

Apéndice G. Procedimientos complementarios de pruebas experimentales

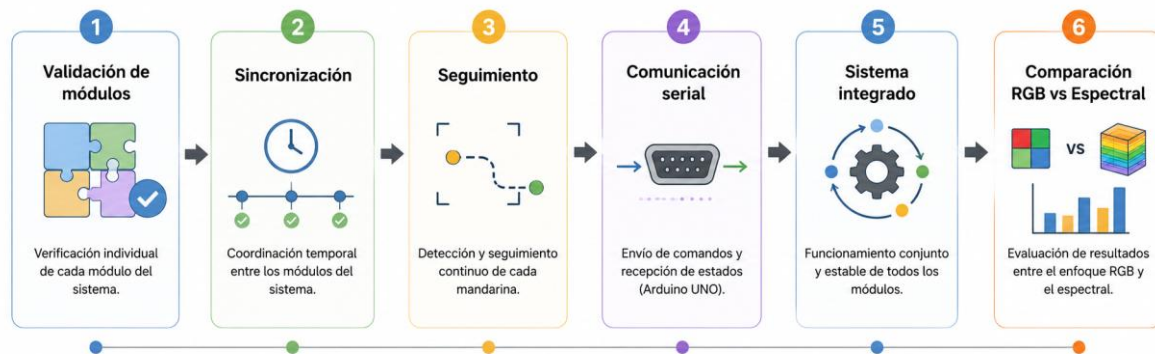
Procedimientos complementarios implementados para validar el funcionamiento del sistema automatizado de clasificación de frutos cítricos una vez finalizada su integración. Se presentan la estrategia general de validación, las pruebas funcionales realizadas sobre los diferentes módulos del sistema, la evaluación del prototipo operando de manera integrada y la comparación experimental entre una solución basada en imágenes RGB y la solución desarrollada mediante imágenes espectrales. Finalmente, se discuten los principales resultados obtenidos durante las pruebas y las limitaciones identificadas durante la operación del sistema.

G.1 Estrategia general de validación

Con el propósito de verificar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado, las pruebas experimentales fueron organizadas de manera progresiva, iniciando con la validación independiente de los módulos encargados del seguimiento, la sincronización temporal, la comunicación serial y el accionamiento del mecanismo de separación. Una vez comprobado el funcionamiento de cada componente, se realizaron pruebas sobre el sistema completamente integrado, permitiendo evaluar de forma conjunta las etapas de adquisición, detección, clasificación y separación automática de los frutos.

Esta estrategia permitió identificar y corregir posibles inconsistencias durante el proceso de integración antes de realizar la validación del prototipo completo. Asimismo, facilitó evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación, verificando tanto el desempeño de los módulos individuales como la estabilidad del flujo de procesamiento cuando múltiples frutos eran procesados de manera simultánea.

Figura G.1. Estrategia general de validación empleada para el sistema automatizado.



La ejecución secuencial de estas etapas permitió reducir la complejidad del proceso de validación, facilitando el aislamiento de posibles fallos durante la integración y garantizando que cada módulo cumpliera correctamente su función antes de incorporarse al sistema completo.

G.2 Validación funcional de los módulos del sistema

La estrategia de validación consistió en comprobar progresivamente cada una de las funciones críticas del sistema, iniciando con el accionamiento controlado de las compuertas, continuando con la sincronización entre la clasificación y el mecanismo de separación y finalizando con el seguimiento simultaneo de múltiples frutos sobre la banda transportadora. Esta metodología facilitó el aislamiento de posibles fallos durante la etapa de integración y permitió validar el funcionamiento de cada módulo antes de incorporarlo al sistema completo.

G.2.1 Verificación del mecanismo de separación

La primera etapa de validación estuvo orientada a comprobar el funcionamiento del mecanismo de separación antes de evaluar el sistema completo. Con este propósito, se modificó temporalmente el umbral de decisión del modelo de clasificación para forzar la generación de órdenes de accionamiento, permitiendo verificar el comportamiento del sistema independientemente del resultado producido por los modelos de inteligencia artificial.

Bajo esta configuración, se comprobó el correcto intercambio de información entre la aplicación principal, el módulo de planificación temporal, la comunicación serial y el Arduino UNO, verificando que cada orden generada produjera el accionamiento del servomotor correspondiente en el carril asignado. Durante esta etapa también se identificaron y corrigieron inconsistencias relacionadas con la sincronización y la ejecución de las órdenes, las cuales fueron ajustadas antes de iniciar las pruebas del sistema integrado.

Figura G.2. *Secuencia de validación del mecanismo de separación durante las pruebas funcionales.*



Una vez realizados los ajustes correspondientes, se ejecutaron múltiples pruebas de accionamiento verificando la apertura y el retorno de las compuertas para ambos carriles de clasificación. Estas pruebas permitieron confirmar el correcto funcionamiento del mecanismo de separación y establecer las condiciones necesarias para continuar con la validación de los demás módulos del sistema.

Tabla G.1. *Resultados de la validación del mecanismo de separación.*

Prueba	Repeticiones	Resultado
Carril 1	20	20/20
Carril 2	20	19/20
Comunicación serial	20	20/20
Retorno del servo	20	20/20

G.2.2 Validación de la sincronización temporal

Una vez verificado el funcionamiento del mecanismo de separación, se realizaron pruebas orientadas a validar la sincronización entre el instante en que un fruto era clasificado y el momento en que debía activarse el mecanismo de separación. Debido a que las mandarinas continúan desplazándose sobre la banda transportadora después de ser clasificadas, fue necesario garantizar que cada orden de accionamiento se ejecutara cuando el fruto alcanzara la posición correspondiente a su carril de separación.

Para ello, se realizaron múltiples pruebas variando el parámetro de retardo empleado por el planificador temporal hasta obtener una correspondencia adecuada entre la posición del fruto y la activación de la compuerta. Durante estas pruebas se verificó que el sistema continuara ejecutando las tareas de adquisición, detección, seguimiento y clasificación mientras permanecían pendientes eventos de accionamiento, confirmando el funcionamiento de la estrategia de planificación no bloqueante implementada.

Figura G.3. Verificación experimental de la sincronización entre la clasificación y el accionamiento del mecanismo de separación.



G.2.3 Validación del seguimiento de múltiples frutos

La última etapa de validación funcional estuvo orientada a comprobar el comportamiento del sistema cuando múltiples mandarinas se encontraban simultáneamente dentro de la zona de captura. Estas pruebas permitieron verificar el correcto funcionamiento del módulo de seguimiento, la asignación de identificadores únicos y la ejecución independiente de los eventos de clasificación y accionamiento para cada fruto.

Se evaluaron diferentes configuraciones de operación sobre la banda transportadora, incluyendo frutos desplazándose simultáneamente por ambos carriles, frutos consecutivos y diferentes separaciones entre muestras. Durante todas las pruebas se verificó que cada mandarina conservara su identificador durante el seguimiento, fuera clasificada una única vez al cruzar la línea virtual y generara un evento de accionamiento independiente, evitando interferencias entre frutos presentes simultáneamente en la escena.

Figura G.4. *Escenarios empleados para validar el seguimiento y procesamiento simultáneo de múltiples frutos.*



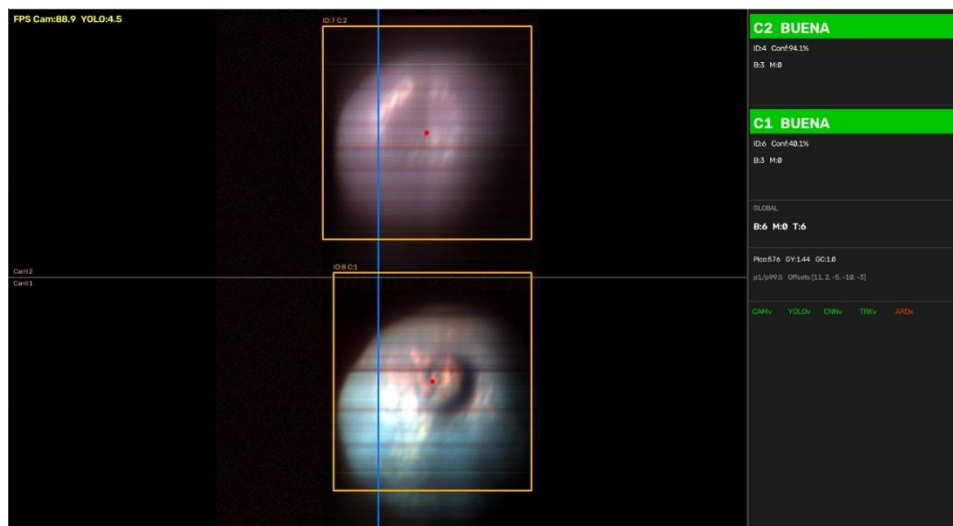
Los resultados obtenidos demostraron que el sistema mantuvo la correspondencia entre cada detección, el identificador asignado, la clasificación obtenida y el mecanismo de separación asociado, incluso cuando varios frutos eran procesados de manera concurrente. Asimismo, se verificó que la planificación temporal continuara ejecutando correctamente los eventos pendientes sin afectar las etapas de adquisición, detección y clasificación de nuevas muestras, confirmando el funcionamiento continuo del sistema integrado.

G.2.4. Entorno virtual para desarrollo y validación.

Como complemento al proceso de integración del sistema, se desarrolló un entorno virtual que permitió validar de manera controlada el flujo completo de procesamiento antes de realizar las pruebas sobre el prototipo físico. Esta herramienta facilitó la verificación del comportamiento del sistema durante las etapas de adquisición, detección, clasificación y planificación temporal, reduciendo los tiempos asociados a las pruebas experimentales y simplificando la identificación de posibles errores durante el desarrollo.

El entorno virtual reprodujo el funcionamiento del sistema en tiempo real mediante una interfaz gráfica, permitiendo visualizar simultáneamente el resultado de la detección, la asignación del identificador a cada fruto, la clasificación obtenida y el estado de los eventos programados para el accionamiento de las compuertas. Adicionalmente, esta herramienta permitió verificar el correcto funcionamiento de los principales módulos desarrollados para la integración del sistema, entre ellos el RollingBuffer, el algoritmo de Tracking, el Scheduler, la comunicación serial con el microcontrolador, la cola de eventos y la activación de los servomotores.

Figura G.5 Entorno virtual desarrollado para la validación del sistema en tiempo real.



Antes de realizar las pruebas sobre la banda transportadora, el entorno virtual fue utilizado para validar el flujo completo de procesamiento, verificando que cada detección mantuviera su correspondencia con el identificador asignado y que las órdenes de separación fueran ejecutadas en el instante programado, incluso durante el procesamiento concurrente de múltiples frutos. De esta manera, el entorno virtual constituyó una herramienta de apoyo para la depuración e integración del sistema, permitiendo disminuir el número de pruebas sobre el prototipo físico y facilitando la validación del funcionamiento continuo del sistema.

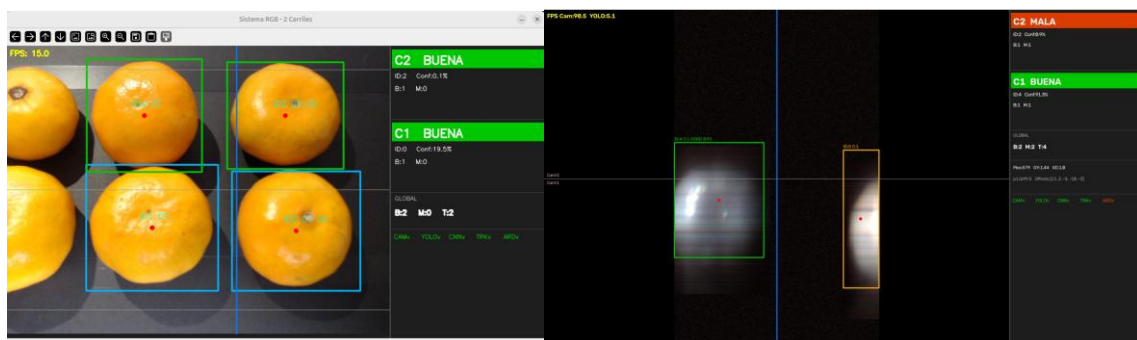
G.3 Comparación entre el sistema RGB y el sistema espectral

Con el propósito de evaluar el aporte de la información espectral al sistema desarrollado, se realizó una comparación experimental entre una solución basada en imágenes RGB y la propuesta implementada mediante imágenes espectrales SWIR. La comparación consideró tanto el desempeño de los modelos de clasificación como las principales características operativas de cada sistema.

G.3.1 Comparación de la arquitectura de ambos sistemas

La Figura G.6 presenta el flujo general de procesamiento de ambos sistemas. Mientras la solución RGB utiliza imágenes visibles adquiridas mediante una cámara Webcam Logitech, la propuesta espectral incorpora información de reflectancia en cinco bandas seleccionadas, permitiendo alimentar el modelo CNN-Transformer con información adicional para la etapa de clasificación.

Figura G.6. Comparación del flujo de procesamiento entre el sistema RGB y el sistema espectral.



G.3.2 Comparación del desempeño de clasificación

La evaluación se realizó utilizando el mismo protocolo experimental para ambos sistemas, empleando el mismo conjunto de prueba (Holdout) con el fin de garantizar una comparación objetiva. La Tabla G.4 resume las principales métricas obtenidas por cada modelo.

Tabla G.2. *Comparación del desempeño de los modelos RGB y espectral.*

Métrica	CNN RGB	CNN-Transformer
Accuracy	0.9976	0.7750
Precision	1	0.7757
Recall	0.9946	0.7750
F1-score	0.9975	0.7749
AUC	—	0.8125

G.3.3 Análisis comparativo

La comparación realizada evidencia que ambos sistemas permiten automatizar el proceso de clasificación de mandarinas; sin embargo, presentan diferencias importantes en cuanto a desempeño e implementación. El sistema RGB ofrece una arquitectura más simple, menor costo computacional y tiempos de inferencia reducidos, lo que favorece su utilización en aplicaciones donde la velocidad de procesamiento constituye un factor prioritario.

Por su parte, el sistema espectral incorpora información de reflectancia obtenida en diferentes longitudes de onda, permitiendo caracterizar propiedades del fruto que no son perceptibles únicamente mediante el color visible. Como resultado, el modelo CNN-Transformer obtuvo un desempeño aceptable sobre el conjunto de test, demostrando una viabilidad para diferenciar frutos con características visuales similares y capacidad de generalización frente a nuevas muestras.

Tabla G.5. Comparación cualitativa entre el sistema RGB y el sistema espectral.

Aspecto	Sistema RGB	Sistema espectral
Sensor	Cámara RGB	Cámara SWIR
Información utilizada	Color visible	Reflectancia espectral
Tiempo de inferencia	Menor	Mayor
Costo computacional	Bajo	Alto
Complejidad de implementación	Baja	Alta
Capacidad para identificar defectos poco visibles	Limitada	Superior
Desempeño obtenido en este trabajo	Baseline	Mejor desempeño sobre el <i>Holdout</i>

En conjunto, las pruebas experimentales permitieron verificar el funcionamiento del sistema automatizado desde la adquisición espectral hasta el accionamiento del mecanismo de separación. Asimismo, la comparación realizada evidenció que, aunque una solución basada en imágenes RGB ofrece menores requerimientos computacionales y tiempos de inferencia más reducidos, la incorporación de información espectral proporciona una mejor capacidad de clasificación al aprovechar características del fruto que no pueden observarse únicamente en el espectro visible. Estos resultados respaldan la viabilidad de la solución propuesta y justifican el uso de imágenes espectrales para aplicaciones de clasificación automática de calidad en frutos cítricos.

G.3.4. Desempeño computacional

El desempeño computacional del sistema fue evaluado durante la operación en tiempo real sobre el prototipo desarrollado, monitoreando los tiempos promedios de adquisición, detección y clasificación. Estos resultados permiten estimar la capacidad de respuesta del sistema durante la inferencia y verificar que el procesamiento se realiza dentro de los requerimientos de la aplicación.

La Tabla G.6 presenta los tiempos promedio obtenidos para las diferentes etapas del pipeline computacional, incluyendo la adquisición de la imagen, la detección mediante YOLOv5, la clasificación con el modelo CNN-Transformer y la velocidad de comunicación serial.

Tabla G.6. *Desempeño computacional del sistema.*

Parámetro	Valor
Tiempo de adquisición	17.1 ms
Tiempo de detección (YOLOv5)	194.2 ms
Tiempo de clasificación (CNN-Transformer)	174.9 ms
Comunicación serial	115200 baudios

G.3.5. Parámetros de operación

Además del desempeño computacional, se evaluaron los principales parámetros de operación del sistema durante las pruebas experimentales realizadas sobre la banda transportadora. Estas mediciones permiten caracterizar el comportamiento temporal del prototipo y verificar la sincronización entre la clasificación de los frutos y el accionamiento del mecanismo de separación.

La Tabla G.7 resume los parámetros operacionales obtenidos durante las pruebas, incluyendo la velocidad de la banda transportadora, el tiempo de espera programado por el *scheduler* entre la clasificación y el accionamiento del servomotor, el rendimiento promedio alcanzado durante la operación continua, el intervalo medio entre frutos procesados y el consumo aproximado de potencia del sistema.

Tabla G.7 *Parámetros de operación del sistema.*

Parámetro	Valor
Velocidad de la banda	120 rpm
Delay del <i>scheduler</i> (clasificación → servo)	40.5 s
Rendimiento promedio	26 frutos/min
Tiempo promedio entre frutos	2.3 s
Tiempo de apertura de la compuerta	800 ms
Potencia aproximada	0.43 W/h aprox

Es importante señalar que el tiempo de espera de 40.5 s no corresponde al tiempo de procesamiento del sistema, sino al intervalo necesario para que el fruto se desplace desde la estación de clasificación hasta la estación de separación sobre la banda transportadora. Durante este período, el sistema continúa procesando nuevos frutos de manera continua mediante el mecanismo de planificación implementado por el *scheduler*, permitiendo mantener la operación en tiempo real sin detener el flujo de procesamiento.