

Visión por computador en tractores robotizados para agricultura de precisión

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y DE CONTROL

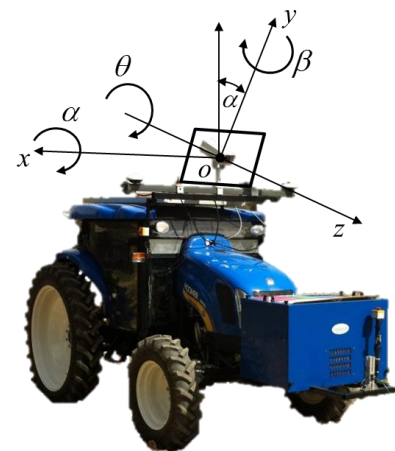


UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Informática

Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial

Gonzalo Pajares Martinsanz



Contexto



Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management

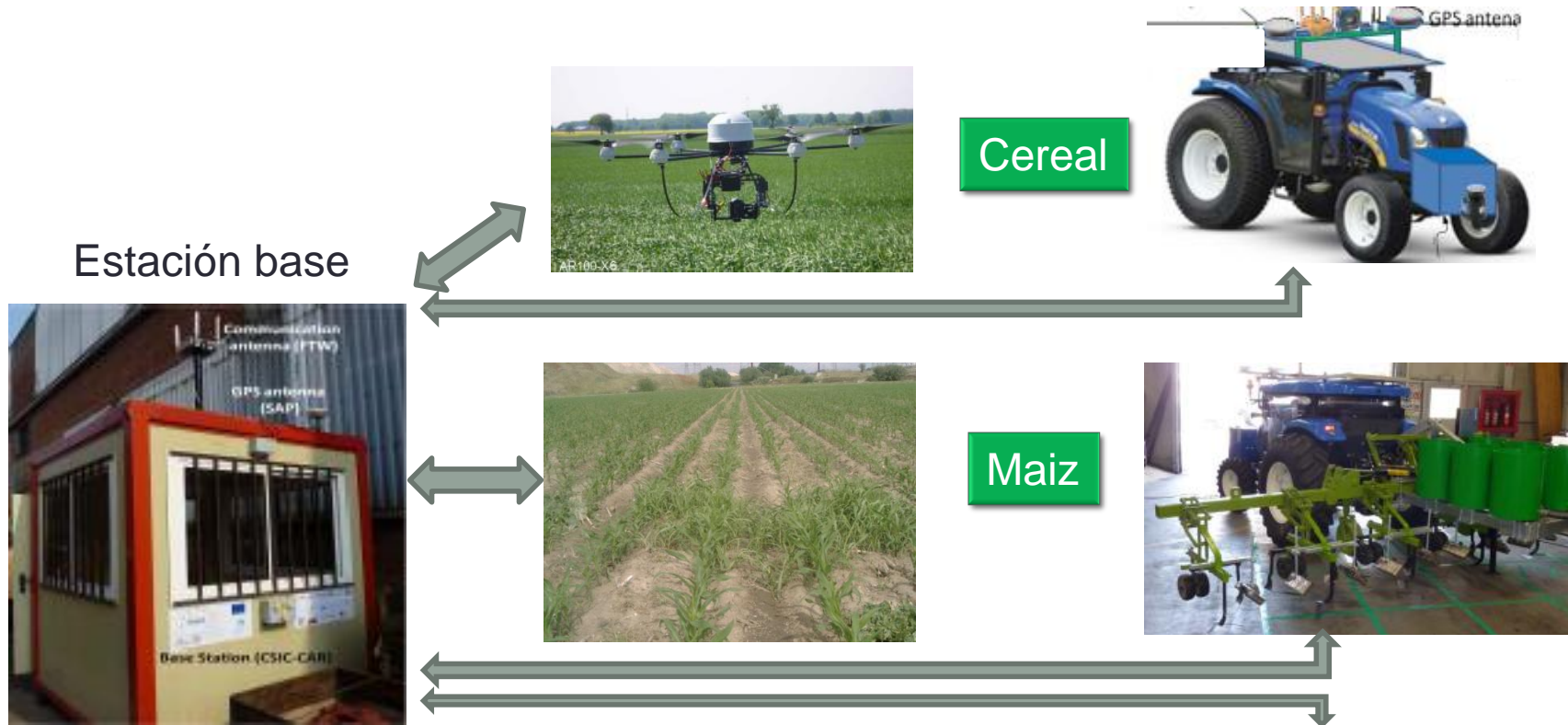
FLOTA DE ROBOTS



SISTEMA DE VISIÓN EN MAÍZ



SISTEMAS Y TAREAS



Cereal



Maiz



Olivos

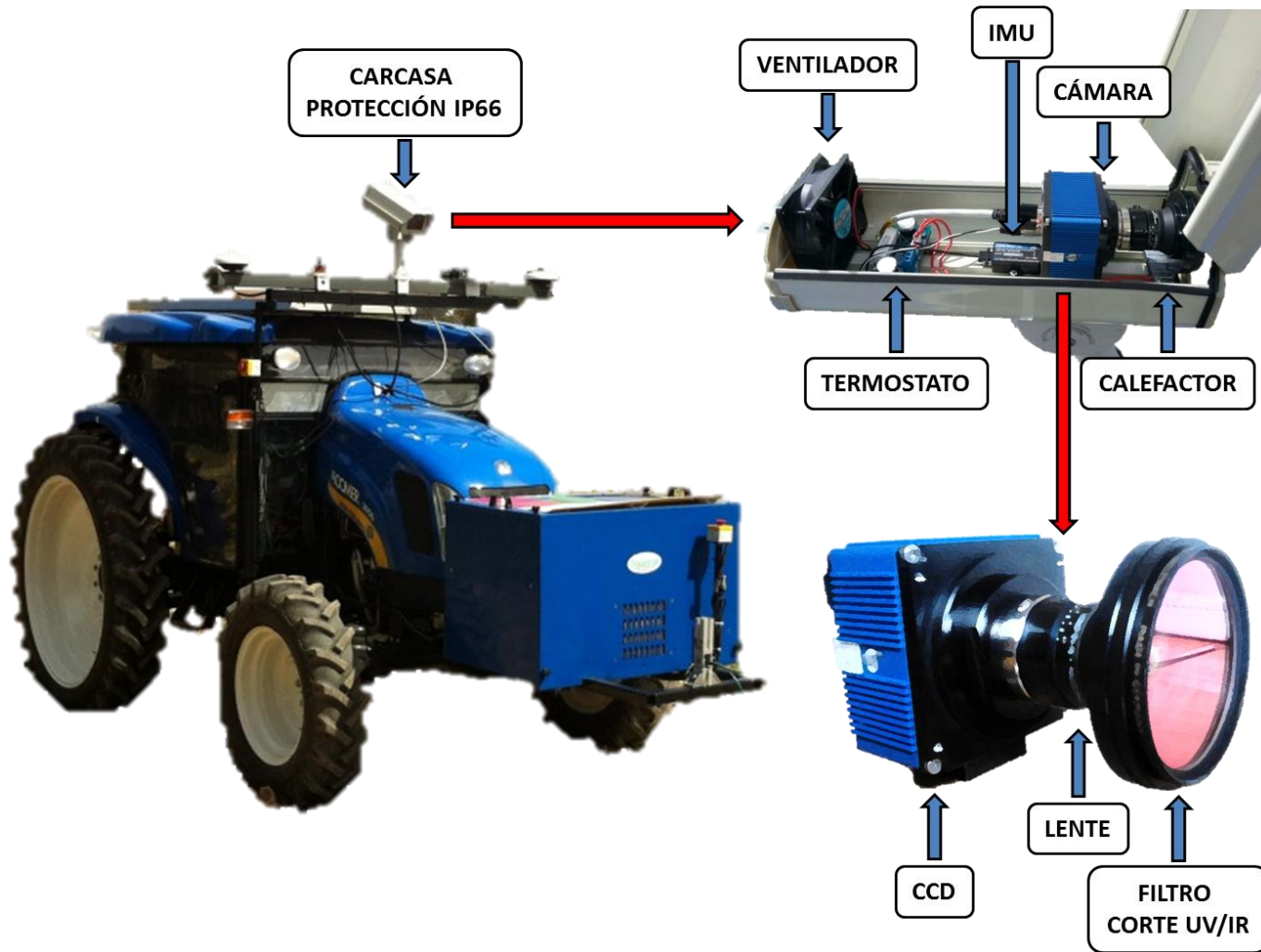


Sistema de Visión

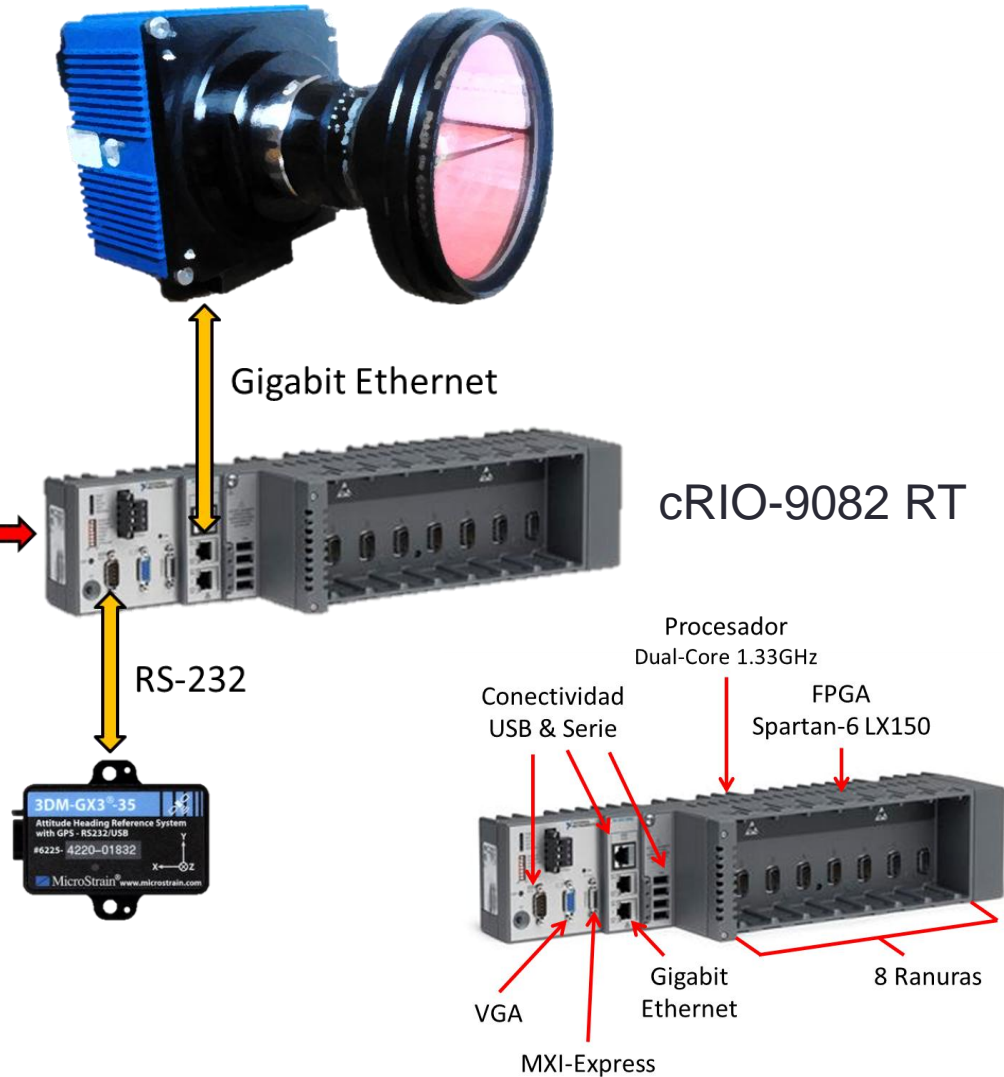
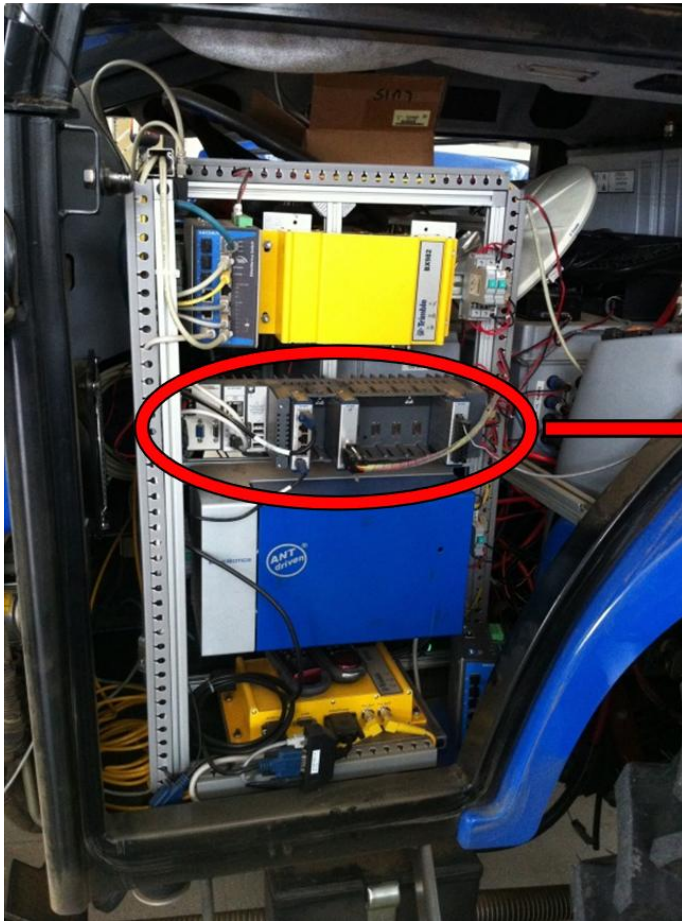
Problemas en entornos agrícolas de exterior

<ul style="list-style-type: none"> • Distorsiones radiométricas • Influencia del espectro infrarrojo y ultravioleta • Condiciones de iluminación cambiantes 	<p>Obtención de imágenes de calidad</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de plantas (cultivo y malas hierbas) • Condiciones climatológicas adversas • Plantas enmascaradas (barro o en proceso de secado) 	<p>Segmentación y umbralización</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Terreno agrícola con desniveles • Desviaciones del tractor respecto de su trayectoria • Tratamiento específico por zonas: solapamiento 	<p>Identificación de líneas de cultivo</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Localización espacial de malas hierbas 	<p>Identificación de malas hierbas</p>

Prototipo RHEA – Hardware

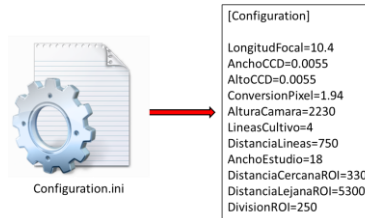


Prototipo RHEA – Hardware



Prototipo RHEA – Software

- Interfaz de configuración



- Interfaz de usuario

Rutas del sistema

Ruta configuración del sistema de visión:

Ruta DLL procesamiento:

Segmentación de la imagen

Binarización:

Apertura:

Tratamiento de la imagen

Vignetting:

Balance de blancos:

Detección de líneas de cultivo

Detección de líneas:

Grados orientación:

Ángulos:

Pitch:

Roll:

Yaw:

Delimitación de la ROI en píxeles

Superior:

Inferior:

Izquierda:

Derecha:

Imagen procesada

Guiado

Desplazamiento superior (mm):

Desplazamiento inferior (mm):

Tiempo de procesamiento

Duración media (ms):

Procesado actual (ms):

Iniciar tratamiento:

Finalizar tratamiento:

Tratamiento selectivo



Vídeo 1

Vídeo 2

Vídeo 3

Guiado

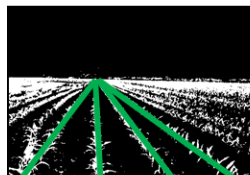


Vídeo: primeros pasos

Vídeo: perfección

Sistema de Visión

- Obtención de imágenes de calidad
- Segmentación y umbralización
- Identificación precisa de líneas de cultivo
- Detección de malas hierbas
- Guiado del vehículo autónomo
- Controlar el solapamiento



Proceso de identificación de líneas de cultivo y malas hierbas

Obtención de la imagen



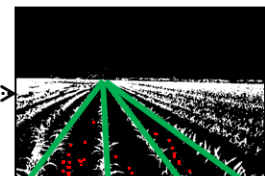
Extracción de verdes

Umbralización



Identificación de líneas de cultivo

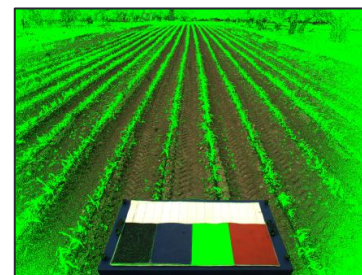
Identificación de malas hierbas



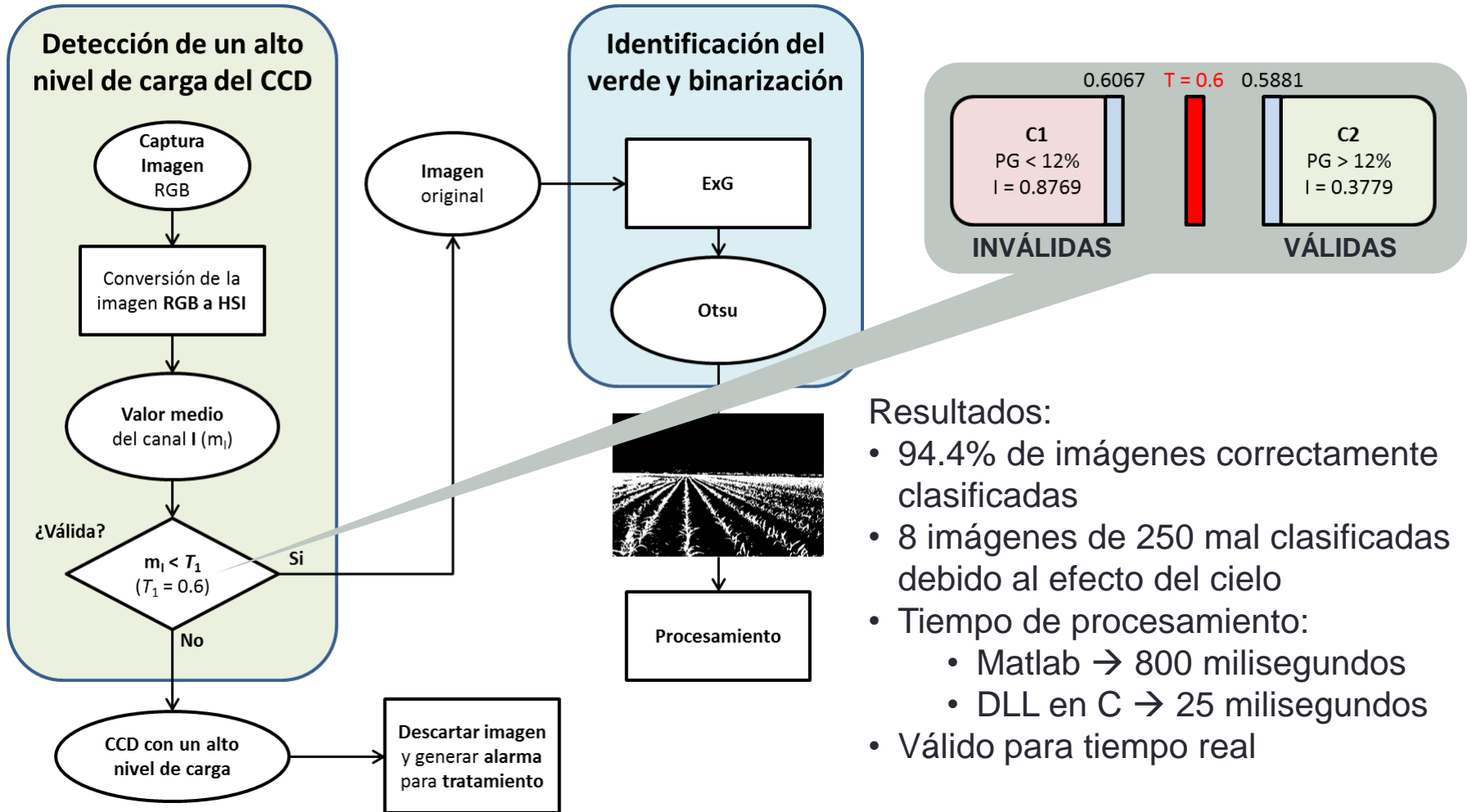
Tiempo real: 890 ms (8 km/h) – 2381 ms (3 km/h)

Obtención de imágenes de calidad

- Identificación de imágenes con alta intensidad luminosa
- Control del tiempo de exposición
 - Basado en el color blanco
 - Basado en la intensidad lumínica
- Efecto *vignetting*
- Balance de blancos



Identificación de imágenes con alta intensidad luminosa



Resultados:

- 94.4% de imágenes correctamente clasificadas
- 8 imágenes de 250 mal clasificadas debido al efecto del cielo
- Tiempo de procesamiento:
 - Matlab → 800 milisegundos
 - DLL en C → 25 milisegundos
- Válido para tiempo real

Control del tiempo de exposición

- Ajuste automático y variable en función de la climatología
 - Sistema óptico con apertura del iris ajustable automáticamente:
 - **Ventaja:** evita el procesamiento software
 - **Inconvenientes:** precio, vibraciones del vehículo
 - Sistema óptico con ajuste manual del iris:
 - **Ventajas:** precio, independiente de las vibraciones del vehículo
 - **Inconvenientes:** cámara con ajuste del tiempo de exposición, procesamiento software

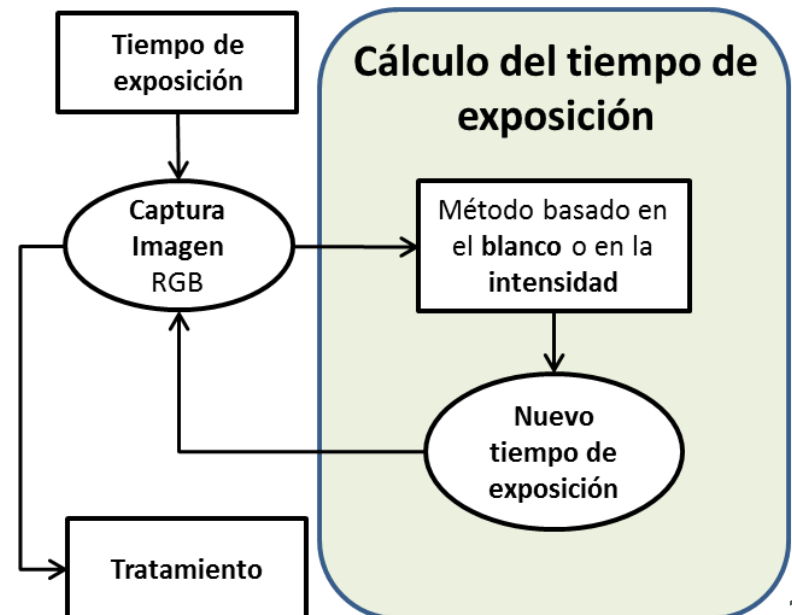


Sistema óptico automático

o

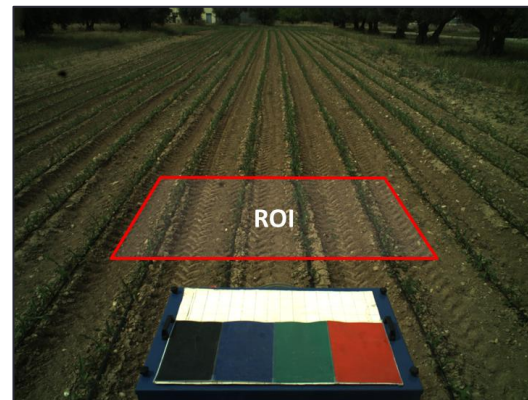
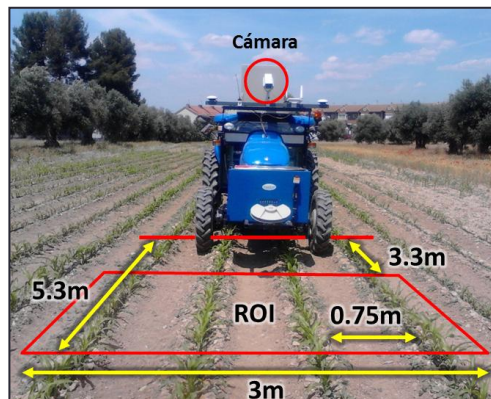


Sistema óptico manual y cámara que permite el ajuste del tiempo de exposición



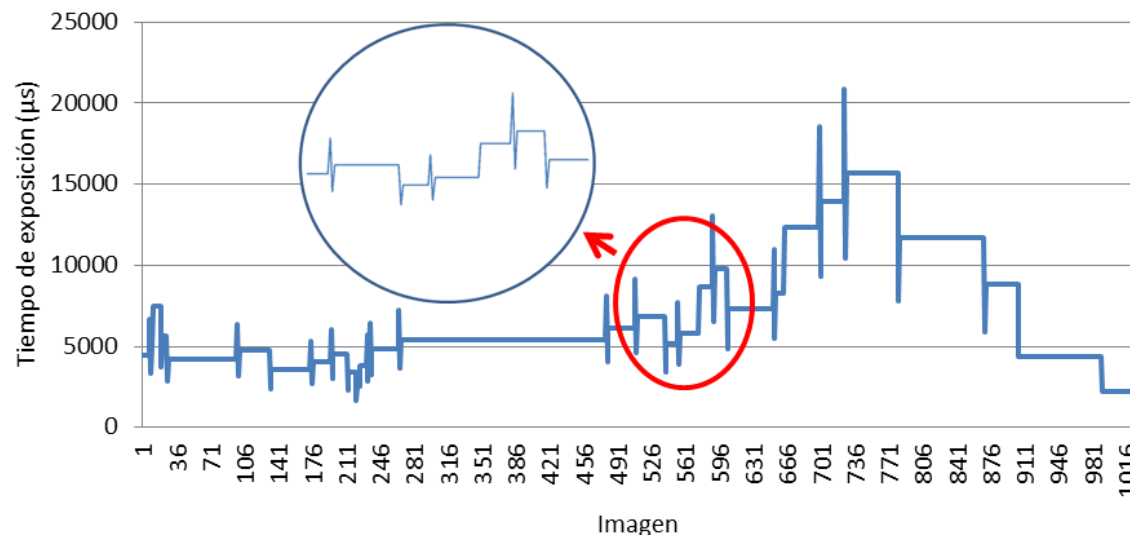
Control del tiempo de exposición

- Basado en el color blanco
 - Píxel blanco puro: $R = 255, G = 255, B = 255$ (saturación)
 - Obtener diferencias del valor de cada canal respecto al valor 200 (evitar la saturación)
 - Si dos de las componentes difieren en el mismo sentido, se incrementa o disminuye el tiempo de exposición.
 - **Ventajas:** tiempo de procesamiento reducido
 - **Inconvenientes:** necesita una referencia blanca, susceptible a errores al no estudiar la zona de interés (ROI)



Control del tiempo de exposición

- Basado en la intensidad lumínica
 - Conversión del espacio de color RGB a HSI $\rightarrow m_I$ (canal I)
 - Estudio de imágenes con alta intensidad luminosa \rightarrow umbral 0.6
 - Evitar saturación (0.6) \rightarrow Umbral inferior 0.1 y superior 0.4
 - Si m_I está por debajo de 0.1 se incrementa y si es superior a 0.4 se decrementa el valor del tiempo de exposición un 10% del valor del tiempo anterior
 - Entre 2 y 3 imágenes para ajustar el tiempo tras un cambio

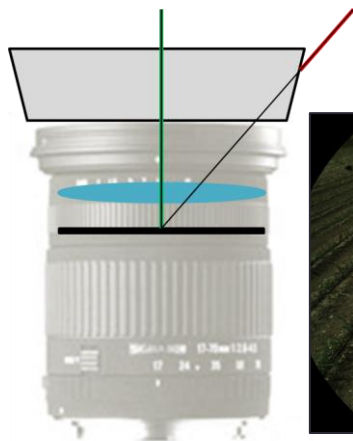


Efecto vignetting

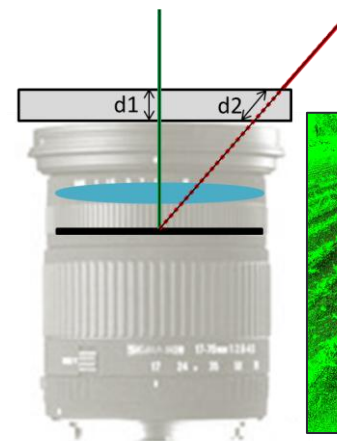
- Aparición de bordes negros o sombreados acentuados sobre todo en las esquinas:
 - **Mecánico**: bloqueo físico por parasoles, filtros u objetivos mal colocados
 - **Óptico**: apertura del iris al máximo, construcción del objetivo y disposición de las lentes o filtros creados por múltiples capas superpuestas donde los rayos recorren distancias distintas



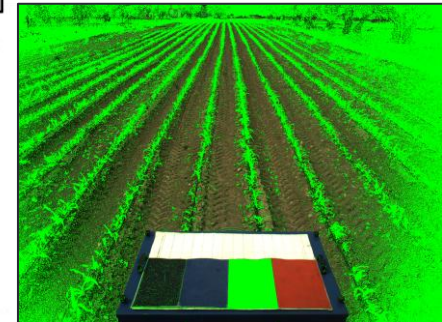
Sin filtros o parasoles



Vignetting mecánico

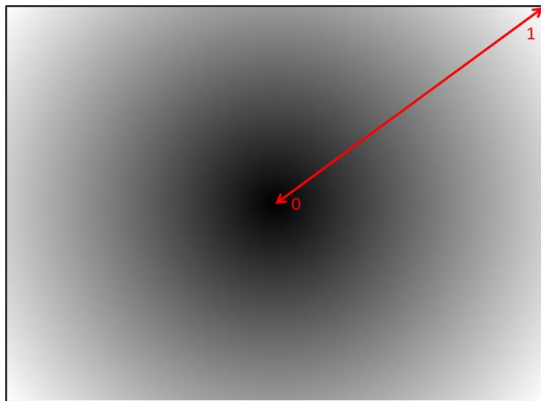


Vignetting óptico



Efecto vignetting

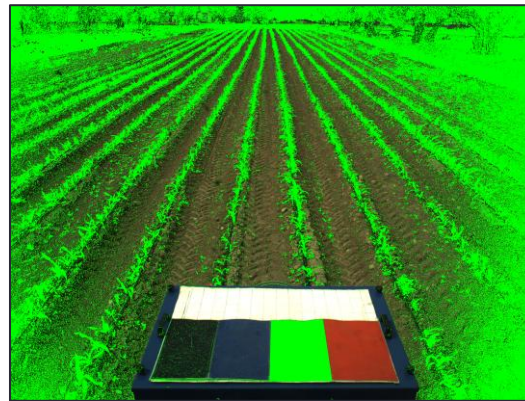
- Corrección del *vignetting*:
 - **Mecánico**: ajustar los parasoles, filtros u objetivos mal colocados
 - **Óptico**: corrección de intensidad en cada píxel sobre cada canal
 - Obtención de la distancia del píxel al centro de la imagen
 - Cada canal afectado es modificado por un factor distinto
 - El nuevo valor depende de la distancia y del factor de corrección



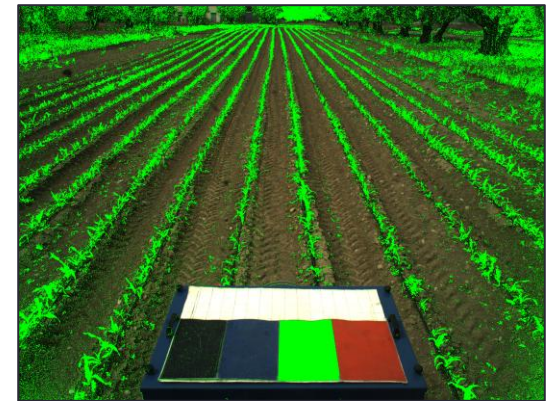
$$R(x, y) = 1 + FR \cdot dist(x, y)$$

$$G(x, y) = 1 + FG \cdot dist(x, y)$$

$$B(x, y) = 1 + FB \cdot dist(x, y)$$



Sin corrección del vignetting



Corrección del vignetting
sobre el canal rojo

Efecto vignetting

- Resultados:
 - Extracción de verdes (píxeles correctamente clasificados):
 - Imagen original: 80.3%
 - Imagen modificada: 87.3%
 - Tiempo de procesamiento:
 - Imagen original (extracción de verdes): 82.5 ms
 - Imagen modificada (corrección y extracción de verdes): 132.2 ms
- Válido para tiempo real

Balance de blancos

- Escalar la luminancia relativa de la imagen:
 - Los objetos aparecen con sus colores naturales y mantienen un equilibrio entre ellos
- Se necesita una zona de referencia blanca
- Cada canal se escala en función de su cercanía al color blanco puro cuyo valor es 255

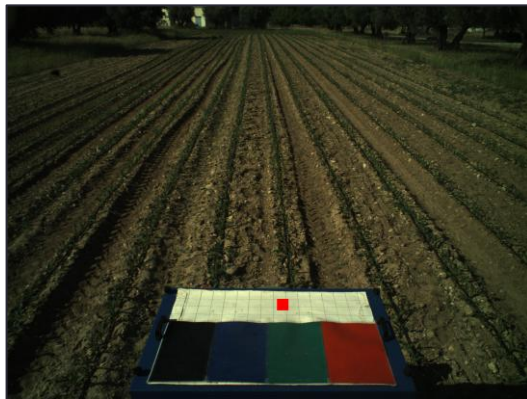


Imagen original



*Imagen modificada con
balance de blancos*

Balance de blancos

- Resultados:
 - Extracción de verdes (píxeles correctamente clasificados):
 - Imagen original: 80.3%
 - Imagen modificada: 81.6%
 - Tiempo de procesamiento:
 - Imagen original (extracción de verdes): 82.5 ms
 - Imagen modificada (balance y extracción de verdes): 95.7 ms
 - Ligera mejora:
 - Los tres canales son modificados proporcionalmente
 - Atractiva visualmente para el ojo humano
 - Válido para tiempo real

Segmentación y umbralización

- Dividir una imagen digital en zonas disjuntas e individualizadas:
 - Simplificar y/o cambiar la representación por otra más significativa
 - Asignar a cada píxel de la imagen una etiqueta que lo defina
- En imágenes agrícolas → realzar la capa vegetal
- Índices vegetativos
- Paso previo a la umbralización (binarización)



Imagen original



Imagen segmentada



Imagen binarizada

Segmentación y binarización basada en $YD_B D_R$

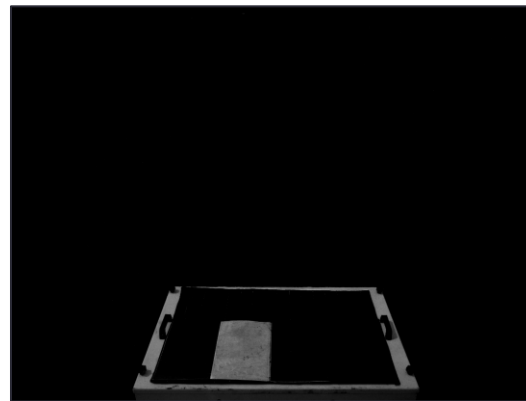
- Basado en el modelo YUV
- Consta de:
 - $Y \rightarrow$ Luminancia
 - $D_B \rightarrow$ Crominancia azul
 - $D_R \rightarrow$ Crominancia roja
- Verde representado en D_R



Imagen original



Luminancia



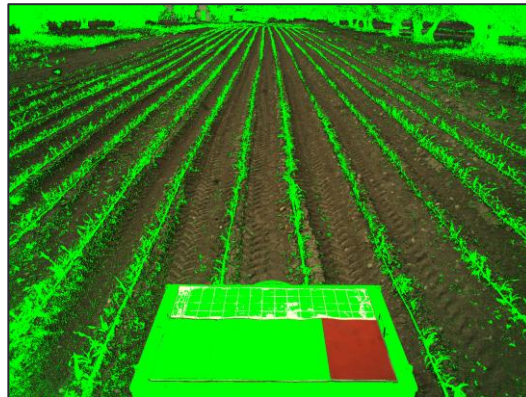
Crominancia azul



Crominancia roja

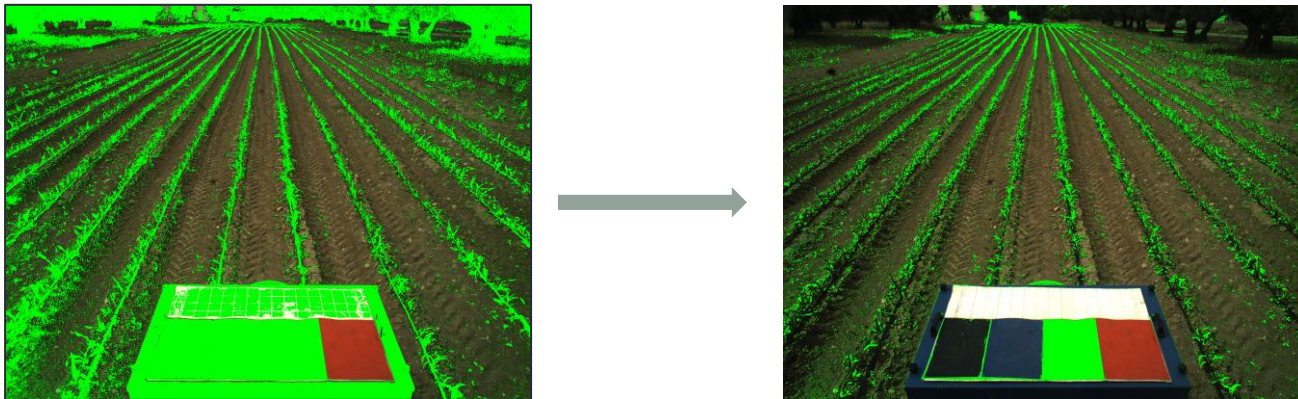
Segmentación y binarización basada en $YD_B D_R$

- Aprendizaje del umbral (2000 imágenes):
 - (Crominancia roja – Crominancia azul) $\rightarrow D'_R$
 - Se aplica el método de Otsu sobre D'_R
 - El valor promedio de Otsu se fija como umbral
- Fase de decisión:
 - Transformar de RGB a $YD_B D_R$
 - Si el valor D_R del píxel es mayor que el umbral \rightarrow Planta
 - Si el valor D_R del píxel es menor o igual que el umbral \rightarrow Suelo



Segmentación y binarización basada en $YD_B D_R$

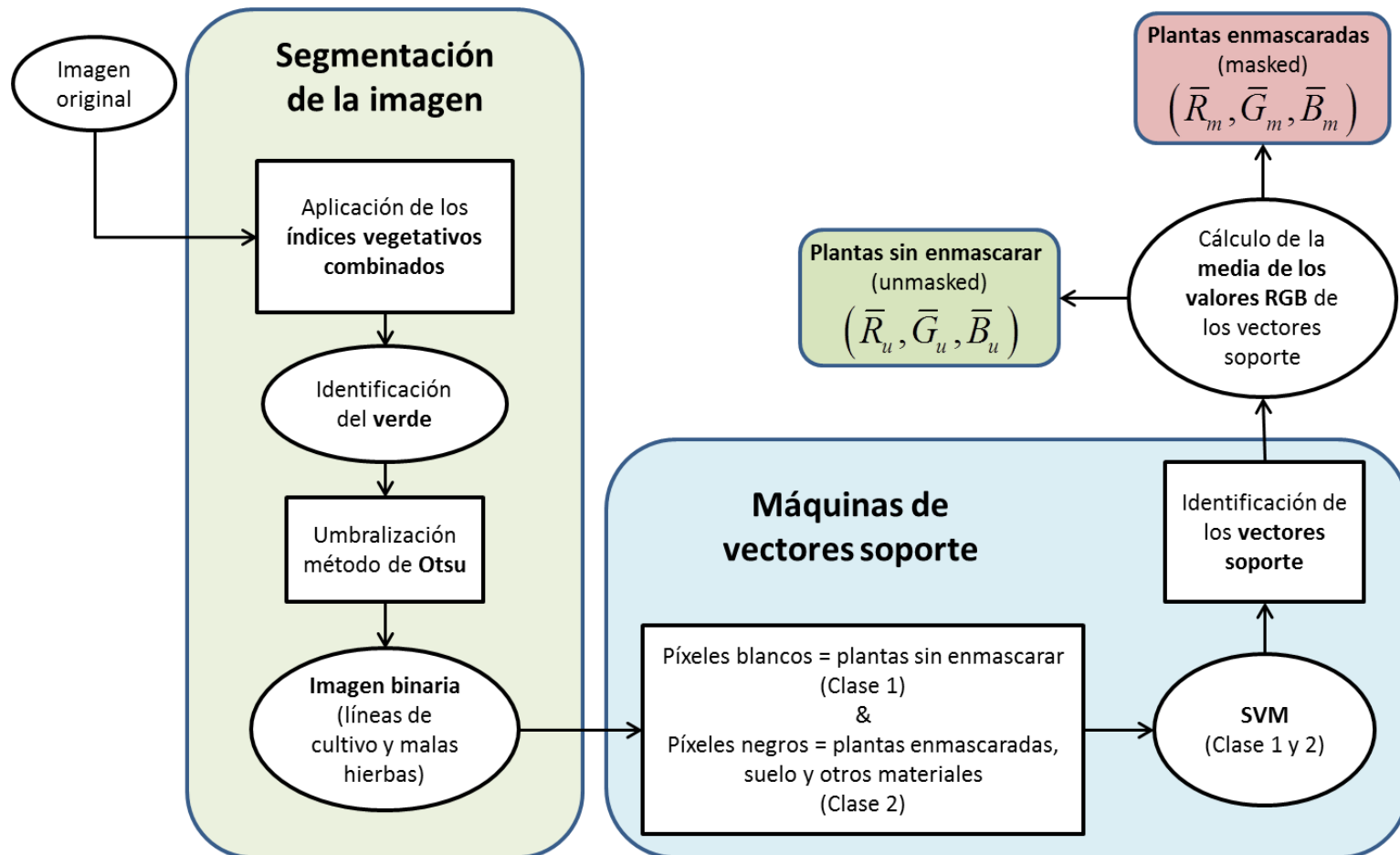
- Eliminar píxeles cercanos al blanco, negro o azul:
 - Blanco o negro: suma de las tres componentes de cada píxel
 - Negro: valor menor que 120
 - Blanco: valor mayor que 500
 - Azul: eliminar píxeles pertenecientes a la crominancia azul



- Resultados:
 - Píxeles correctamente clasificados: 88.6%
 - Tiempo de procesamiento: 93.2 milisegundos
 - Válido para tiempo real
 - Infra-segmentación → no son necesarias operaciones morfológicas

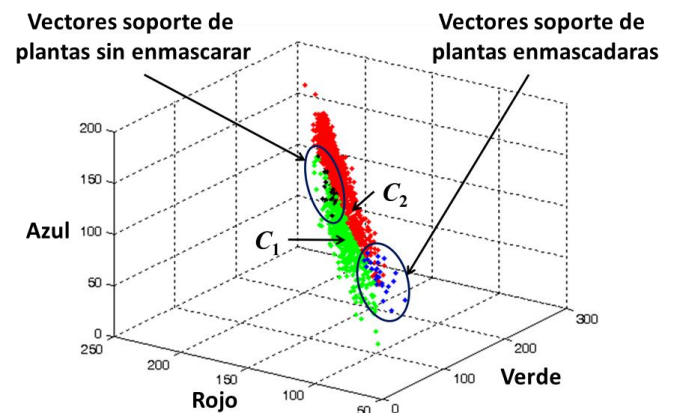
Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Riego natural o artificial
- Proceso de secado tras un tratamiento herbicida



Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Fase de aprendizaje:
 - Identificación del verde mediante la combinación de índices vegetativos
 - Umbralización mediante el método de Otsu → imagen binaria
 - **Clase 1**: píxeles blancos → plantas sin enmascarar
 - **Clase 2**: píxeles negros → plantas enmascaradas, suelo y otros materiales
 - Identificación de los vectores soporte de cada clase:
 - Vectores soporte: patrones más significativos de cada clase
 - **Clase 1**: plantas con cierto grado de verdor
 - Vector soporte de la **Clase 2**: patrones más cercanos a la **Clase 1**
 - Cálculo de los límites entre las clases:
 - Media
 - Desviación estándar



Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Fase de decisión:
 - Plantas: identificación mediante su componente espectral verde
 - Porcentaje de verde de cada conjunto de vectores soporte (r)
 - Desviación con respecto a la componente espectral verde (t)
 - Clasificación:
 - Porcentaje de verde del píxel a clasificar
 - Valor superior al del vector soporte de la **Clase 1** → **planta sin enmascarar**
 - Valor superior o igual al del vector soporte de la **Clase 2** y menor al de la **Clase 1** (valor entre los vectores soporte) → **planta enmascarada**
 - Valor inferior al del vector soporte de la Clase 2 → suelo y otros materiales

SUELO Y RESTO

PLANTAS ENMASCARADAS

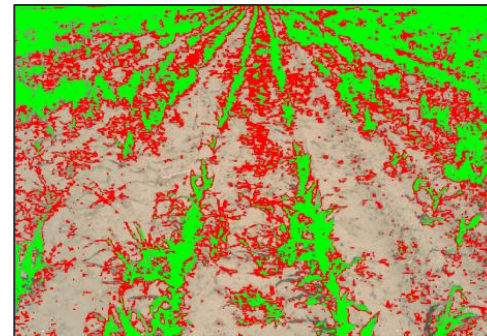
PLANTAS SIN ENMASCARAR

Vectores soporte
Clase 2: $r_{mG}-t_{mG}$

Vectores soporte
Clase 1: $r_{uG}-t_{uG}$

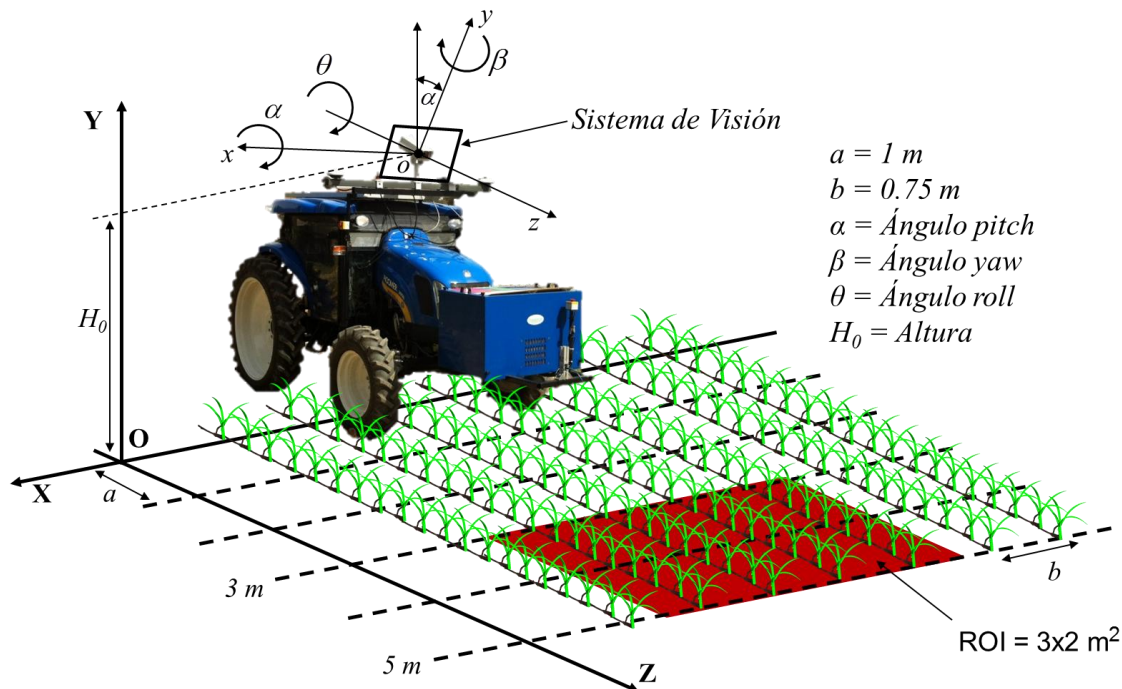
Identificación de plantas enmascaradas y sin enmascarar mediante Máquinas de Vectores Soporte

- Resultados:
 - Fase de aprendizaje:
 - Función de decisión: núcleos (gaussiano, polinomio, sigmoide) → Gaussiano
 - Distancia mínima de los hiperplanos muy pequeña (1.86×10^{-5}) $\sigma^2 = 3.5$
 - Es posible distinguir entre plantas enmascaradas y sin enmascarar
 - Permite un análisis post-tratamiento
 - Porcentaje de éxito del 93.1%



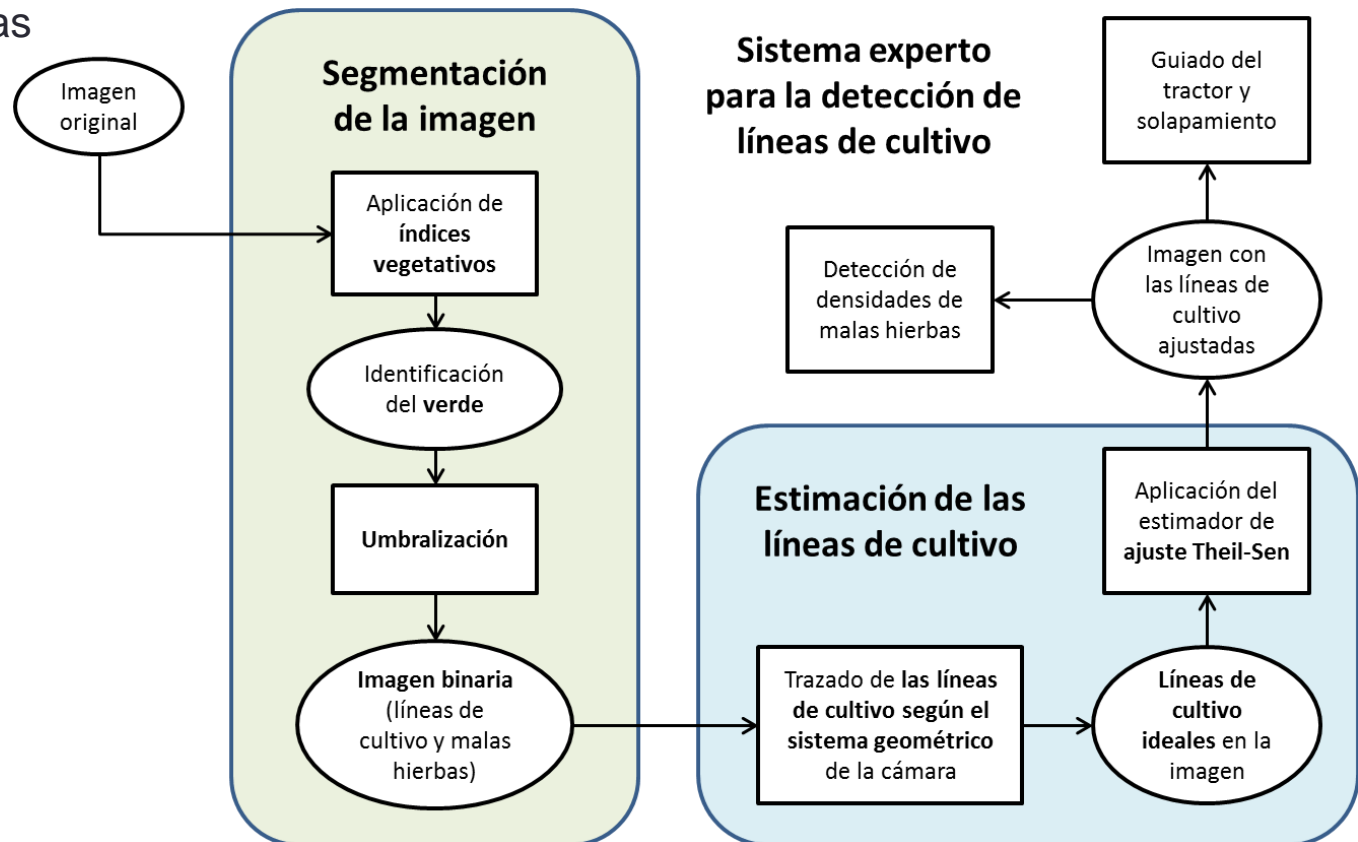
Detección precisa de líneas

- Sistema de visión:
 - Parámetros intrínsecos: longitud focal, centro del plano de la imagen, tamaño del píxel y resolución horizontal y vertical del CCD
 - Parámetros extrínsecos: altura, ángulos de inclinación, número de líneas, distancia de la zona de interés (ROI)



Arquitectura del sistema

- Obtención de una imagen de calidad
- Segmentación y umbralización → imagen binaria
- Detección de líneas mediante la geometría del sistema
- Ajuste de líneas



Detección de líneas mediante geometría

- Parámetros extrínsecos e intrínsecos:

- Ángulos fijos
- Ángulos variables: IMU



- Transformación entre sistemas de coordenadas 3D a 2D

Orientado

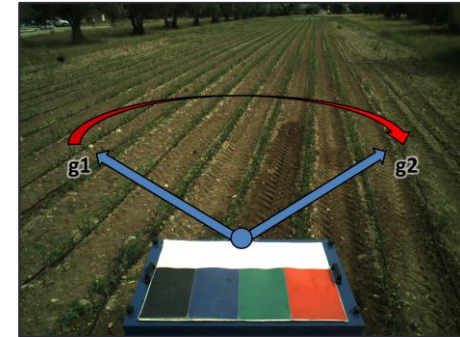


Desviado



Detección de líneas mediante geometría

- Detección de la orientación:
 - Variación del ángulo de guiñada
 - Ángulo de máxima coincidencia de píxeles blancos (verdes) alineados en la imagen binaria



Orientado



Desviado



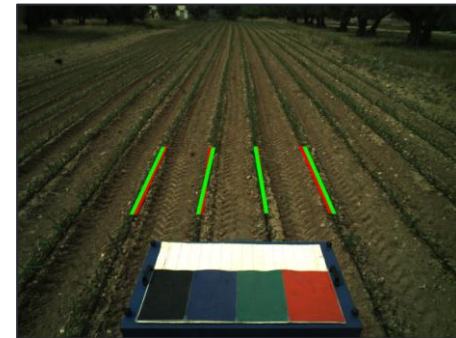
Detección de líneas mediante geometría

- Ajuste de líneas:
 - Sistema geométrico ideal: coinciden las líneas estimadas y reales
 - Situación poco común
 - Dos tipos de relación entre líneas estimadas y reales:
 - Coinciden: validación
 - No coinciden: ajuste de líneas
 - Ajuste de línea recta mediante el estimador Theil-Sen:
 - Distribución de píxeles: búsqueda horizontal píxeles blancos a lo largo de un determinado ancho para cada línea (margen de tolerancia).
 - Ecuación de línea recta: $Y = m \cdot X + b$
 - Pendiente (m): mediana de las pendientes sobre el conjunto de todos los posibles pares de píxeles $(y_j - y_i)/(x_j - x_i)$
 - Término independiente (b): la mediana de los términos independientes $(y_i - mx_i)$ obtenidos con la pendiente m

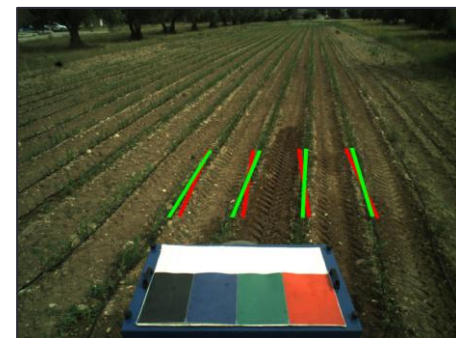
Detección de líneas mediante geometría

- Ajuste de líneas mediante el estimador Theil-Sen:
 - Detección de la orientación
 - Líneas obtenidas mediante geometría (rojas)
 - Líneas corregidas mediante Theil-Sen (verde)

Orientado



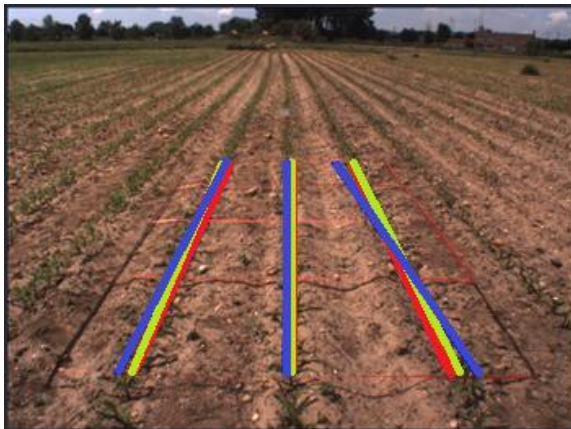
Desviado



Detección de líneas mediante geometría

- Resultados del ajuste de líneas:
 - Líneas obtenidas mediante geometría (**rojo**)
 - Corrección de las líneas mediante:
 - Regresión lineal simple (**azul**)
 - Estimador Theil-Sen (**verde**)
 - Distintos tamaños de la zona de interés
 - Diferentes márgenes de tolerancia
 - Distintos sistemas de visión y parámetros de la zona de interés

Sistema 1:
Cámara BASLER



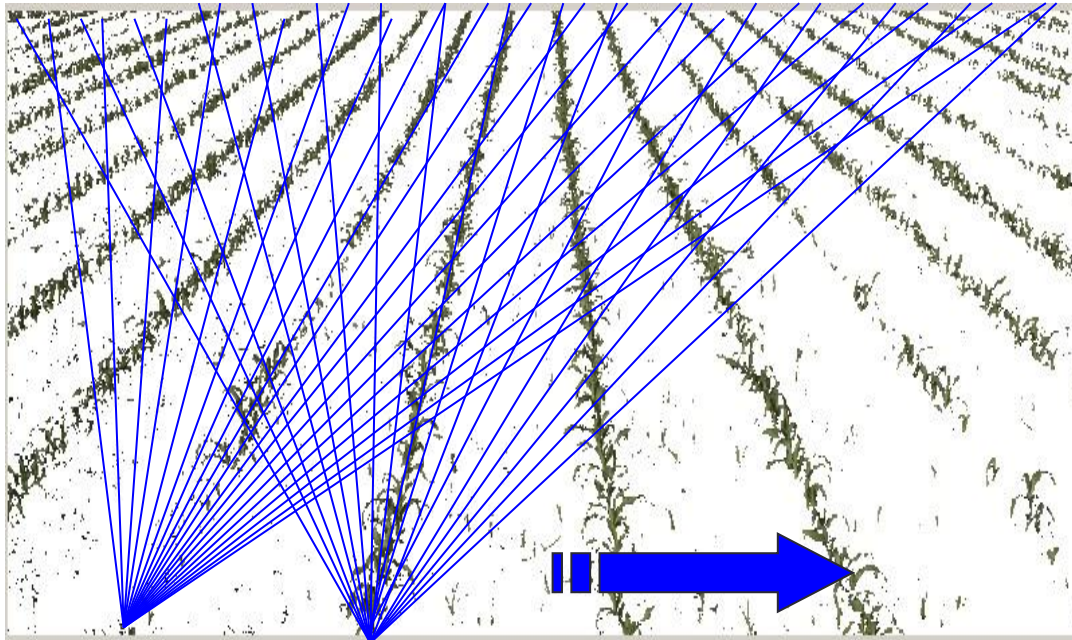
Sistema 2:
Cámara SVS4050



Detección de líneas mediante geometría

- Resultados del ajuste de líneas:
 - Tiempos de proceso
 - Peor caso sistema 1: 571 ms → Velocidad máxima de 25.21 km/h
 - Peor caso sistema 2: 641 ms → Velocidad máxima de 11.23 km/h
 - Válido para tiempo real

Detección de líneas mediante intuición

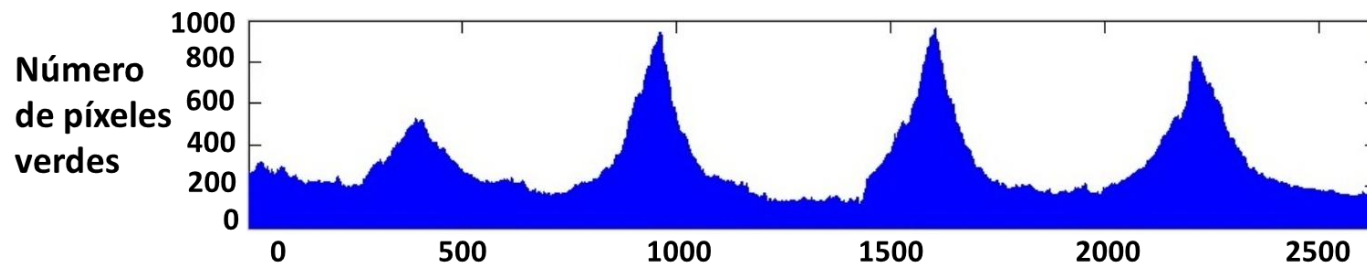


Exploración horizontal

Detección de líneas mediante intuición

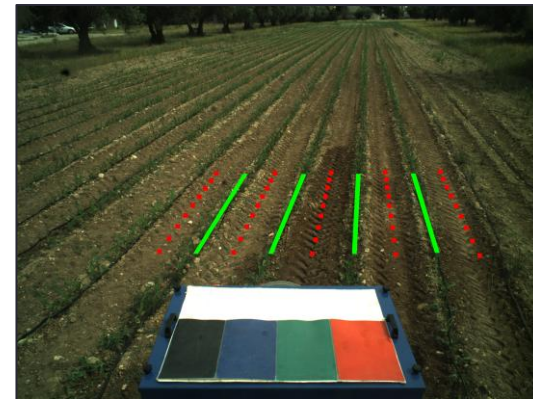
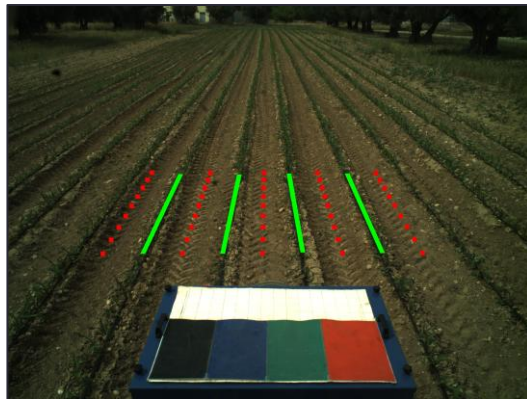


Acumulación de píxeles verdes



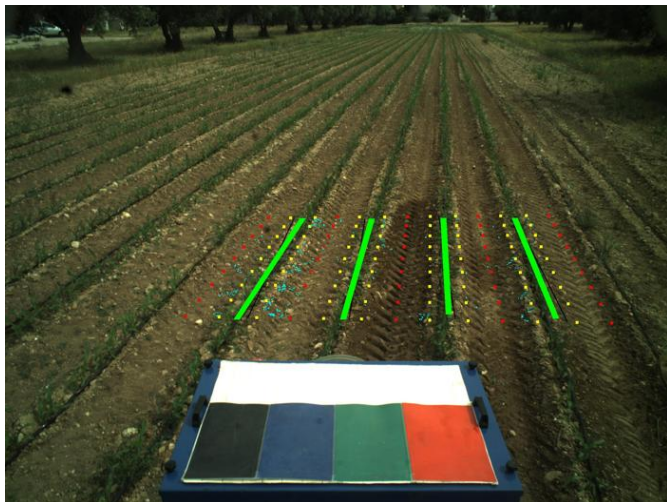
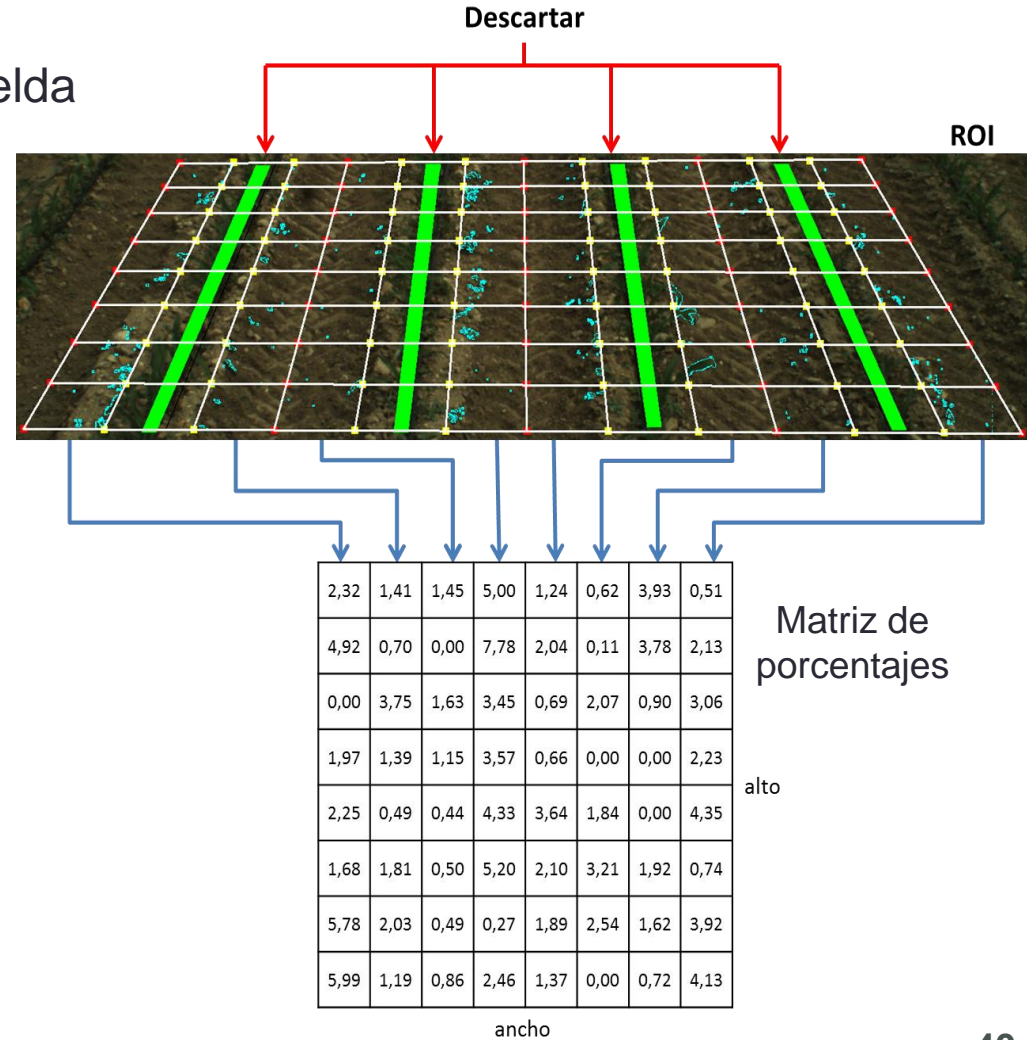
Detección de malas hierbas

- División de la zona de interés en celdas
- Todo píxel de verde identificado en las celdas pertenece a malas hierbas → porcentaje de mala hierbas por celda
- Tras el ajuste de líneas:
 - División vertical: bisectrices de las líneas ajustadas (**puntos rojos**)
 - División horizontal: geometría del sistema
 - Permite mantener la perspectiva



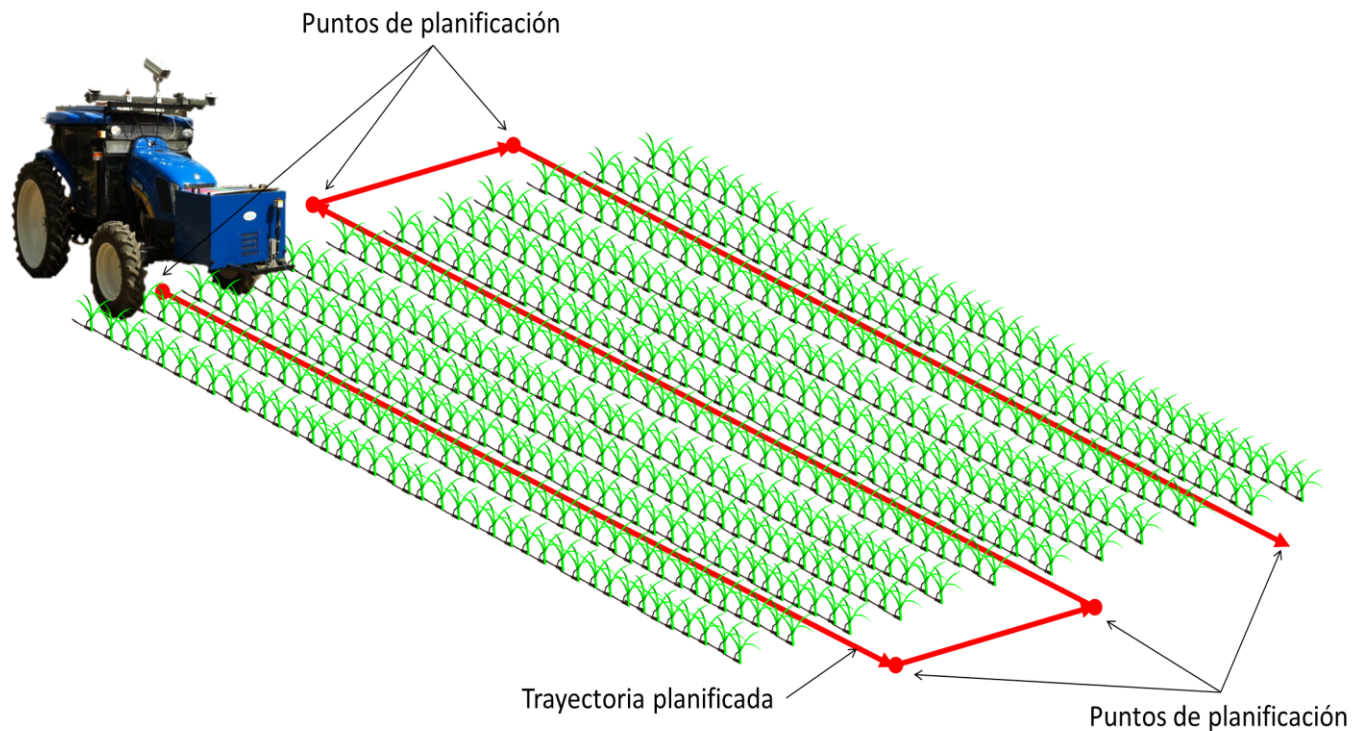
Detección de malas hierbas

- Eliminar el maíz (zona amarilla)
- Calcular el porcentaje de cada celda



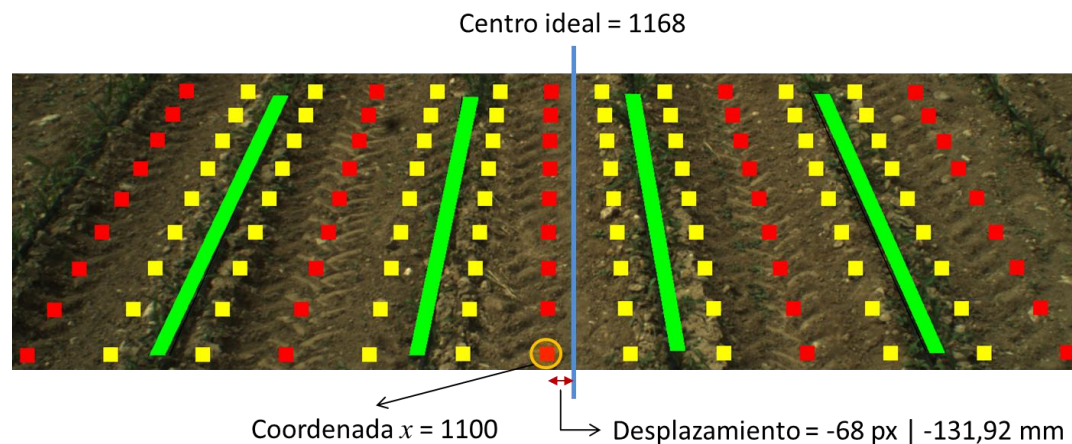
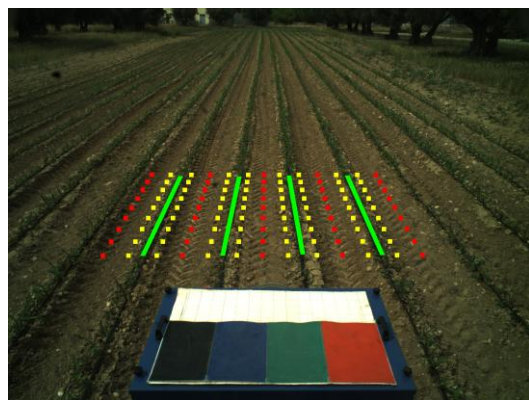
Guiado

- Tractor autónomo → no pisar las líneas de cultivo:
 - El maíz no tiene capacidad de recuperación y su siembra cambia cada año
 - Fallo en la comunicación GPS
 - Errores de cálculo en las posiciones obtenidas por el planificador



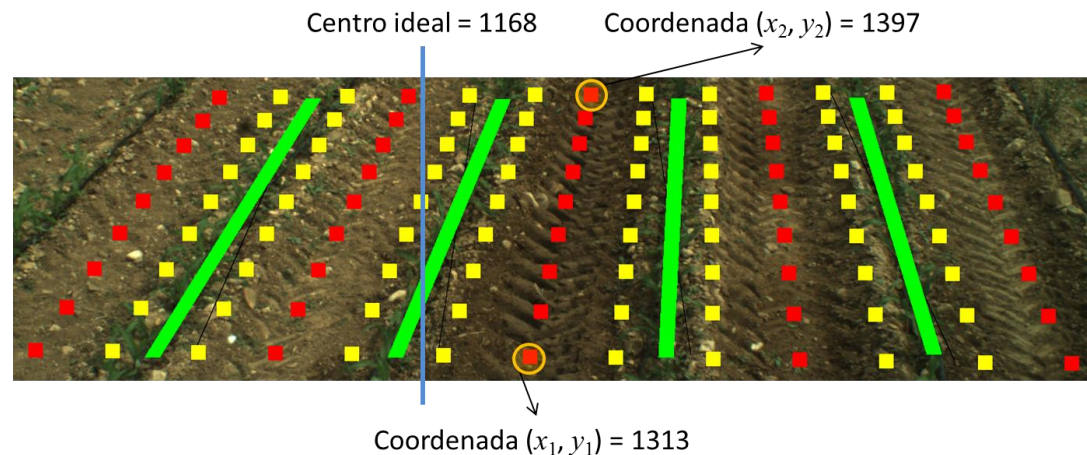
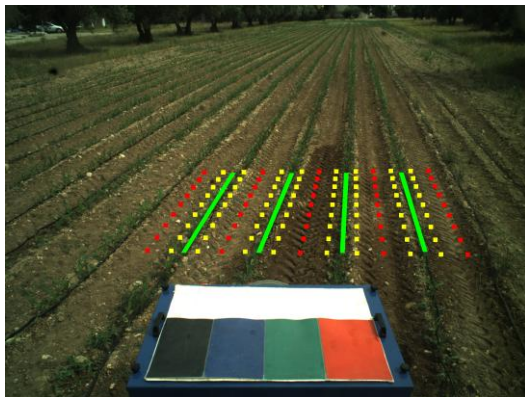
Guiado – seguimiento de líneas

- Una vez obtenida la matriz de malas hierbas:
 - Se observa el desplazamiento con respecto al centro de la imagen:
 - Número de líneas pares: bisectriz de las líneas centrales
 - Número de líneas impares: línea central
 - Conversión píxel-milímetro:
 - Valor positivo: corregir desplazando a la derecha
 - Valor negativo: corregir desplazando a la izquierda



Guiado – aproximación al campo

- Bisectriz o línea central: orientación desde el punto actual al punto de salida definido por el planificador
- Aplicar corrección para situar al tractor en (x_1, y_1) con dirección a (x_2, y_2)
- Aplicar el seguimiento de líneas

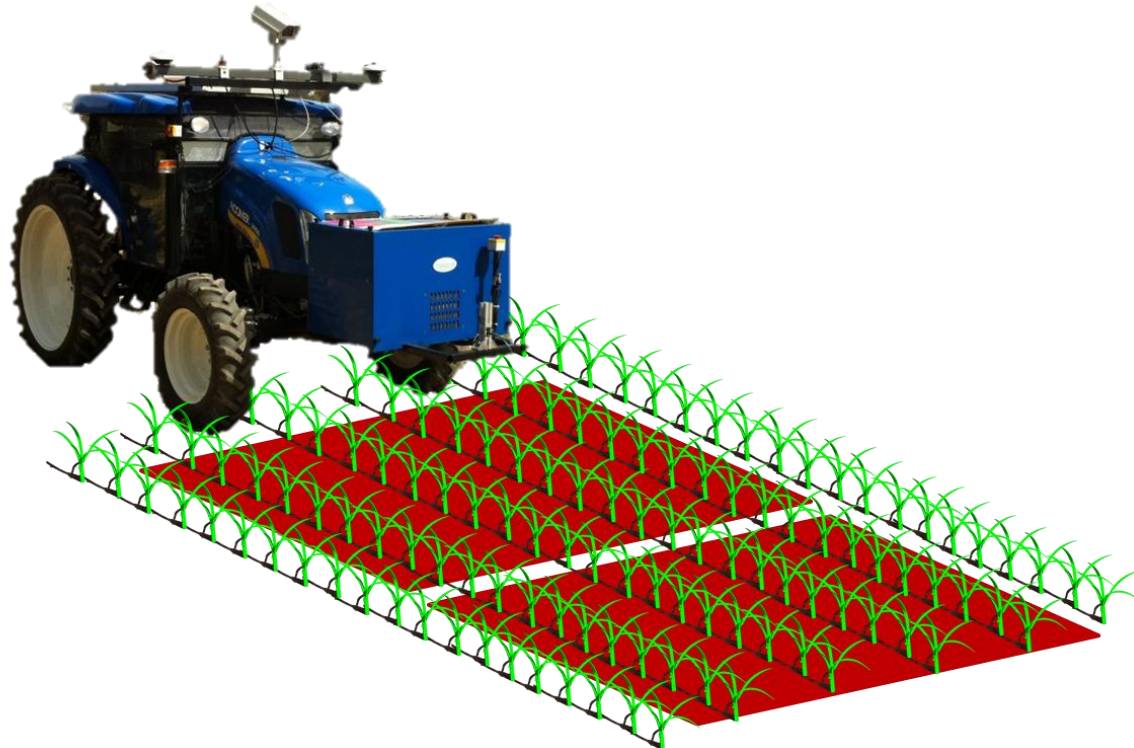


Guiado – aproximación al campo

- Resultados (desviación estándar):
 - Seguimiento de distintas trayectorias manualmente
 - Comparación entre la trayectoria manual y realizada de forma autónoma
 - Altura del maíz:
 - Baja (1-4 cm): 7.7 cm
 - Media / alta (> 4 cm): 10.2 cm
 - General: permite desplazamientos de hasta 40 centímetros respecto a los puntos ideales del planificador

Solapamiento

- Agricultura de Precisión → Tratamiento específico por zonas
- Obtención de la distancia entre la última imagen procesada y la posición actual

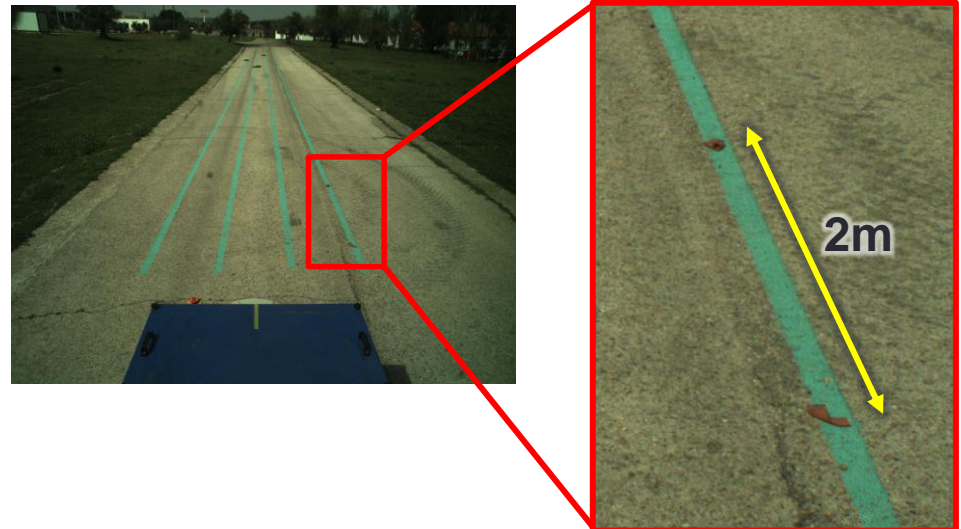


Solapamiento

- **Ideal**: cuando la distancia es igual al largo de la zona de interés, se analiza una nueva imagen
- **Realidad**: cuando la distancia es igual al largo de la zona de interés teniendo en cuenta el error del sistema GPS
 - Desviación típica: calculada en estático adquiriendo coordenadas (3 cm)

- **Resultados:**

- Georreferenciación manual de las zonas de interés
- Comparación con las coordenadas de cada captura siguiendo una trayectoria planificada
- **Desfase promedio**: 10 cm





**GRACIAS
POR SU ATENCIÓN**

