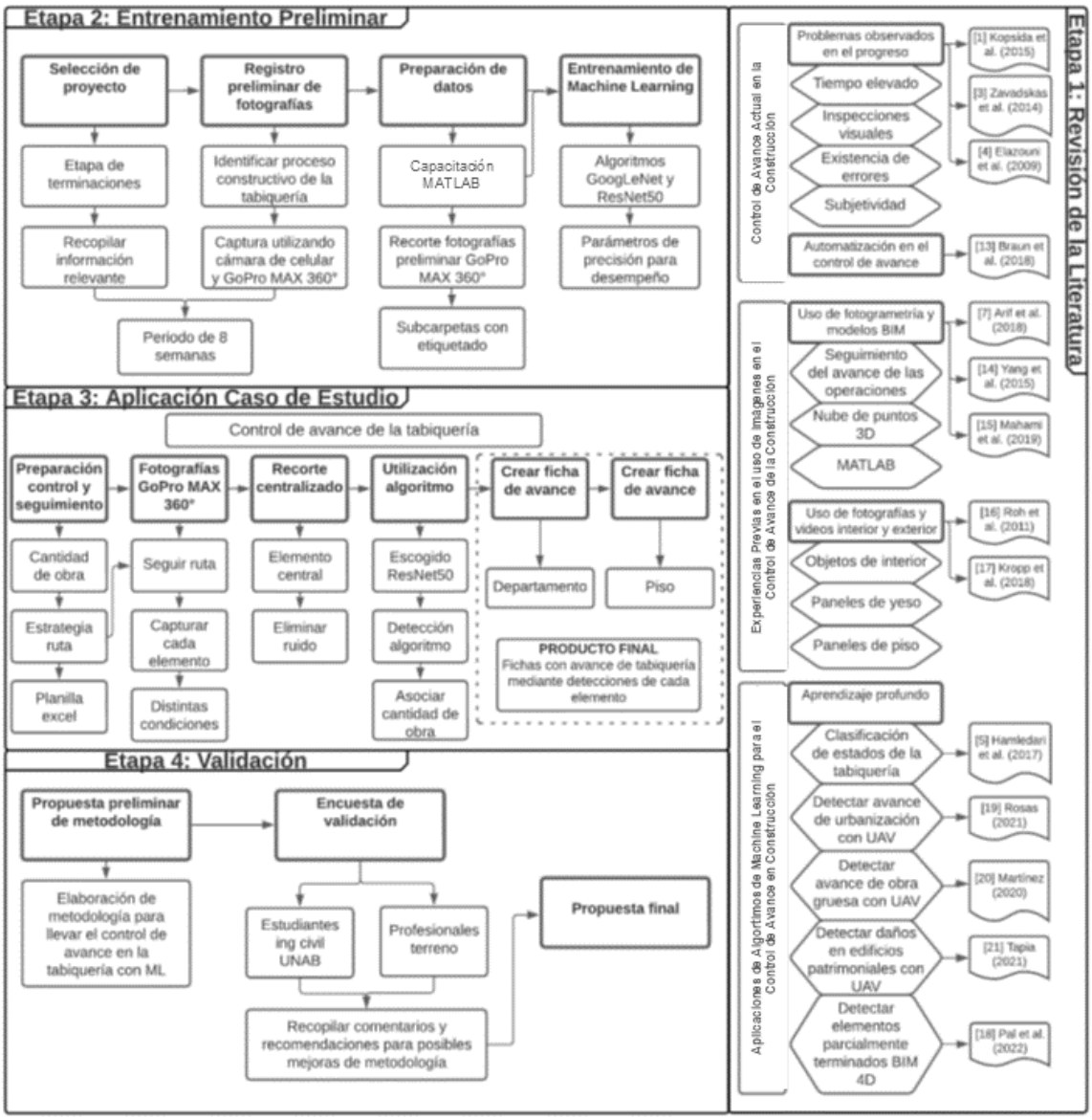
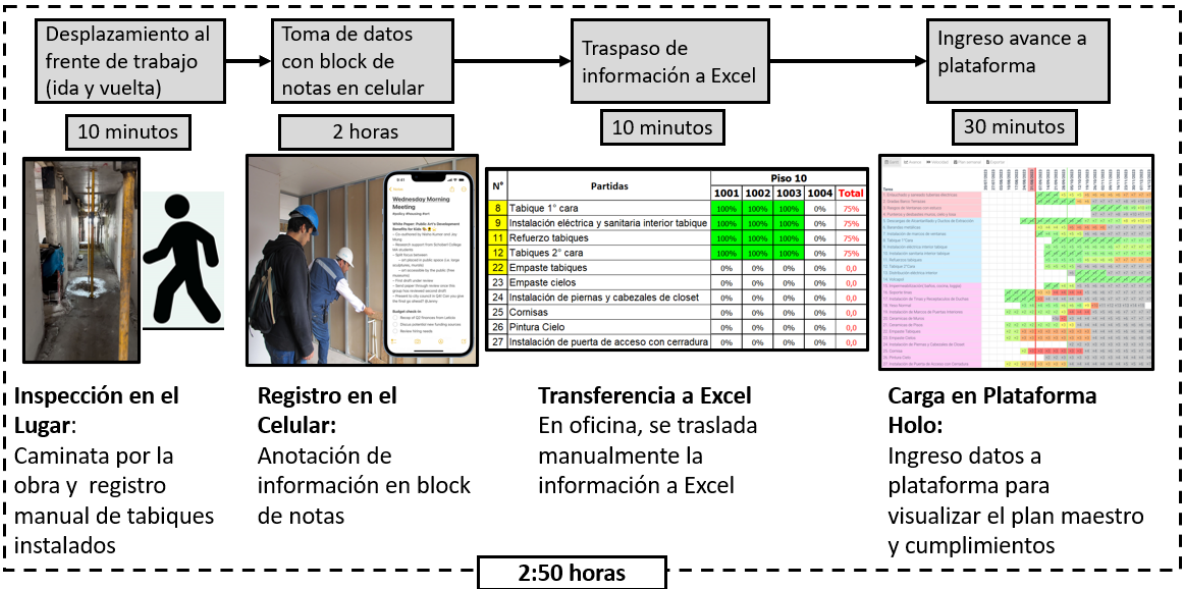


Figura 1. Esquema de metodología seguida.

La metodología actual para medir el avance de la tabiquería tenía 4 pasos detallados en la Figura 2. Primero, el desplazamiento al frente de trabajo tomaba aproximadamente 10 minutos. Segundo, registramos el avance piso por piso y departamento por departamento, utilizando el block de notas del celular, con un tiempo estimado de 2 horas. La medición se realizaba por unidad de tabique, a veces basándose en promesas de completar trabajo de parte de los trabajadores (no necesariamente avance efectivo/observable), lo que introduce imprecisiones. En tercer lugar, transferimos la información a una planilla de cálculo que resume el avance por departamento y piso. Finalmente, ingresamos los datos a la plataforma HOLO, utilizada para monitorear el avance de la obra. Este proceso de transcripción de información es propenso a errores y consume tiempo. Además, la documentación basada en

promesas de trabajadores y notas manuales genera imprecisiones, resultando en una documentación deficiente.



N°	Partidas	Piso 10				
		1001	1002	1003	1004	Total
8	Tabique 1° cara	100%	100%	100%	0%	75%
9	Instalación eléctrica y sanitaria interior tabique	100%	100%	100%	0%	75%
11	Refuerzo tabiques	100%	100%	100%	0%	75%
12	Tabiques 2° cara	100%	100%	100%	0%	75%
22	Empaste tabiques	0%	0%	0%	0%	0,0
23	Empaste cielos	0%	0%	0%	0%	0,0
24	Instalación de piernas y cabezales de closet	0%	0%	0%	0%	0,0
25	Cornisas	0%	0%	0%	0%	0,0
26	Pintura Cielo	0%	0%	0%	0%	0,0
27	Instalación de puerta de acceso con cerradura	0%	0%	0%	0%	0,0

Figura 2. Control de avance actual en obra.

RESULTADOS

En esta sección presentamos los resultados respecto a la metodología de investigación y comprende el entrenamiento preliminar de Machine Learning, la aplicación del caso de estudio y la encuesta de validación.

ENTRENAMIENTO PRELIMINAR

En esta sección, describimos la segunda etapa de nuestra investigación. Capturamos fotografías con ambos sensores (cámara celular y GoPro 360), seguimos el proceso constructivo definido, y organizamos y etiquetamos las fotografías para realizar siete entrenamientos. Luego, seleccionamos el entrenamiento de mejor desempeño para realizar las detecciones de avance.

REGISTRO DE FOTOGRAFÍAS PRELIMINARES

Durante las 8 semanas de visitas a la obra en su fase de terminaciones, identificamos partidas relacionadas con la instalación de tabiques y sus cuadrillas de trabajo. Definimos cada elemento de la tabiquería en los siguientes procesos: (1) instalación primera cara, (2) instalación eléctrica y sanitaria, (3) instalación refuerzos, (4) instalación segunda cara y (5) Empaste. La Figura 3 presenta el proceso constructivo, que incluye una versión simplificada de un mapa de cadena de valor (Rosenbaum et al., 2014) que muestra los cinco procesos con sus nombres y fotografías representativas, y detalla el tamaño de las cuadrillas para cada proceso.

Tras identificar el proceso constructivo, capturamos fotografías de cada uno de estos procesos utilizando tanto la cámara de celular como la GoPro MAX 360°. Para obtener imágenes adecuadas para el entrenamiento, aseguramos que el entorno estuviera libre de oclusiones y personas. Las fotos en la Figura 3 son ejemplos de capturas con celular mientras que las imágenes obtenidas con la GoPro MAX 360° se centraron en el elemento y se recortaron en el centro para mejorar la precisión del entrenamiento. En la Figura 4, mostramos un ejemplo de fotografías 360° recortadas, que dividimos en 10 segmentos verticales, de los cuales seleccionamos los 4 segmentos centrales para proporcionar una representación óptima del elemento de interés.

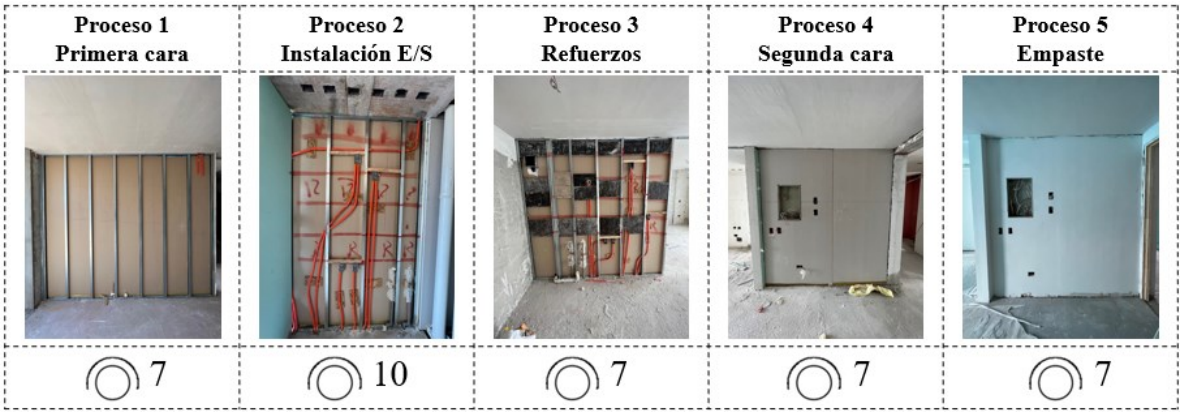


Figura 3. Proceso constructivo de la instalación de tabiquería (VSM simplificado).

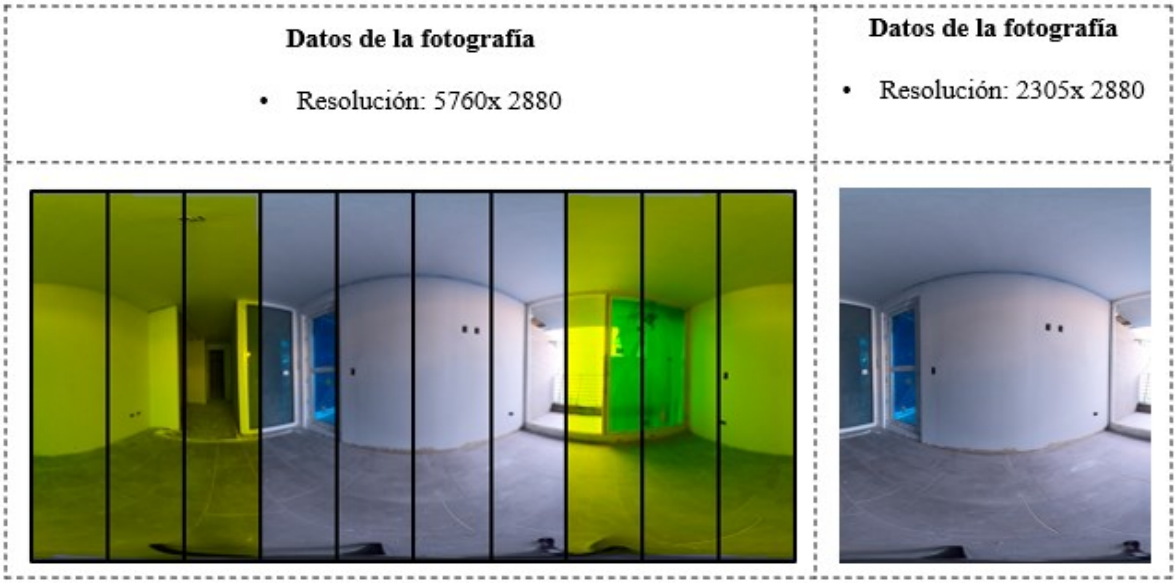


Figura 4. Recorte centralizado de fotografías 360°.

En la Figura 5, mostramos ejemplos de las fotografías utilizadas para cada proceso, junto con el sensor correspondiente. Las imágenes destacan por su alta calidad, con variadas condiciones de luminosidad y sin interferencias de trabajadores ni oclusiones. Además, se observa la transición entre las fotografías capturadas con la cámara 360° (b) y su posterior

recorte (c), centrando el enfoque en el elemento de interés para evaluar el avance del proceso constructivo.

Figura 5. Ejemplos fotografías utilizadas: a) Fotografías capturadas con celular; b) Fotografías capturadas con GoPro Max 360°; c) Fotografías GoPro MAX 360° recortadas y centradas en la sección cuyo avance se busca determinar.

PREPARACIÓN DE DATOS

Recopilamos aproximadamente 2.000 fotografías, distribuidas según los procesos constructivos. Realizamos 7 entrenamientos con algoritmos clasificadores en el entorno MATLAB utilizando estas imágenes. Procedimos a clasificar manualmente las fotografías en carpetas y asignarles etiquetas correspondientes a los procesos: "primeracara", "insteleysani", "refuerzos", "segundacara" y "empaste". La Figura 6 ilustra las carpetas en que organizamos las 1.931 fotos que usamos para los entrenamientos con el detalle para cada clase según se indica. En promedio, usamos entre 350 y 400 fotografías para cada clase.

ENTRENAMIENTO DE MACHINE LEARNING

La Tabla 1 resume los entrenamientos realizados con los sensores para capturar los procesos constructivos. Tras clasificar las fotografías, entrenamos los algoritmos GoogLeNet y ResNet50 utilizando MATLAB, realizando un total de 7 entrenamientos: 6 con ResNet50 y 1 con GoogLeNet. Los entrenamientos con ResNet50 incluyeron: 2 con cámara de celular, 2 con cámara GoPro MAX 360° en diferentes configuraciones, 1 con imágenes recortadas de GoPro y 1 combinando imágenes de ambas cámaras. El entrenamiento con GoogLeNet se realizó solo con las imágenes recortadas de GoPro.

Para el entrenamiento de los clasificadores, era esencial disponer de una gran cantidad de fotografías de distintos tabiques (elementos), en distintos pisos y departamentos, así como diversas condiciones de luminosidad. Aumentar la base de datos mejoró el rendimiento del algoritmo en aproximadamente un 12% (desde un mAP 0,86 a un mAP 0,96, entre los entrenamientos 1 y 2). Evaluamos el desempeño mediante matrices de confusión en tres configuraciones: el entrenamiento 2 (cámara de celular), el 5 (GoPro MAX 360° recortadas) y el 7 (GoPro MAX 360° recortadas con GoogLeNet). Los entrenamientos 2 y 5 mostraron buena precisión con ResNet50, destacando la ventaja de la cámara 360° en espacios estrechos. En contraste, el entrenamiento 7 con GoogLeNet resultó insatisfactorio, con una precisión inferior a 0,9, mientras que ResNet50 superó este umbral. Por lo tanto, optamos por ResNet50 para el control de avance debido a su superior desempeño. La Figura 7 presenta los parámetros de desempeño de ambos algoritmos.

Tras entrenar los algoritmos de clasificación ResNet50 y GoogLeNet, seleccionamos el entrenamiento 5 con ResNet50 y la cámara GoPro MAX 360° recortadas, que logró una precisión del 94%. Esta elección se basó en su alto rendimiento. Aunque el entrenamiento 2 con la cámara de celular mostró resultados similares, optamos por la cámara 360° debido a su eficacia en espacios reducidos, pues era más complicado capturar fotografías de todo el elemento (tabique) con el celular.

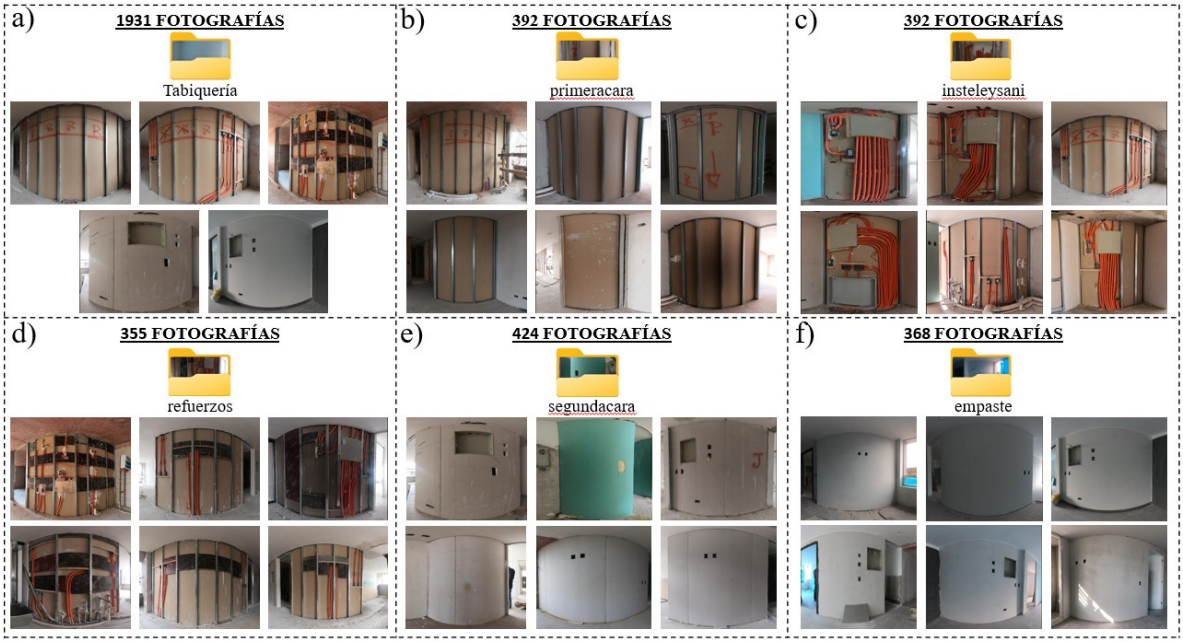


Figura 6. Ejemplos y cantidad de fotografías: a) Proceso constructivo tabiquería; b) Proceso 1: primera cara; c) Proceso 2: instalación eléctrica y sanitaria; d) Proceso 3: refuerzos; e) Proceso 4: segunda cara; f) Proceso 5: empaste.

De la Tabla 1, observamos que los primeros 6 entrenamientos se realizaron con ResNet50, empleando diferentes configuraciones: cámara de celular, cámara 360°, y combinaciones de ambas. El entrenamiento 4, con fotos no recortadas de la cámara 360°, mostró un desempeño menor a pesar de contar con 236 imágenes. En contraste, el entrenamiento 5, que utilizó 450

fotos recortadas, presentó una mejora significativa en el desempeño. El entrenamiento 7 con GoogLeNet, a pesar de usar 450 fotos recortadas, resultó en un desempeño deficiente. Finalmente, el entrenamiento 6, que combinó 661 fotos, no mostró una mejora sustancial en comparación con el entrenamiento 5.

Tabla 1. Resumen de los entrenamientos con ResNet50 y GoogLeNet.

Algoritmo	**Sensor Usado**	**Resoluc.**	**Entren.**	**Distribución Fotografías**					**Total Fotos**	**mAP**
				Proc. 1 1ra Cara	**Proc. 2** Inst. E/S	**Proc. 3** Refuer-zo	**Proc. 4** 2da Cara	**Proc. 5** Empas-te		
ResNet50	Iphone 13 Pro Max	3024x 4032	1	38	40	21	40	29	168	0,86
	Iphone 13 Pro Max	3024x 4032	2	50	50	43	49	48	240	0,96
	GoPro MAX 360°	5760x 2880	3	36	40	20	40	40	176	0,73
	GoPro MAX 360°	5760x 2880	4	48	51	47	50	40	236	0,83
	GoPro MAX 360° recortadas	2035x 2880	5*	86	84	94	104	82	450	0,94
	Combinadas	-	6	134	127	130	141	129	661	0,94
GoogLeNet	GoPro MAX 360° recortadas	2035x 2880	7	86	84	94	104	82	450	0,88

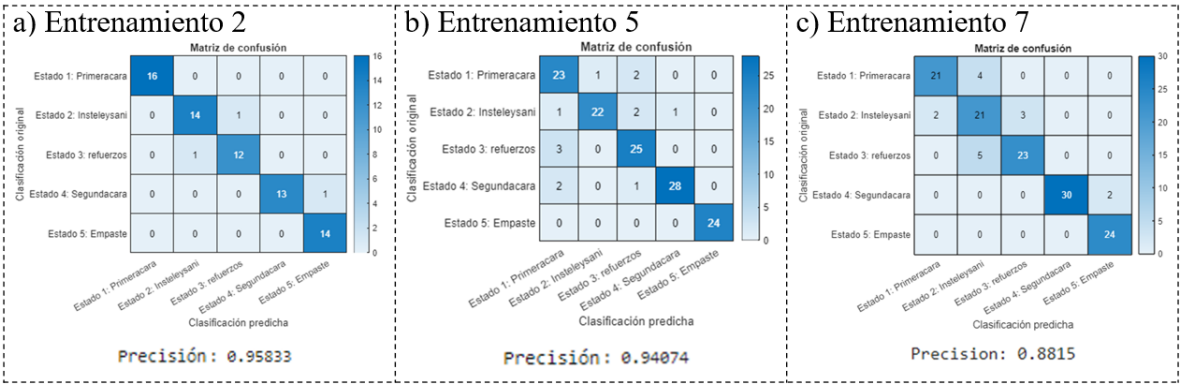


Figura 7. Parámetros de desempeño: a) Entrenamiento 2 con cámara de celular y ResNet50; b) Entrenamiento 5 con cámara 360° recortadas y ResNet50; c) Entrenamiento 7 con cámara 360° recortadas y GoogLeNet.

APLICACIÓN CASO DE ESTUDIO

En esta sección describimos la tercera etapa de nuestra investigación, detallando las actividades para el control de avance en el caso de estudio. El proceso se compone de seis pasos: preparación del control y seguimiento, captura de fotografías con la cámara GoPro MAX 360°, recorte centralizado de las imágenes, aplicación del algoritmo previamente entrenado para detección, y creación de fichas de avance que registran las observaciones de cada elemento por departamento y piso.

CONTROL DE AVANCE DE LA TABIQUERÍA

En el proyecto “Edificio Juan Sabaj” utilizamos ResNet50 junto con la cámara GoPro MAX 360° para controlar el avance de la tabiquería en sus cinco procesos. Las fotografías para testear el control de avance (con el algoritmo entrenado en el paso previo) se capturaron en los departamentos de los pisos 8 al 14. En el proceso que presentamos a continuación usamos de ejemplo el seguimiento del piso 10, específicamente del departamento 1001, que cuenta con aproximadamente 34 m².

Paso 1: Preparación Control y Seguimiento. Primero, planificamos el control y seguimiento del proyecto. Recopilamos información exhaustiva de los planos, incluyendo el plano en planta del piso 10 (ver Figura 8). Desarrollamos rutas específicas para cada departamento y asignamos números a los tabiques para un orden preciso en la captura de fotografías. Además, creamos una planilla en Excel (ver Tabla 2) que detalla las cantidades de obra asociadas a cada elemento de la tabiquería. Esta fase inicial organizó y estructuró el seguimiento y control del avance de la obra. La Figura 8a muestra el plano en planta del piso 10, la Figura 8b presenta las rutas para cada departamento (indican el orden para registrar las fotografías) y la Figura 8c detalla la ruta para el departamento 1001.

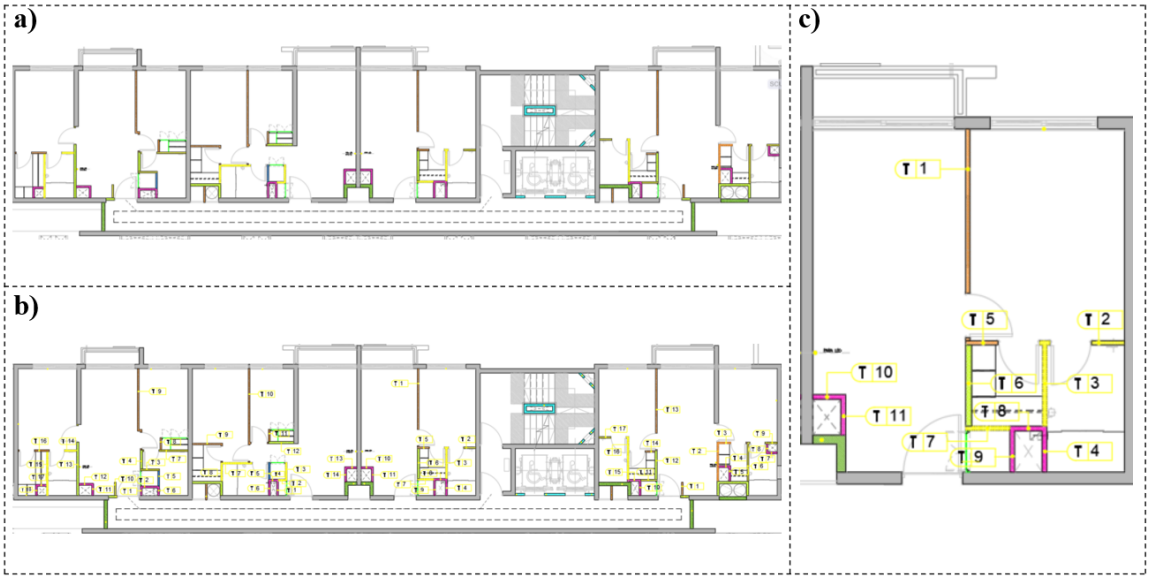


Figura 8. Estrategia de ruta: a) Plano en planta del piso 10; b) Plano en planta del piso 10 con estrategia de ruta; c) Estrategia de ruta departamento 1001.

En la Tabla 2 mostramos la planilla de avance para el departamento 1001 del piso 10, detallando las cantidades de obra asociadas a cada elemento. Esta tabla incluye el número de tabiques, la cantidad de obra en metros lineales (ml) y los cinco procesos identificados, además del avance acumulado por departamento. Se debe señalar que, para el proceso 2, algunos tabiques no requieren instalación eléctrica ni sanitaria, por lo que se indica como N/A (no aplica).

Tabla 2. Planilla de avance departamento 1001 con detecciones.

Depto.	# tabiques por depto.	Cantidad obra [ml]	Proceso Constructivo					Avance Acum/ depto
			Proc. 1 %	Proc. 2 %	Proc. 3 %	Proc. 4 %	Proc. 5 %	
1001	T1	2,75	100	100	0	0	0	-
	T2	0,55	100	100	0	0	0	-
	T3	1,43	100	N/A	0	0	0	-
	T4	0,77	100	0	0	0	0	-
	T5	0,54	100	100	0	0	0	-
	T6	1,36	100	100	0	0	0	-
	T7	0,74	100	100	0	0	0	-
	T8	0,55	0	N/A	0	0	0	-
	T9	0,70	100	100	0	0	0	-
	T10	0,55	100	N/A	0	0	0	-
	T11	0,60	0	N/A	0	0	0	-
Total	Total 11	10,54	89%	86%	0%	0%	0%	**35%**

Paso 2: Captura de Fotografías. La captura de fotografías se realizó siguiendo la estrategia de ruta establecida. Al ingresar al departamento, se fotografiaba cada elemento en el orden asignado, asegurando que el lente de la cámara estuviera centrado y a una distancia de aproximadamente 1-2 m del objeto. Las sesiones de captura se llevaron a cabo entre las 13:00 y las 14:00 horas, momento en el que los trabajadores se ausentan para el almuerzo, reduciendo así las interferencias y oclusiones. Fotografiar desde el piso 8 hasta el piso 14 requirió aproximadamente 50 minutos. La Figura 9 ilustra la posición adecuada para la captura fotográfica de un tabique del departamento 1001 con cámara GoPro MAX 360° y los parámetros utilizados.

Paso 3: Recorte Centralizado de Fotografías. A continuación, aplicamos un proceso de recorte centralizado a las fotografías obtenidas utilizando un código en MATLAB y que se explicó en la Figura 4. Este paso fue crucial para optimizar las imágenes y eliminar información irrelevante.

Paso 4: Utilización Algoritmo ML. En la Tabla 2 mostramos la información derivada de las detecciones realizadas por el algoritmo clasificador, como se ilustra en la Figura 10. Cada detección refleja el progreso de la instalación de tabiques, indicado con un 100%. Es relevante destacar que una detección en el proceso 3 implica que los procesos 1 y 2 se han completado al 100%. Los procesos 1 (Primera cara), 4 (Segunda cara) y 5 (Empaste) se ponderan en función de la cantidad de obra realizada, calculando el avance acumulado multiplicando los milímetros de tabique por el porcentaje de avance y dividiendo entre el total de milímetros. En contraste, los procesos 2 (Instalación eléctrica y sanitaria) y 3 (Refuerzos) se promedian según los porcentajes de avance alcanzados. El avance acumulado por departamento se obtiene promediando los avances acumulados de cada proceso.

Las detecciones en las fotografías recortadas se realizaron utilizando el algoritmo ResNet50 previamente entrenado, que alcanzó una precisión del 94%. Cada fotografía recortada de cada elemento fue evaluada por el algoritmo para determinar el porcentaje de avance, asociado a la cantidad de obra asignada. En la Figura 10 se muestran las 11 fotografías con las detecciones para cada elemento, donde los recuadros en blanco indican la ausencia de tabiques instalados y, por ende, la falta de avance registrado.

Figura 9. Ejemplo de captura de elemento de tabiquería en Departamento 1001.

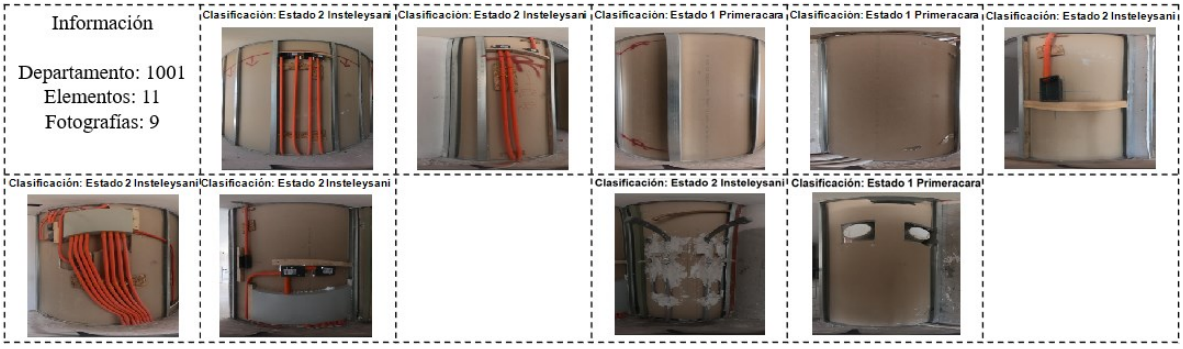


Figura 10. Detecciones de algoritmo ResNet50 de cada elemento del departamento 1001.

La Tabla 2 resume el avance registrado en el departamento 1001 con las detecciones realizadas por el algoritmo ResNet50. Se observa que el proceso 1 (Primera cara) tiene un avance del 89%, el proceso 2 (Instalación eléctrica y sanitaria) muestra un avance del 86%, y los procesos restantes registran un avance del 0%. Para calcular el avance acumulado de cada proceso, se multiplicó la cantidad de metros de tabique por el porcentaje de avance y se dividió entre el total de metros del departamento. El avance acumulado del departamento se obtuvo promediando los avances de los cinco procesos, resultando en un 35% de avance acumulado.

Paso 5: Creación Ficha de Avance Departamento. La ficha de avance proporciona información esencial sobre el progreso del departamento 1001 basado en las detecciones del algoritmo ResNet50. Incluye datos como la fecha de inspección, el piso y el departamento inspeccionado, la estrategia de ruta, el número de tabiques, las cantidades de obra, el avance individual de cada proceso y el avance global. La Figura 11 muestra la ficha de avance dividida en cinco secciones: en la esquina superior izquierda se presentan los datos del departamento; en la parte superior central, la progresión global del avance (últimas 6 semanas), que alcanza un 80%; en la esquina superior derecha, la estrategia de ruta; en el centro, una fotografía representativa de cada proceso junto con su avance individual (últimas 6 semanas); y en la parte inferior, información detallada del departamento, incluyendo las fotografías y detecciones realizadas por ResNet50.

Paso 6: Creación Ficha de Avance Piso. La ficha de avance del piso detalla el progreso registrado en las fotografías de los departamentos 1001, 1002, 1003 y 1004, basado en las detecciones del algoritmo ResNet50. Aunque mantiene similitudes con la ficha anterior, abarca los cuatro departamentos del piso 10. Incluye información como la fecha de inspección, el número de piso, la estrategia de ruta, el número de tabiques, las cantidades de obra, el avance por proceso y el avance global. La Figura 12 muestra la ficha para los departamentos 1001, 1002, 1003 y 1004, organizada en cuatro secciones: datos y parámetros del piso en la esquina superior izquierda, progreso global en las últimas 6 semanas alcanzando un 60% en la parte superior central, estrategia de ruta en la esquina superior derecha y una fotografía representativa de cada proceso con su avance individual en la parte inferior (últimas 6 semanas).

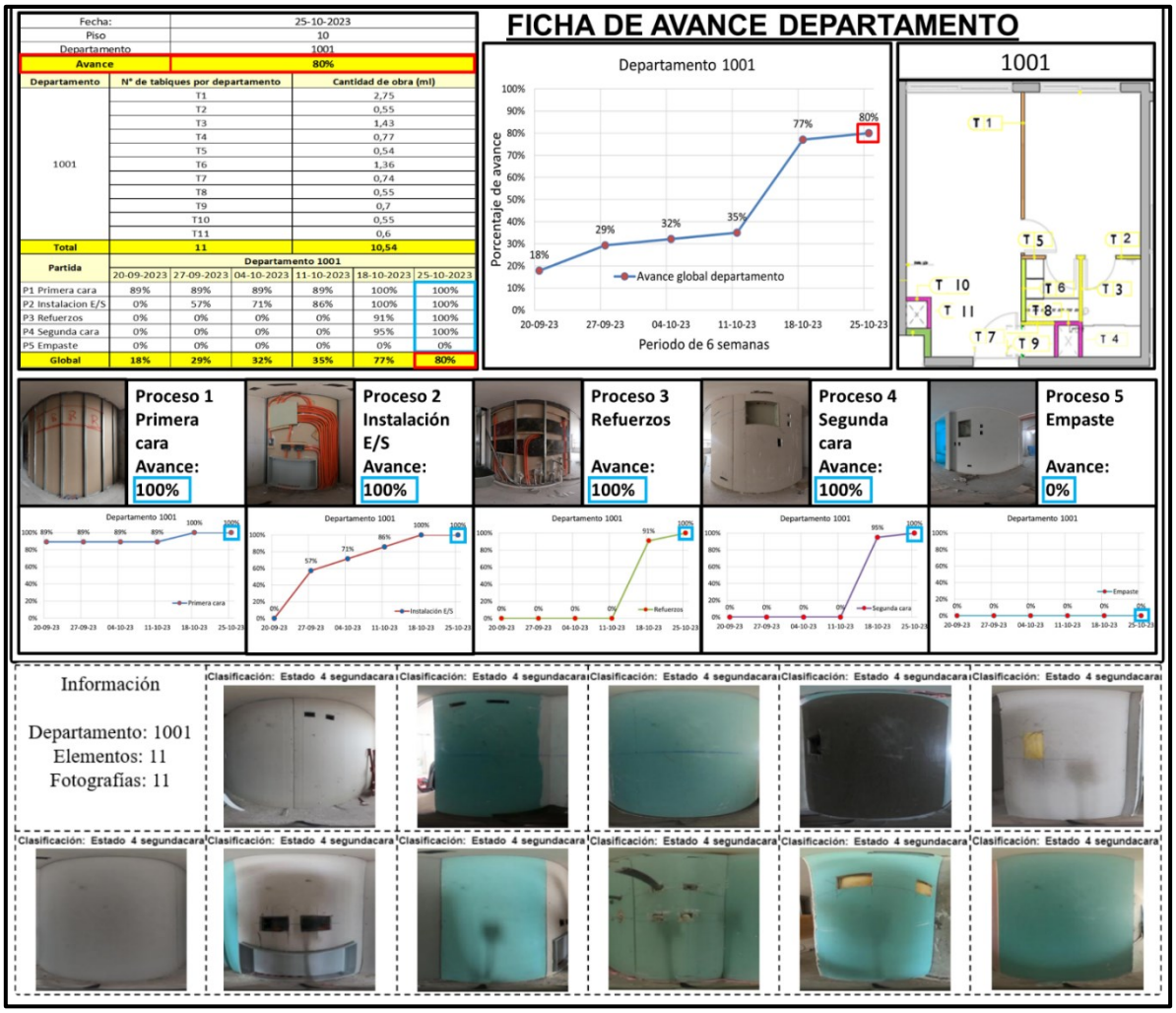


Figura 11. Ficha de Avance Departamento 1001.

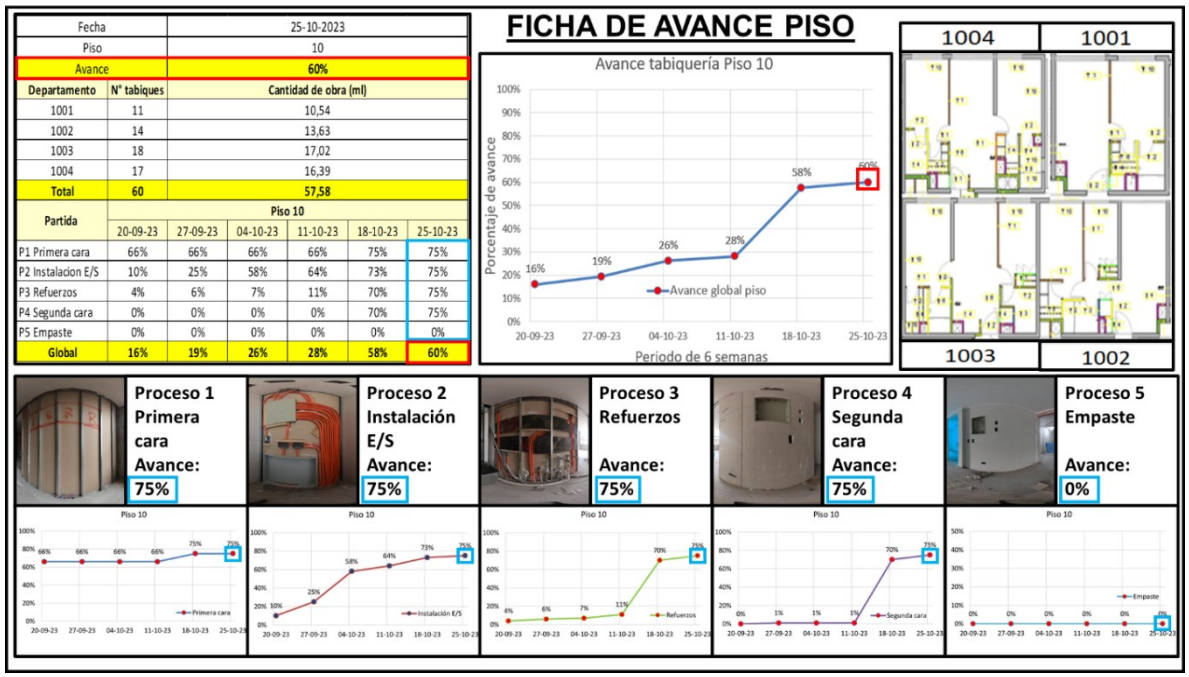


Figura 12. Ficha de Avance Piso 10.

PROPUESTA DE METODOLOGÍA

Proponemos una metodología con planificación temporal para medir el avance en la tabiquería usando ResNet50, organizada en 9 actividades consecutivas y que resumimos en la Figura 13. Primero, capturamos fotografías preliminares con la cámara de celular y la GoPro MAX 360°, procesamos y etiquetamos las imágenes, y entrenamos los algoritmos ResNet50 y GoogLeNet, todas estas actividades realizadas una sola vez, totalizando 13:25 horas (actividades en naranja). Luego, para la preparación del control y seguimiento, creamos una planilla de avance y una estrategia de ruta para los elementos de la tabiquería, tareas que solo se efectúan una vez y requieren 45 minutos (actividades en amarillo). Finalmente, para el control y seguimiento semanal, tomamos fotografías del avance, recortamos imágenes, aplicamos el algoritmo de Machine Learning para detectar elementos y asociarlos con la cantidad de obra, y creamos fichas de avance, con un tiempo total semanal de 2:00 horas (actividades en azul).

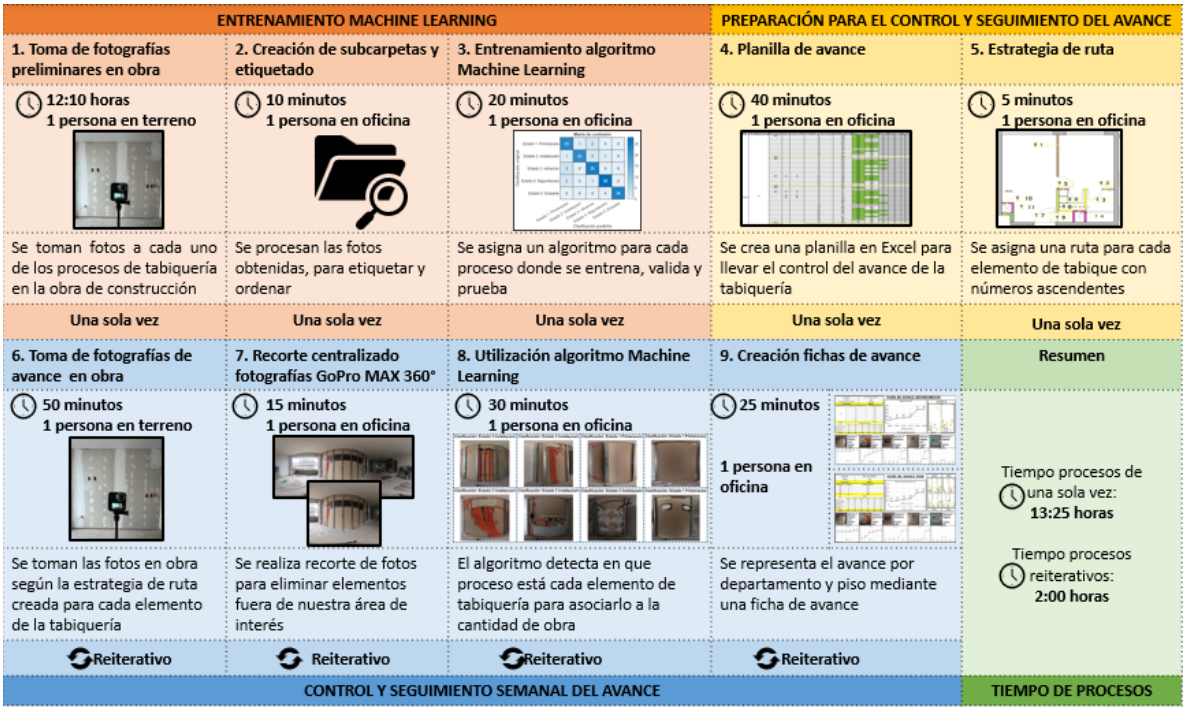


Figura 13. Esquema de la metodología propuesta para control de avance de la tabiquería con Machine Learning.

ENCUESTA DE VALIDACIÓN

Una vez finalizada y aplicada nuestra metodología para medir el avance de la tabiquería mediante fotografías y detección con Machine Learning, procedimos a validar su efectividad. Aplicamos una encuesta a 10 estudiantes avanzados de ingeniería civil de la UNAB (octavo semestre) y a 3 profesionales de terreno del proyecto "Edificio Juan Sabaj", obteniendo 13 respuestas. La encuesta, de 12 preguntas, se dividió en tres grupos: (i) evaluación de la metodología, (ii) evaluación de la ficha de avance por departamento y piso, y (iii) disposición a usar la metodología en futuros proyectos. Las preguntas utilizaron una escala Likert de 1 a 4 (donde 1 es totalmente en desacuerdo y 4 es totalmente de acuerdo). En la Figura 14 resumimos los resultados de tal encuesta. En naranja claro mostramos los resultados para estudiantes y en tono naranja oscuro las respuestas de los profesionales.

En cuanto a la metodología, la claridad (pregunta 1) fue altamente valorada con un promedio de 4. Sin embargo, el tiempo empleado (pregunta 2) obtuvo un promedio de 3,1, con estudiantes promediando 3,5 y profesionales 2,7, sugiriendo como deseable una reducción de tiempos. La adecuación de la metodología para reflejar el avance (pregunta 3) promedió 3,6, y la precisión del algoritmo (pregunta 4) obtuvo un 3,9. En general, estas preguntas reflejaron un buen resultado con un promedio de 3,6.

Para la ficha de avance por departamento (preguntas 6 y 7), la evaluación promedió 3,5, con estudiantes en 3,7 y profesionales en 3,3, sugiriendo la inclusión de las detecciones del algoritmo, lo cual implementamos en la versión definitiva de la ficha de avance

departamento. La ficha de avance por piso (preguntas 9 y 10) fue valorada positivamente con un promedio de 3,6.

Finalmente, la disposición a utilizar la metodología (pregunta 12) promedió 3,6, con estudiantes en 3,8 y profesionales en 3,3, destacando la necesidad de reducir los tiempos de ejecución. La metodología propuesta fue bien recibida con un promedio general de 3,5. La encuesta presencial permitió recibir comentarios y recomendaciones, contribuyendo a mejorar y fortalecer nuestra propuesta.

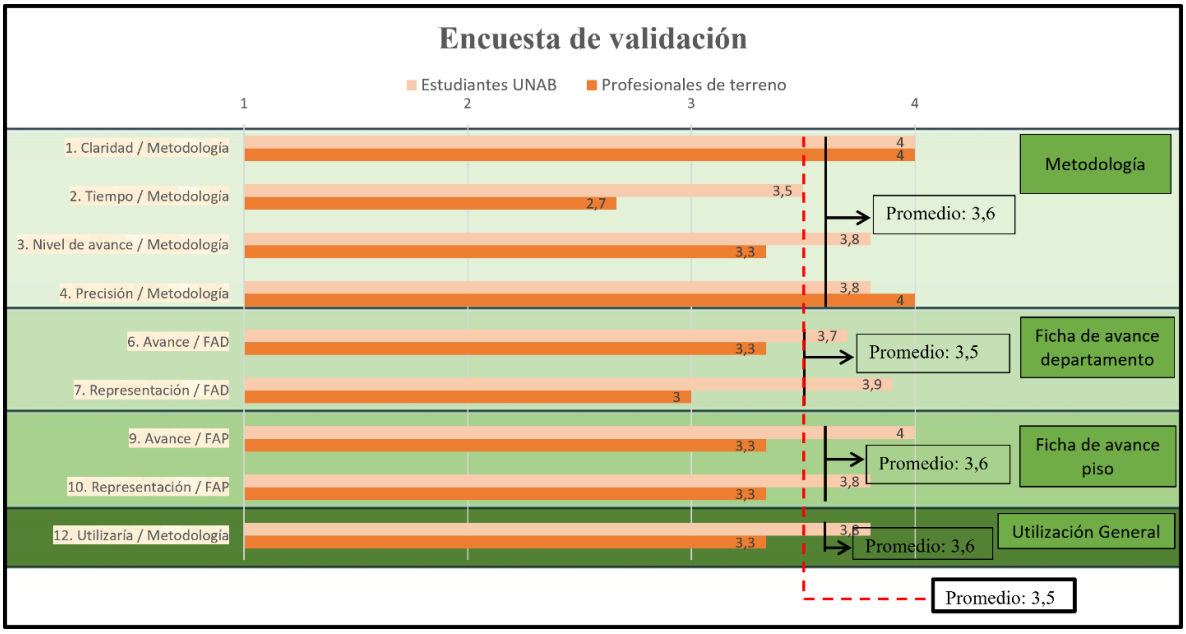


Figura 14. Resumen encuesta de validación.

CONCLUSIONES

Actualmente, en Chile, el control de avance en construcción se realiza manualmente mediante inspección visual. Esto implica que el profesional de terreno debe desplazarse al frente de trabajo para medir el avance manualmente y luego transcribir esta información entre plataformas, lo que puede generar errores. Además, los criterios de medición pueden variar entre profesionales, resultando en inspecciones subjetivas y documentación deficiente, ya que carecen de respaldo fotográfico o no consideran las cantidades de obra para determinar el avance. Este proceso además consume mucho tiempo.

La implementación de nuestra metodología para el control de avance utilizando fotografías y algoritmos de Machine Learning aborda estos problemas, mejorando la documentación y precisión del control de avance. Las fotografías capturadas con cámara de celular y cámara 360° permiten registrar lugares de difícil acceso y, al integrarse con algoritmos de Machine Learning, proporcionan una evaluación más objetiva del avance de obra y una documentación de alta calidad.

El uso de algoritmos de Machine Learning en la clasificación de cada elemento de la tabiquería elimina la subjetividad y reduce los errores asociados a los métodos actuales. El algoritmo ResNet50 fue el seleccionado, con una precisión del 94%, que resultó superior al 90% de GoogLeNet. Durante la captura de fotografías, enfrentamos dificultades con el posicionamiento de los sensores, la distancia al tabique y las interferencias de los trabajadores, que fueron abordadas para mejorar los resultados. Escogimos la cámara GoPro MAX 360° recortada como el mejor sensor.

El objetivo principal fue desarrollar una metodología para controlar el avance, centrada en la clasificación de cada elemento en el proceso constructivo de la tabiquería, abordando la inspección visual subjetiva, la documentación deficiente y los errores en las mediciones. Aunque el tiempo dedicado a esta tarea se mantuvo constante, la metodología promete mejoras con una eventual automatización del proceso. En un trabajo relacionado con esta investigación, Parra (2024) ofrece detalles de las ventajas de la metodología propuesta en comparación con el control de avance actual. Por ejemplo, la metodología actual subreporta el avance para avances bajos y lo sobrereporta para avances altos.

Las fichas de avance detalladas para departamentos y pisos no solo respaldan la documentación del avance, sino que también muestran las detecciones del algoritmo, ofreciendo una visión global del avance acumulado. La encuesta de validación arrojó comentarios positivos tanto de partes de estudiantes de Ingeniería Civil como de profesionales de terreno, quienes destacaron la calidad del trabajo y el potencial innovador de la metodología, con un promedio total de 3,5.

CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO

Nuestra contribución principal consiste en aplicar una metodología que combina el uso de fotografías de cámaras 360° y celulares con algoritmos de Machine Learning para controlar el avance en partidas de terminación en construcción. Esta metodología incluye la creación de una planilla de avance y una estrategia de ruta, permitiendo un seguimiento detallado del progreso de la obra. Usando ResNet50, logramos detectar y asociar la cantidad de obra para cada elemento de la tabiquería, obteniendo un avance preciso. La combinación de clasificadores y fotografías es una técnica innovadora que no ha sido ampliamente explorada hasta la fecha.

IMPORTANCIA PRÁCTICA

Nuestra investigación utiliza algoritmos de Machine Learning con fotografías de cámaras de celular y GoPro MAX 360° para detectar el avance en partidas de terminación en construcción. Esto elimina la subjetividad, mejora la documentación y reduce los errores en las mediciones. Además, genera fichas de avance por departamento y piso que detallan la cantidad de obra, el número de tabiques y muestran la progresión del avance global e individual, proporcionando un seguimiento eficiente del progreso de la obra.

LIMITACIONES

Nuestra investigación fue testeada solamente en un tipo de partida (instalación de tabiquería) y en un único proyecto, por tanto, los resultados pudieran no ser tan generalizables. Sin embargo, ofrecemos una propuesta que puede ser testeada y mejorada en otras partidas o tipos de proyectos. Incluso pudiera usarse como base y adaptarse a partidas de otra naturaleza.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Nuestra investigación abre puertas a diversas aplicaciones futuras como: (1) Aplicar la metodología a otros procesos constructivos, como instalación de pisos, climatización y estructuras metálicas; (2) Explorar otros algoritmos de Machine Learning para identificar riesgos en el sitio de construcción, estimar costos, clasificar materiales y detectar defectos en estructuras; (3) Proponer fichas de avance en tiempo real, mostrando el progreso directamente en el sitio de construcción y la ubicación de los elementos; y (4) Automatizar el trabajo mediante el uso de robots o vehículos terrestres no tripulados que sigan una estrategia de ruta predefinida para capturar las fotografías, reduciendo la intervención humana.

REFERENCIAS

Arif, F., y Khan, W.A. (2021). Smart Progress Monitoring Framework for Building Construction Elements Using Videography–MATLAB–BIM Integration. International Journal of Civil Engineering, 19(6), 717-732. https://doi.org/10.1007/s40999-021-00601-3

Baduge, S.K., Thilakarathna, S., Perera, J.S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., y Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. Automation in Construction, 141, 104440. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440

Braun, A., Tuttas, S., Stilla, U., y Borrmann, A. (2018). Chapter 30-BIM-based progress monitoring. Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice, 30, 463-476. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_28

Elazouni, A., y Abdel-Wahhab, O. (2009). Progress monitoring of construction projects using neural networks pattern recognition. Building a Sustainable Future – Proceedings of the 2009 Construction Research Congress, 1068-1078. https://doi.org/10.1061/41020(339)108

Golparvar-fard, M., Peña-Mora, F., y Savarese, S. (2009). Dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication. Information Technology in Construction (ITcon), 14, 129-153. https://www.itcon.org/2009/13

Hamledari, H., McCabe, B., y Davari, S. (2017). Automated computer vision-based detection of components of under-construction indoor partitions. Automation in Construction, 74, 78-94. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.009

Kim, J. (2020). Visual Analytics for Operation-Level Construction Monitoring and Documentation: State-of-the-Art Technologies, Research Challenges, and Future Directions. Frontiers in Built Environment, 6, 575738. https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.575738

Kopsida, M., Brilakis, I., y Vela, P. (2015). A Review of Automated Construction Progress Monitoring and Inspection Methods. Apollo – University of Cambridge Repository, https://doi.org/10.17863/CAM.92941

Kropp, C., Koch, C., y König, M. (2018). Interior construction state recognition with 4D BIM registered image sequences. Automation in Construction, 86, 11-32. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.027

Mahami, H., Nasirzadeh, F., Hosseininaveh Ahmadabadian, A., y Nahavandi, S. (2019). Automated Progress Controlling and Monitoring Using Daily Site Images and Building Information Modelling. Buildings, 9(3), 70. https://doi.org/10.3390/buildings9030070

Martínez, C. (2020). Uso de algoritmos de Machine Learning para detectar avance de obra gruesa a partir de fotos capturadas con UAV. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile.

Martínez, P., Barkokebas, B., Hamzeh, F., Al-Hussein, M., y Ahmad, R. (2021). A vision-based approach for automatic progress tracking of floor paneling in offsite construction facilities. Automation in Construction, 125, 103620. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103620

Pal, A., Lin, J.J., y Hsieh, S.-H. (2022). Automated Construction Progress Monitoring of Partially Completed Building Elements Leveraging Geometry Modeling and Appearance Detection with Deep Learning. Construction Research Congress, 708-717. https://doi.org/10.1061/9780784483961.074

Parra, J. (2024). Uso de algoritmos clasificadores para detectar avance de obra en partidas de terminaciones en edificaciones. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile.

Roh, S., Aziz, Z., y Peña-Mora, F. (2011). An object-based 3D walk-through model for interior construction progress monitoring. Automation in Construction, 20(1), 66-75. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.07.003

Rosas, I. (2021). Uso de algoritmos de machine learning para detectar avance de urbanización a través de captura de fotos con UAV. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile.

Rosenbaum, S., Toledo, M., y González, V. (2014). Improving Environmental and Production Performance in Construction Projects Using Value-Stream Mapping: Case Study. Journal of Construction Engineering and Management, 140(2), 04013045. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000793

Tapia, A. (2021). Uso de algoritmos machine learning para detectar daños en edificios patrimoniales a partir de fotos capturadas con UAV. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile.

Xu, Y., Zhou, Y., Sekula, P., y Ding, L. (2021). Machine learning in construction: From shallow to deep learning. Developments in The Built Environment, 6, 100045. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100045

Yang, J., Park, M.-W., Vela, P.A., y Golparvar-Fard, M. (2015). Construction performance monitoring via still images, time-lapse photos, and video streams: Now, tomorrow, and the future. Advanced Engineering Informatics, 29(2), 211-224. https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.011

Zavadskas, E.K., Vilutiene, T., Turskis, Z., y Saparauskas, J. (2014). Multi-criteria analysis of Projects performance in construction. Archives of Civil Mechanical Engineering, 14(1), 114-121. https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.07.006

Zhang, X., Bakis, N., Lukins, T.C., Ibrahim, Y.M., Wu, S., Kagioglou, M., Aouad, G., Kaka, A.P., y Trucco, E. (2009). Automating progress measurement of construction projects. Automation in Construction, 18(3), 294-301. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.09.004