

SEGUIMIENTO DE LA GERMINACIÓN ACUMULADA DE SEMILLAS DE TOMATE MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Pablo Ríos^{1*}, Diego Quiroga¹, Hernando Jimenez^{2,4}, María Laura Umpierrez², María Victoria Panzl³

¹Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Logística y Biomédica, Instituto Tecnológico Suroeste, Ingeniería en Mecatrónica,

²Departamento de Sostenibilidad Ambiental, Instituto Tecnológico Centro Sur,

³Laboratorio de Análisis Instrumental e Investigación de LAA, Instituto Tecnológico Suroeste

⁴Universidad Antonio Nariño, Grupo de Investigación REM

¹Fray Bentos, ²Durazno, ³Paysandú, Uruguay , ⁴ Bogotá, Colombia

¹pablo.rios@estudiantes.utec.edu.uy

Temática: Visión Artificial

PALABRAS CLAVE: detección de germinación, visión artificial, seguimiento de objetos, seguimiento de semillas, germinadora.

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento de la germinación de semillas es una tarea común en las actividades de investigación en diferentes cultivos para diversos tratamientos en estudio. Para determinar el impacto de un tratamiento de semillas es esencial realizar ensayos de germinación que suelen durar alrededor de diez días. Uno de los principales insumos obtenidos de este ensayo son las gráficas de la tasa de germinación por día. Para evaluar el estado de germinación es necesaria la observación directa en el laboratorio, verificando la cantidad de semillas germinadas a lo largo de cada ensayo. Esta inspección visual requiere un entrenamiento adecuado y consume una gran cantidad de tiempo, además de ser propenso a errores humanos. La presente propuesta se centra en un sistema embebido basado en Raspberry Pi 4 que se ubica dentro de una germinadora, donde captura imágenes de forma periódica. Mediante procesamiento de imágenes basado principalmente en el uso modelos de aprendizaje automático YOLO entrenados a medida se analizan estas imágenes, realizando un seguimiento de cada placa y el estado de germinación de sus semillas. Además, se plantea el desarrollo de un servidor web local con una interfaz gráfica para permitir a los científicos auditar y corregir los resultados del sistema. Puede decirse que este sistema convertiría la germinadora en una germinadora inteligente. Este trabajo es parte del proyecto de investigación de evaluación del efecto de campos magnéticos en cultivos de tomate, en el marco del grupo de investigación estratégica en producción sostenible de agroalimentos de la universidad tecnológica del Uruguay.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo aplica un enfoque de ingeniería de sistemas basado en modelos, siendo elegido *sysML* como lenguaje de modelado.

Se definieron los requerimientos luego de entrevistas a los científicos involucrados en el proyecto de investigación previamente mencionado.

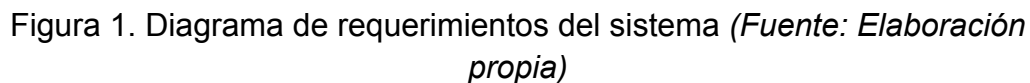
Uno de los desafíos es la trazabilidad individual de cada placa petri en relación a los tratamientos y la muestra control; para esto se etiqueta cada placa con un código *QR* que contiene toda la información relevante del experimento. Estas etiquetas se imprimen con una impresora térmica con la que cuenta el laboratorio.

Para la detección de placas petri y semillas se entrenaron modelos *YOLO* usando aproximadamente 2900 fotografías capturadas durante múltiples ensayos de germinación realizados con diferentes cantidades de semillas. Apuntando a desarrollar un sistema capaz de detectar la tasa de germinación en placas con cinco semillas.

Para el servidor, el procesamiento y la captura de imagen se utilizó *Python* (con librerías como *OpenCV*, *Pillow*, *Flask*, *QRDetector*, entre otras). La interfaz gráfica se desarrolló con *html*, *javascript* y *css*. Las fotografías se toman con una cámara *Arducam* de 16 megapíxeles y se respaldan automáticamente en *Google Drive*. Se utilizan luces led para iluminación y los componentes se sostienen mediante un chasis de acrílico. Toda la información del sistema se guarda en una base de datos local basada en *Sqlite*.

El rendimiento del modelo de detección de semillas se validó de forma aislada con las métricas de precisión (“P”), exhaustividad (“R”) y “precisión promedio media” (“mAP”, de “*mean average precision*” en inglés). En conjunto al modelo se implementaron sistemas de seguimiento y filtrado de las detecciones a lo largo de secuencias fotográficas. Para evaluar estos sistemas en conjunto se realizaron pruebas de validación con diez placas en ensayos de diez días. Se registraron las correcciones manuales mínimas necesarias para obtener una tasa de germinación diaria correcta. Registrando el tipo de corrección y momento de la misma. Además se cronometró el tiempo necesario para realizar estas auditorías.

Desde la figura 1 hasta la 4 se muestran los requerimientos del proyecto, los principales componentes utilizados, los subsistemas fundamentales y una vista general de las actividades involucradas en el procesamiento de imagen.



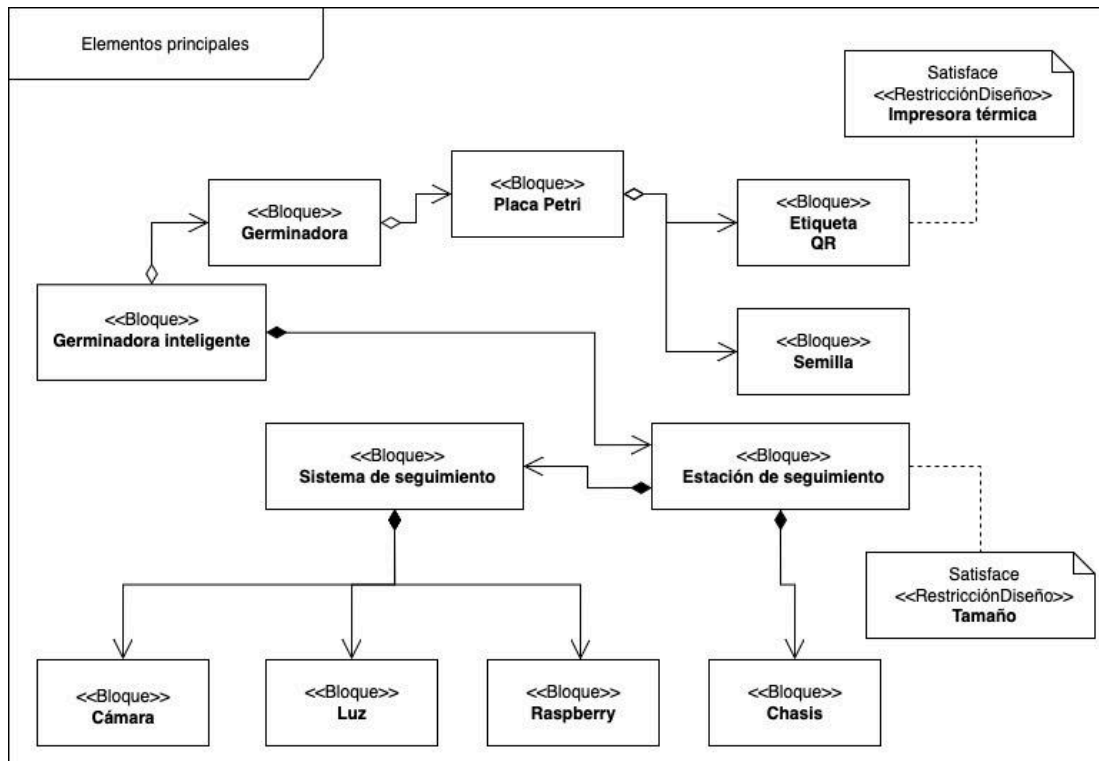
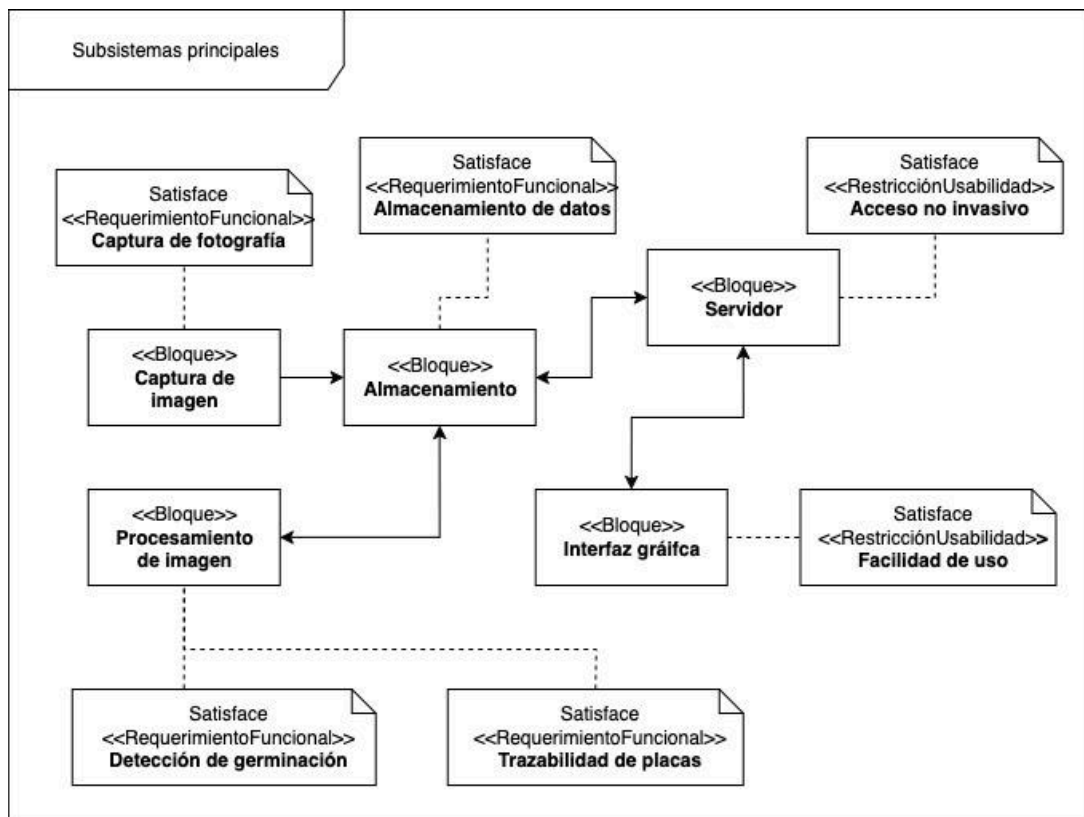


Figura 2. Principales componentes del sistema (Fuente: Elaboración propia)



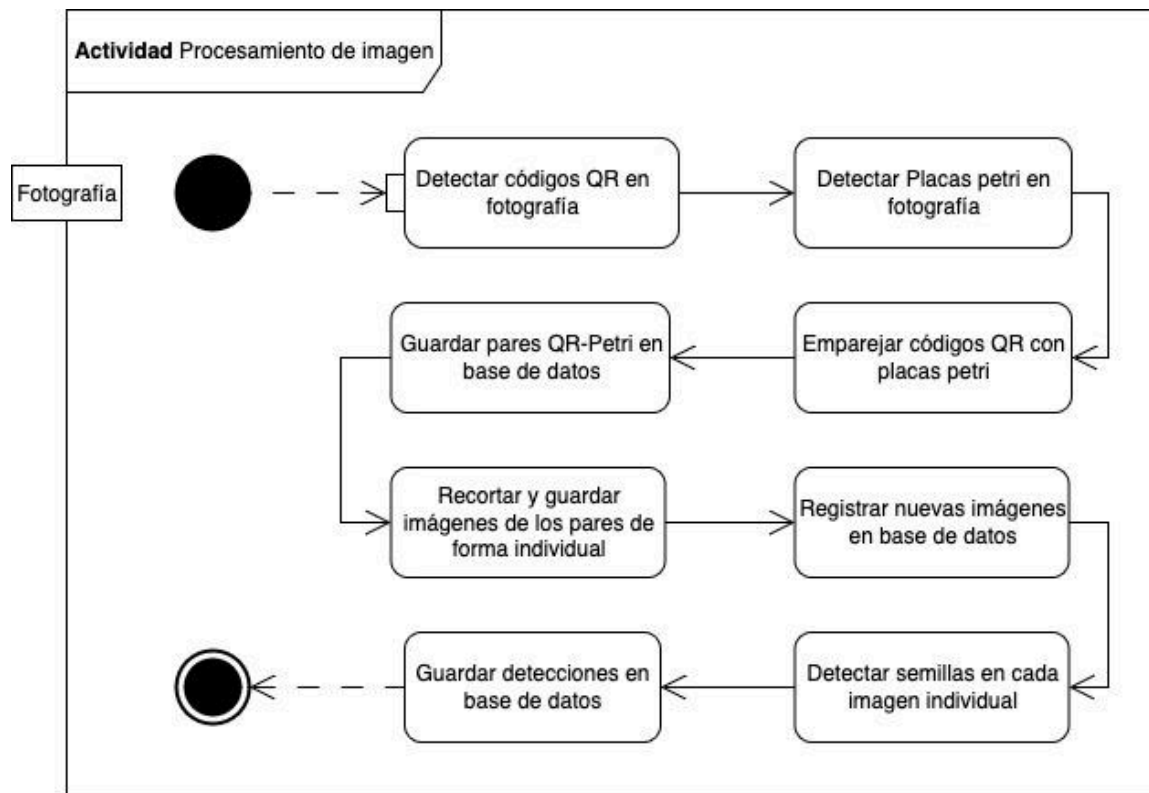


Figura 4. Actividades del procesamiento de imagen (Fuente: Elaboración propia)

Las figuras 5 y 6 muestran la estación de seguimiento desarrollada y el procesamiento de imagen que realiza la misma. En cada fotografía se identifican las placas petri y los códigos QR, gracias a la orientación de estos últimos es posible emparejarlos correctamente. Cada par QR-Petri se segmenta y aísla, obteniendo una imagen por cada par. Estas imágenes se estabilizan tomando de referencia la posición del código QR en la primera fotografía donde sea detectado.



Figura 5. Fotografías de la estación de seguimiento (Fuente: Elaboración propia)

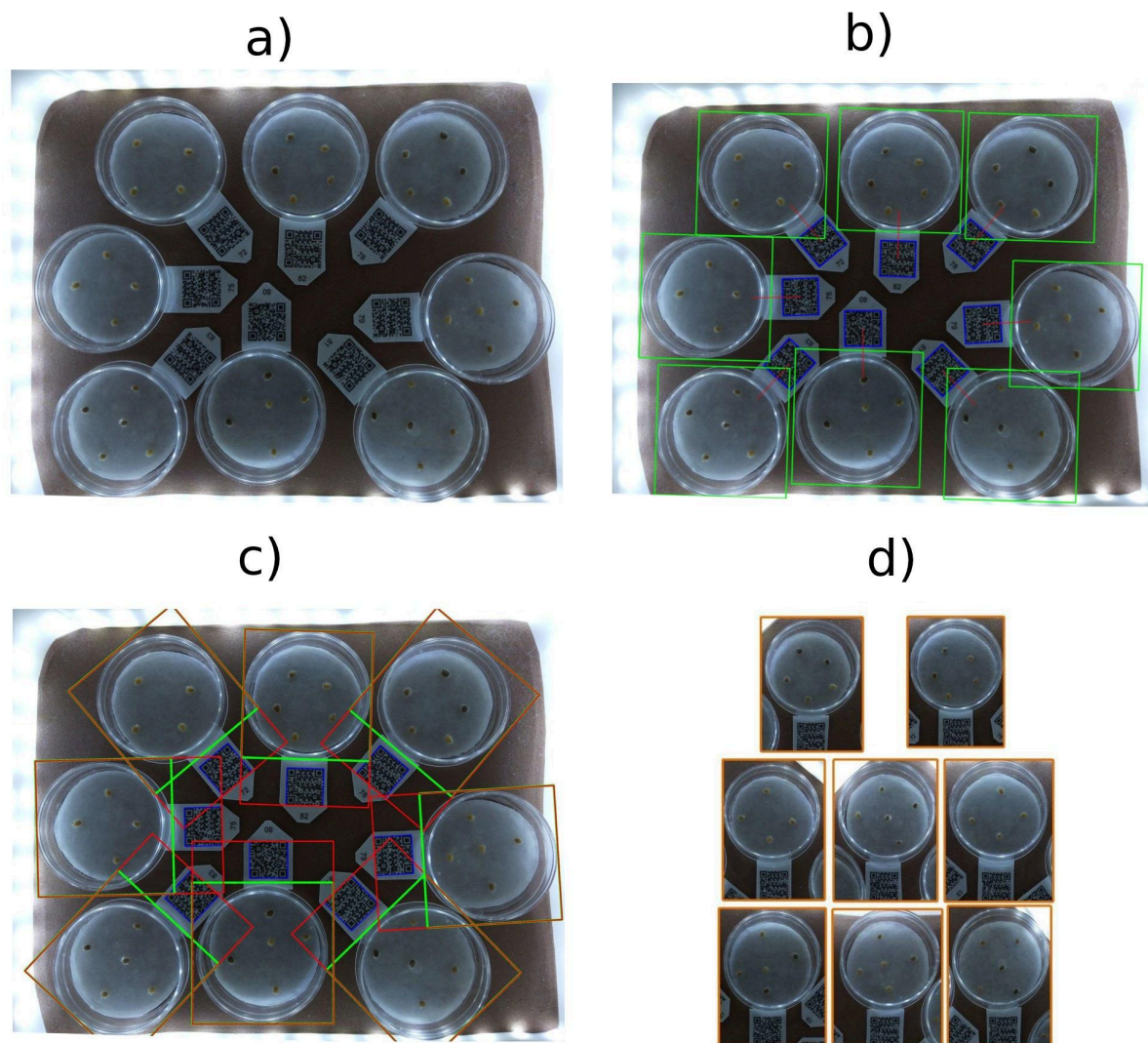


Figura 6. Procesamiento de imágenes en cuatro etapas (*Fuente: Elaboración propia*)

Las fotografías aisladas de cada par se analizan en busca de semillas. La interfaz web permite seleccionar cada placa de forma individual (figura 7) y visualizando en segundos su secuencia individual de fotografías en cámara rápida. También permite auditar y corregir de ser necesario las detecciones de semillas (ver figura 8) que se muestran en forma de anotaciones sobre cada imagen.

Cátologo de placas petri

Número de placa	Fecha inicio	Tiempo transcurrido (hs)	Última fecha	
21	2025-05-15T01:58:36.022	216	2025-05-24T02:26:18.800	
22	2025-05-15T01:58:36.022	216	2025-05-24T02:26:18.800	
23	2025-05-15T01:58:36.022	216	2025-05-24T02:26:18.800	
24	2025-05-15T02:58:36.145	215	2025-05-24T02:26:18.800	
25	2025-05-15T01:58:36.022	216	2025-05-24T02:26:18.800	
26	2025-05-15T01:58:36.022	216	2025-05-24T02:26:18.800	

Figura 7 Selección de placas (Fuente: Elaboración propia)



Figura 8 Representación de los principales sistemas de la interfaz (Fuente: Elaboración propia)

Para realizar correcciones es posible crear, eliminar o editar anotaciones. Se incluyen herramientas para indicar el estado de germinación e incluso para descartar semillas con presencia de hongos del conteo de la tasa de germinación. La figura 9 muestra la interfaz gráfica y un ejemplo de los resultados que exporta el sistema en formato csv, incluyendo datos de tratamiento y tasa diaria de germinación.

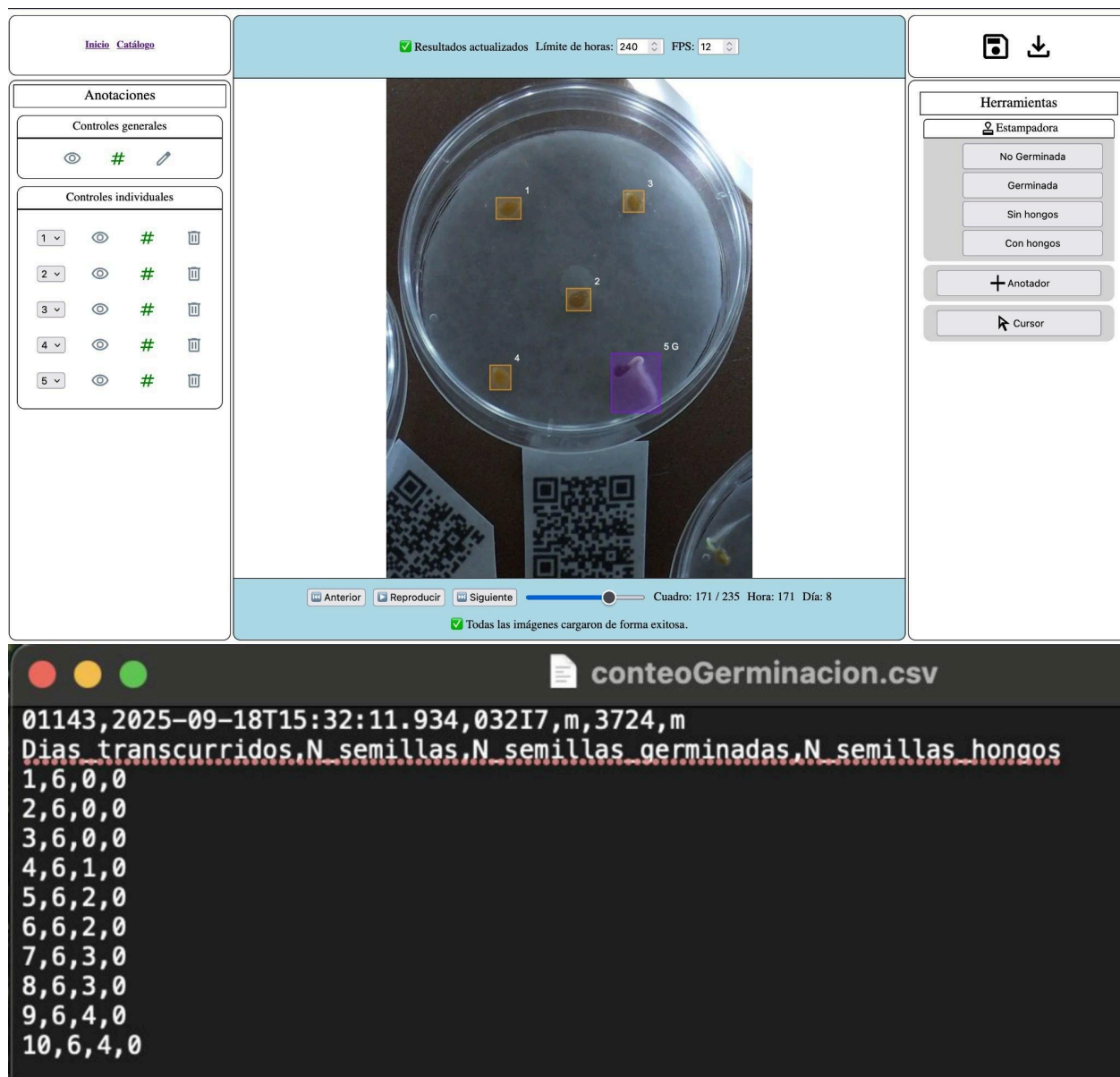


Figura 9 Interfaz y resultados obtenidos (Fuente: Elaboración propia)

Mediante la superposición y comparación de las detecciones a lo largo de cada secuencia de imágenes se filtran errores y se mantiene un seguimiento de cada semilla individual (ver figura 10). Esto permite que al marcar como germinada una semilla, ese estado se propaga a todos los cuadros posteriores, lo mismo aplica a la inversa. Este sistema de seguimiento asume que toda semilla que deje de ser detectada mantiene su último estado de germinación.

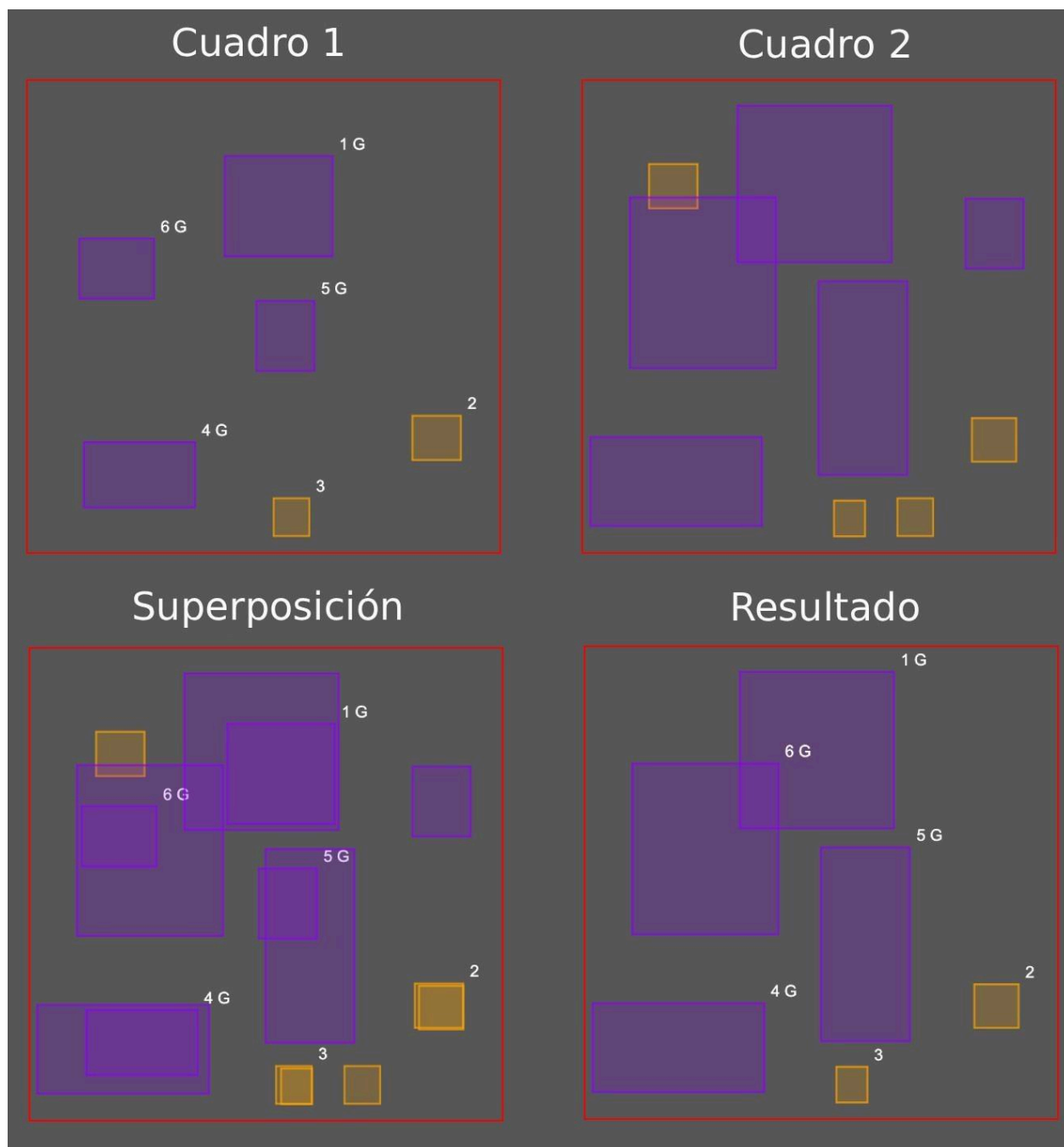


Figura 10 Representación del sistema de seguimiento y filtrado (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 1 Evaluación del modelo de detección de semillas (Fuente: Elaboración propia)

Clase	P	R	mAP50	mAP50-95
Todas	0.890	0.857	0.899	0.654
Semilla germinada	0.804	0.724	0.807	0.542

Semilla no germinada	0.977	0.989	0.990	0.766
Imágenes de entrenamiento			2427	
Imágenes de validación			484	

Tabla 2 Tipos de correcciones manuales en las pruebas de validación (*Fuente: Elaboración propia*)

Tipo	Descripción
A	Marcar semilla como germinada
B	Crear anotación de semilla
C	Redimensionar anotación de semilla
D	Descartar semilla falsamente detectada

Tabla 3 Resultados de pruebas de validación (Fuente: Elaboración propia)

Número de placa	Tipo de corrección	Tiempo transcurrido del ensayo		Duración de auditoría (min:s)
		(hs)	(días)	
1	A	232	10	00:50
2		221		01:05
		165	7	
		144	6	
3		113	5	00:55
4	B	85	4	01:50
		85		
	A	118	5	
	C	215	10	
		215		
5	A	142	6	00:38
6		127		3:04
		189	8	
7	D	0	1	01:07
8	Sin correcciones			01:25
9				00:52
10				00:44
Correcciones		14		
Correcciones promedio		1.4		
Duración total de auditoria (min:s)				12:30
Duración promedio (min:s)				01:15

El histograma de la figura 11 coincide con las métricas tabla 1, al principio de cada ensayo ninguna semilla se encuentra germinada. Por lo que suele haber menos errores al comienzo de los ensayos.

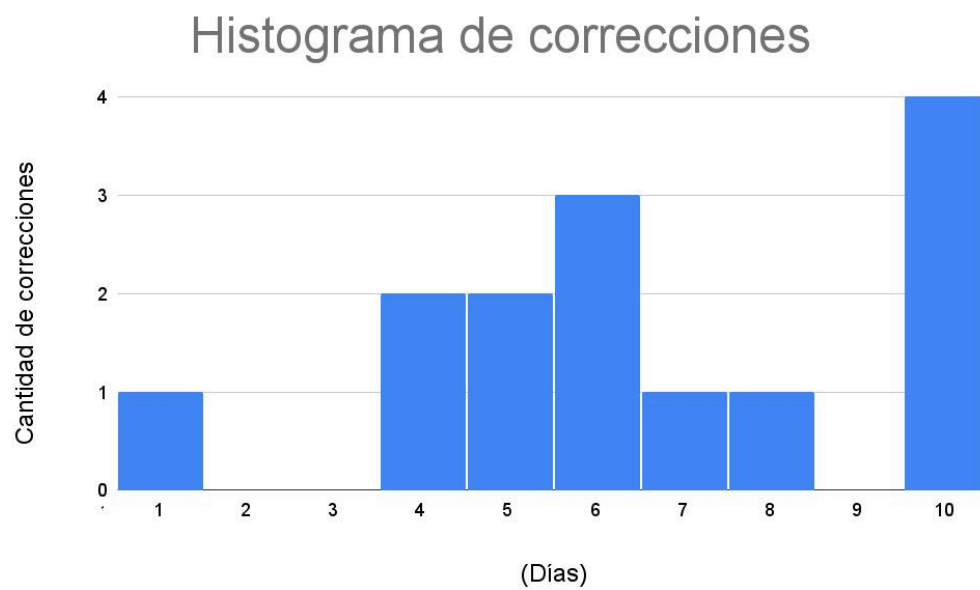


Figura 11. Histograma de correcciones totales en pruebas de validación (*Fuente: Elaboración propia*)

4. CONCLUSIONES

Por sí mismas, la trazabilidad y visualización de secuencias fotográficas de placas ya facilita enormemente la evaluación de ensayos de germinación. En conjunto, los sistemas desarrollados logran que evaluar la tasa de germinación diaria pase de ser un trabajo presencial de diez días a requerir en promedio menos de dos minutos de trabajo asincrónico por placa.

En aislamiento el modelo *YOLO* entrenado para la detección de semillas da resultados excelentes al enfrentarse a semillas no germinada. Pero su rendimiento disminuye considerablemente frente a las semillas germinadas, siendo insuficiente para obtener resultados confiables de forma autónoma. La integración de sistemas de filtrado mejora este rendimiento, pero igualmente son necesarias en promedio dos correcciones manuales por placa. Los resultados posiblemente mejoren utilizando más datos de entrenamiento y se destaca que el modelo puede ser entrenado para detectar otros tipos de semillas.

REFERENCIAS

Masteling, R., Voorhoeve, L., IJsselmuiden, J. et al., **2020**. DiSCount: computer vision for automated quantification of Striga seed germination. *Plant Methods* 16(1), Art. 60.

Geng, B., Dai, G., & Zhang, H., **2024**. Accurate non-destructive testing method for potato sprouts focusing on deformable attention. *INMATEH Agricultural Engineering*, 72(1), 402-413.

Genze, N., Bharti, R., Grieb, M. et al., **2020**. Accurate machine learning-based germination detection, prediction and quality assessment of three grain crops. *Plant Methods* 16(1), Art. 157.

Škrubej, U., Rozman Č., Stajniko D. **2015**. Assessment of germination rate of the tomato seeds using image processing and machine learning. *European Journal of Horticultural Science*. 80(1), 68-75.

Wolny, S., Mazak, A., Carpella C., Geist V. and Wimmer M., **2020**. Thirteen years of SysML: a systematic mapping study, *Software and Systems Modeling*, 19(1), 111–169.