



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

*“El secreto de la existencia humana no sólo está en vivir,  
sino también en saber para qué se vive”*

*Fiódor Dostoievski*





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO ROBOTIZADO PARA EL DESHIERBE AUTOMÁTICO EN ZONAS PLANAS DE CULTIVOS DE MAÍZ EN SU ETAPA INICIAL, A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL, PARA LA ASOCIACIÓN “UNIÓN Y PROGRESO” DEL CANTÓN PÍLLARO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA.**

### **Autores:**

Mauricio Daniel Barreno Barreno  
José Misael Jácome Barrionuevo

### **Directora:**

Ing. Andrea Córdova Cruzatty M. Sc.



# AGENDA

- **Objetivo General**
- **Objetivos Específicos**
- **Hipótesis**
- **Justificación**
- **Sustento teórico**
- **Diseño Mecánico**
- **Diseño del Control**
- **Resultados**
- **Conclusiones y recomendaciones**



# JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA



## Agricultura tradicional



## Robótica en la Agricultura

Alimentación Saludable



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar y construir un prototipo robotizado para el deshierbe automático en zonas planas de cultivos de maíz en su etapa inicial, a través de técnicas de visión artificial para la Asociación “Unión y Progreso” del Cantón Píllaro, Provincia de Tungurahua.



# OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar la plataforma móvil del prototipo robotizado de deshierba utilizando materiales y métodos óptimos para atravesar el cultivo de maíz.
- Desarrollar un sistema a través de técnicas de Visión Artificial que permita la navegación de la plataforma en hileras de cultivo y el reconocimiento de malas hierbas.
- Desarrollar un sistema de control para la navegación de la plataforma en hileras de cultivo y para el accionamiento de la herramienta de deshierbe del Robot Delta.
- Diseñar una herramienta eficaz para el Robot Delta encargada de remover la mala hierba en los cultivos de maíz.
- Lograr un resultado final de eliminación de mala hierba de al menos un 70% en el área trabajada por el robot



# HIPÓTESIS

El diseño y construcción de un prototipo robotizado para la deshierba automática de cultivos de maíz en su etapa inicial para la Asociación “Unión y Progreso” del cantón Píllaro, provincia de Tungurahua, permitirá una eliminación de al menos el 70% de malas hierbas en el cultivo





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DISEÑO MECÁNICO

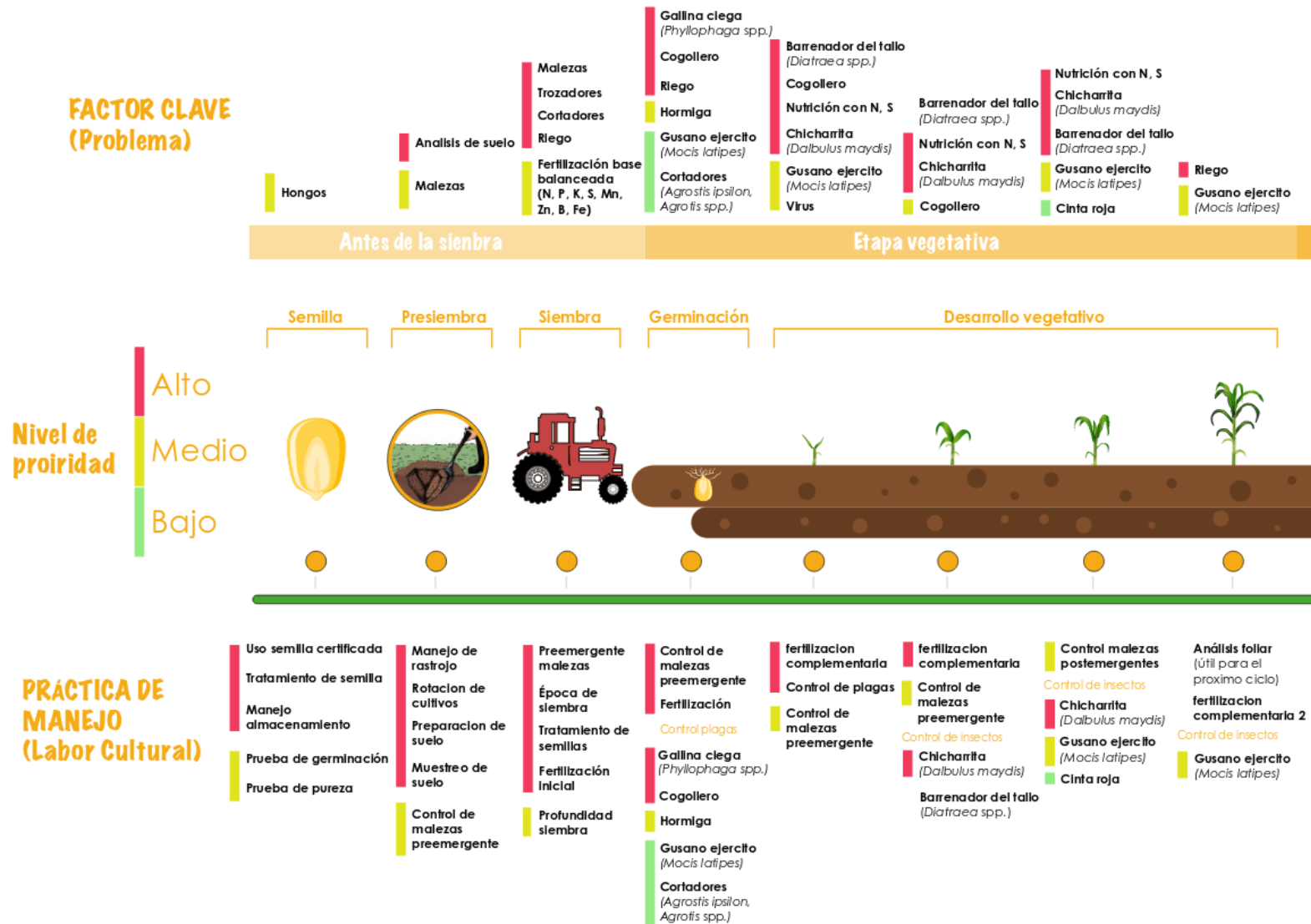




# CULTIVO DEL MAÍZ



# DESHIERBA DEL MAÍZ



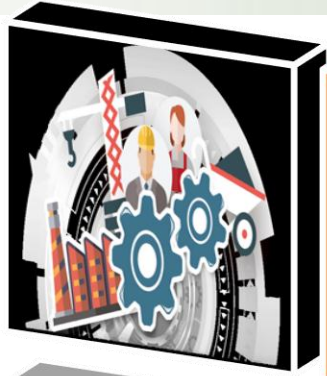
Deshierba a los 15 y 30 días (SINAGAP, 2016)

Métodos:

- Manual
- Mecánico
- Térmico
- Eléctrico
- Presión (T. Bakker et al, 2016)



# AGTECH



Mejora de la  
producción

2024 – 74 billones de  
ingreso (RobotReport,  
2017)



Alimentos más  
orgánicos



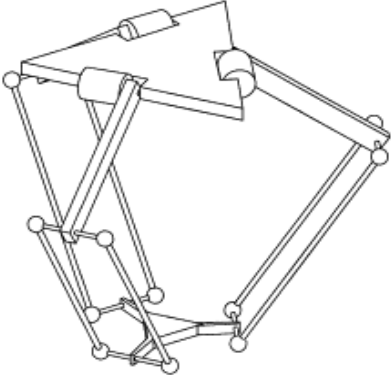
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# ROBOTS INDUSTRIALES Y MÓVILES

## ROBOTS INDUSTRIALES:

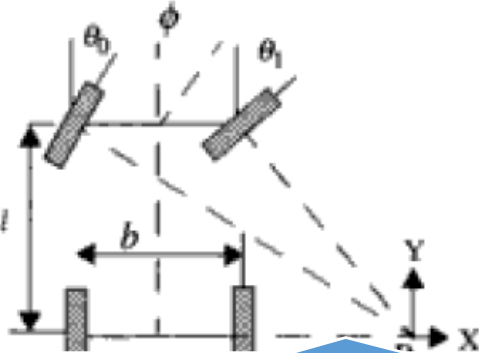


ROBOTS TIPO SERIE

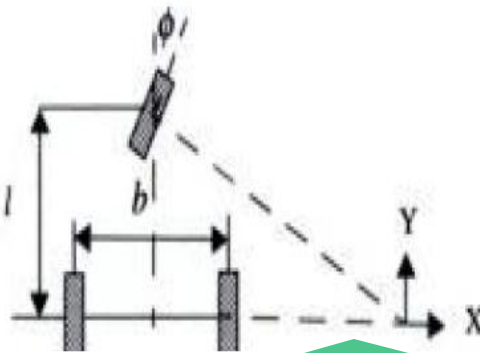


ROBOTS TIPO PARALELO

## ROBOTS CON RUEDAS:



Ackerman



Triciclo Clásico



Direccionamiento Diferencial

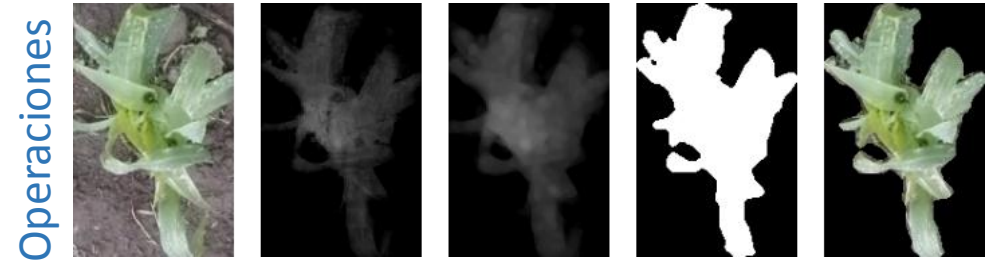
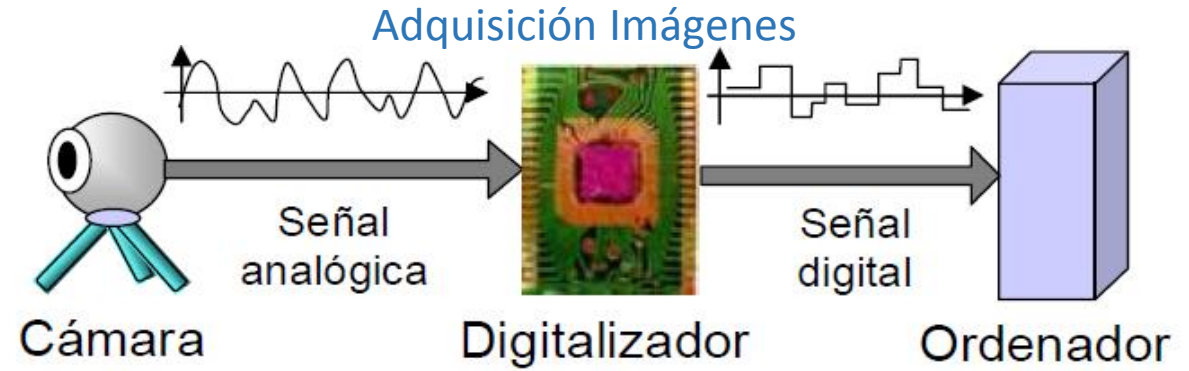


# VISIÓN ARTIFICIAL

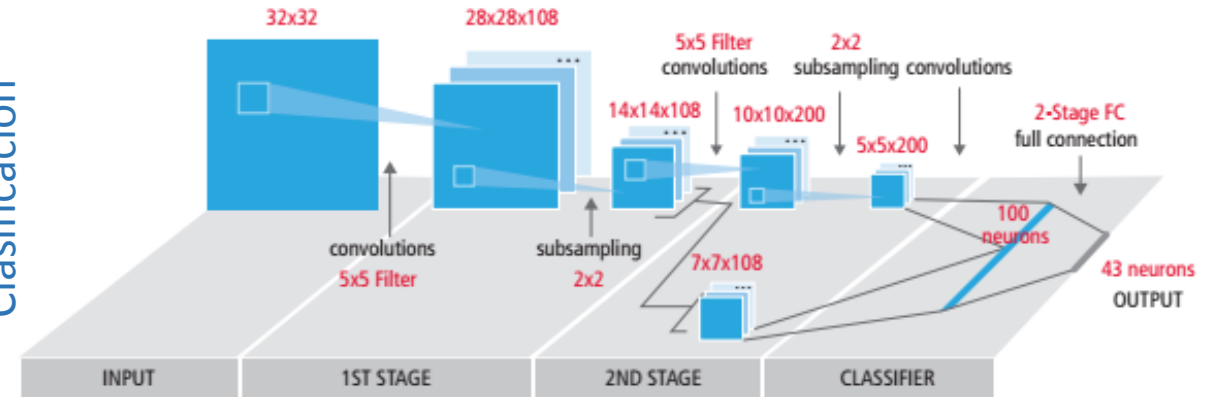


Composición de color

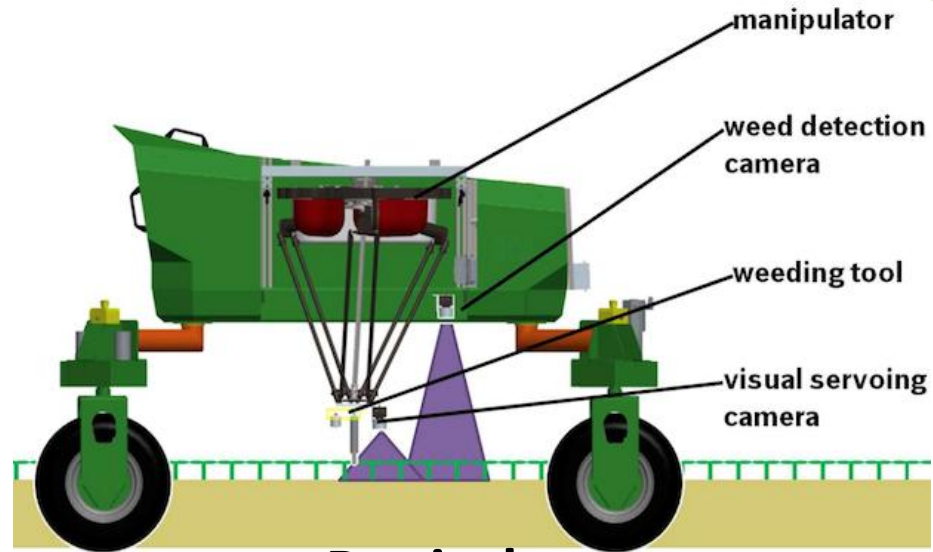
79	67	37	38	49
175	171	163	180	196
101	98	113	107	96
49	50	54	87	103
168	175	192	208	201
137	138	136	151	144
34	58	99	131	117
175	190	211	209	184
154	148	137	153	146
41	86	129	128	86
174	200	200	185	174
152	146	144	158	151
46	112	129	100	67



Clasificación



# INSPIRACIÓN



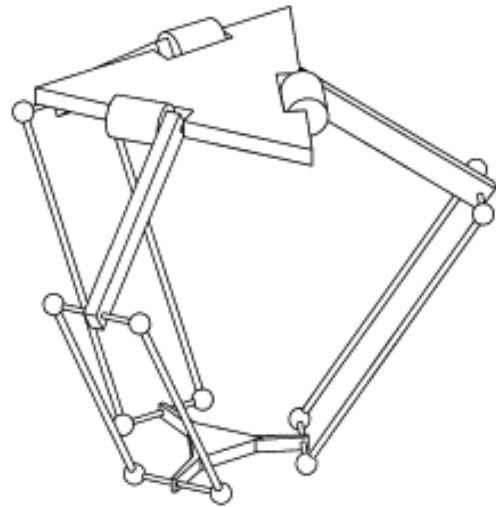
**Bonirob**



**Ecorobotix**



# ROBOT PARALELO TIPO DELTA



**Delta Clásico**

## Ventajas

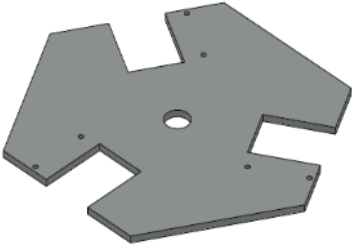
- Elevar pesos mayores al suyo
- Alta Rigidez
- Alta Precisión
- Altas Velocidades

## Desventajas

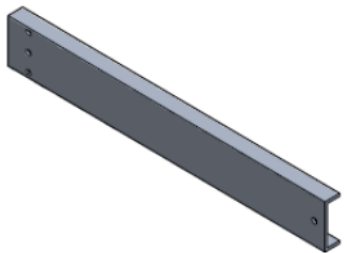
- Cinemática Compleja
- Reducido espacio de trabajo
- Arquitectura mecánica compleja



# ROBOT PARALELO TIPO DELTA



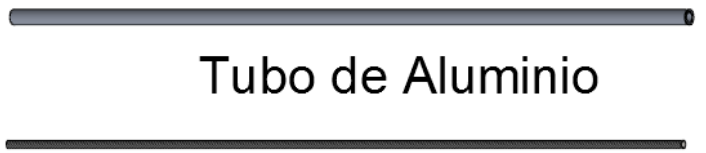
Base Fija



Eslabón Corto



Rótula Esférica



Tubo de Aluminio

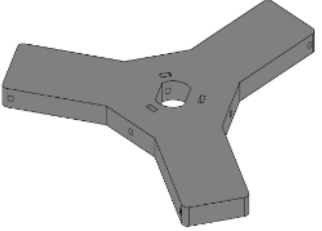


Varrilla Roscada M4

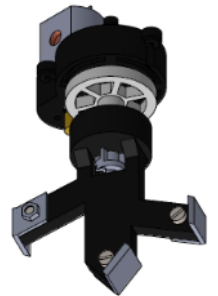
Eslabón Largo L2



Varilla Roscada M3



Base Móvil



Herramienta de corte



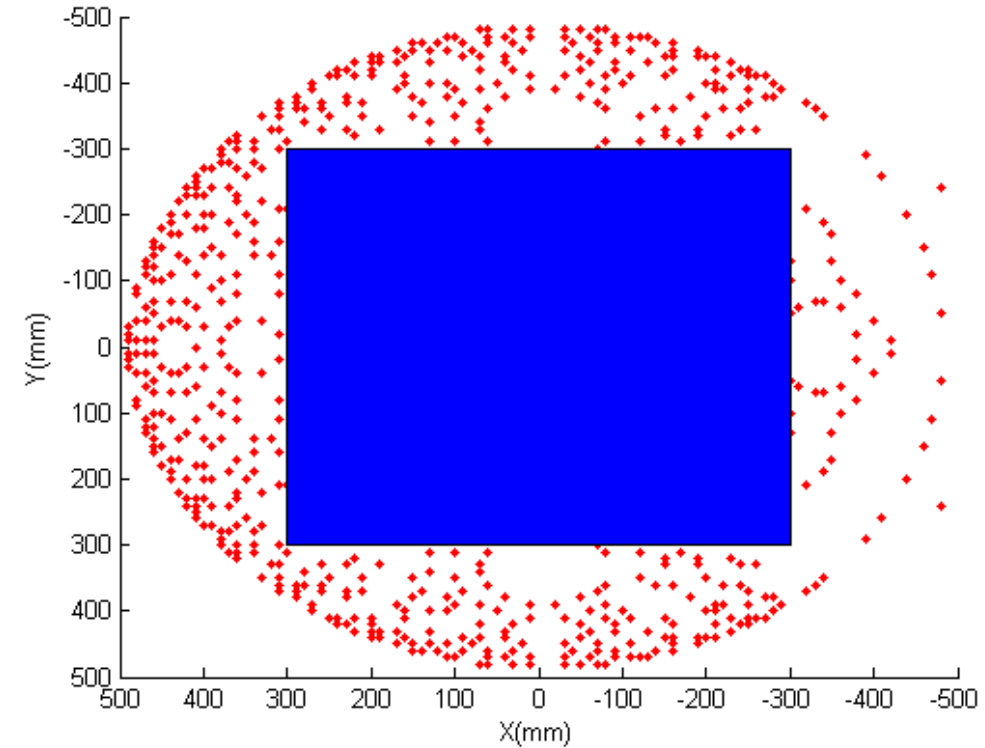
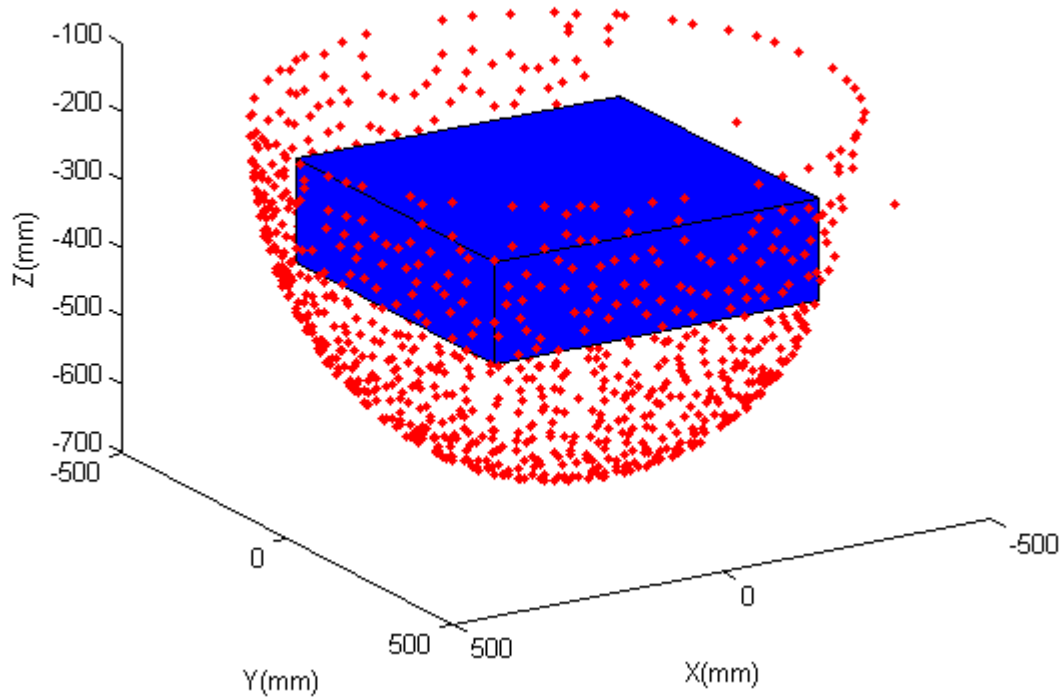
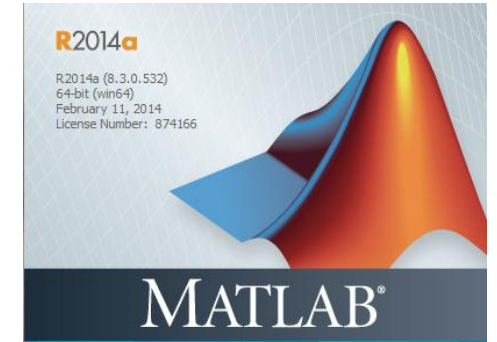
Ensamble Completo





# DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LOS COMPONENTES

Componente	Dimensión [mm]
Eslabón Corto	176
Eslabón Largo	500
Radio Base Fija	96
Radio Base Móvil	80



# MATERIALES DE LOS COMPONENTES ROBOT DELTA

Elemento	Cantidad	Material
Base Fija	1	Aluminio
Eslabón Corto	3	Aluminio
Rotulas esféricas	3	Plástico y Acero
Eslabón largo(Varilla y Tubo)	3	Acero inoxidable y Aluminio
Base Móvil	1	PLA
Herramienta de corte	1	PLA y Acero

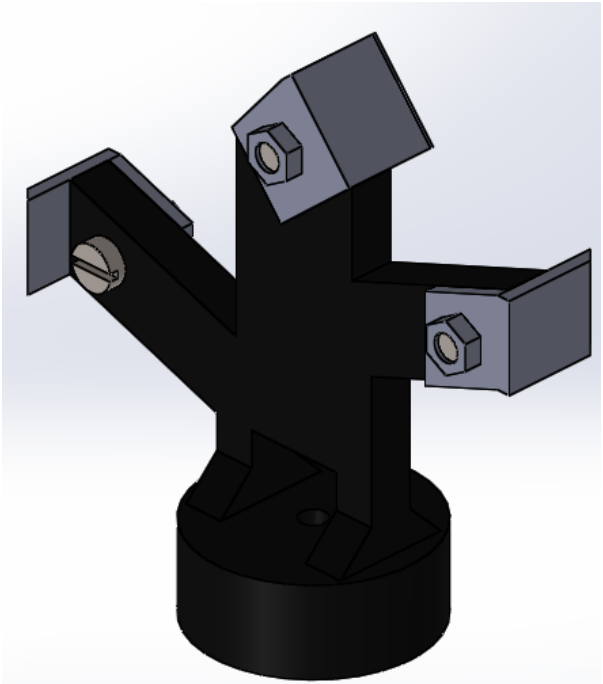
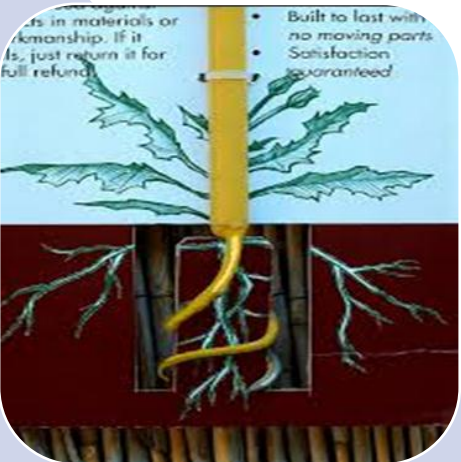


# HERRAMIENTA DE CORTE

Drill Till



Weed Twister



Herramienta Diseñada

The Awesome Auger

Weed Spinner



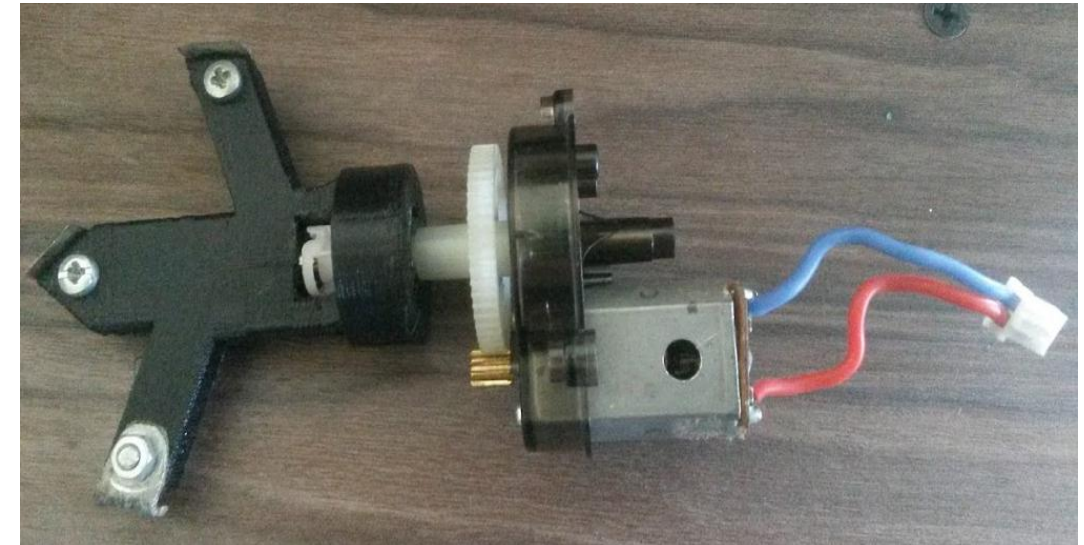
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DEL MOTOR

Parámetros	Simbología
Resistencia a la compresión simple	$S_c$
Fuerza de empuje	$F_{min}$
Diámetro de la herramienta	$d_{herramienta}$
Potencia de rotación	$HP_r$
Velocidad de rotación	$N_r$
Eficiencia del motor	$\eta$



Motor Syma X8C



(González, 2004)

Consistencia del terreno	Resistencia a la compresión simple en $\text{kg}/\text{cm}^2$	Identificación in situ
Muy firme (Suelo muy rígido)	$2 \leq S_c \leq 4$	Se raya fácilmente con la uña del pulgar
Dura	$4 \leq S_c \leq 8$	Difícil de rayar con la uña del pulgar



# CÁLCULO MOTOR HERRAMIENTA

Cálculo similar



$$F_{min} = 28.5 * S_c * d_{herramienta}$$

$$F_{max} = 2 * F_{min}$$

$$F_{max} = 0.246 \text{ KN}$$

$$HP_r = 8.55 * 10^{-9} * d_{herramienta}^2 * N_r * F_E^2$$

$$HP_r = 4,17 * 10^{-4} \text{ hp} = 8.2\text{W} = P_r$$

$$P_n = 10.25\text{W}$$

Potencia Syma x8C = 12W



Fuerza de empuje mínima

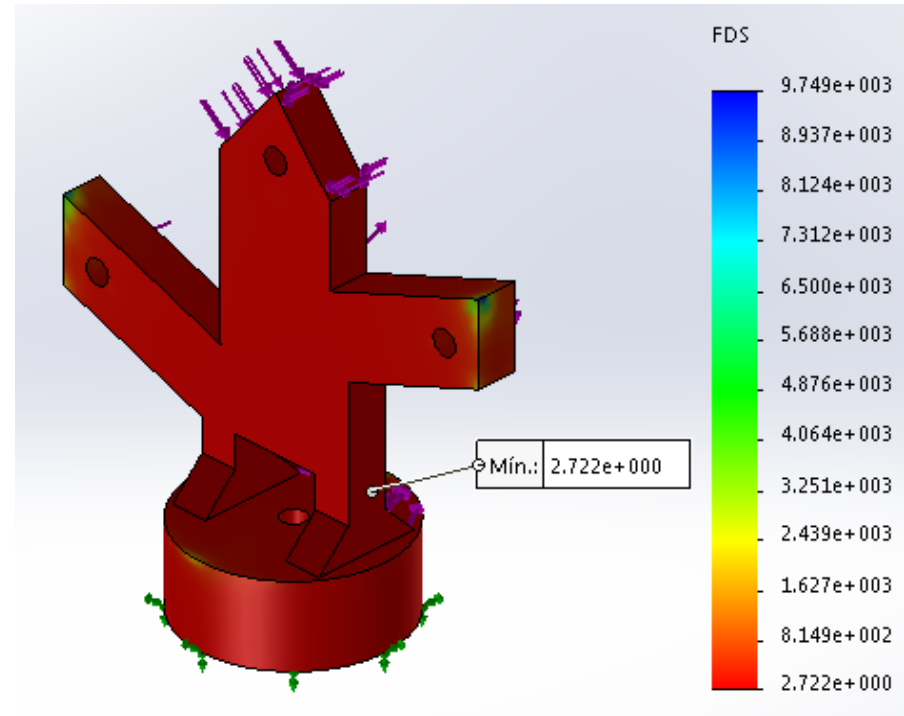
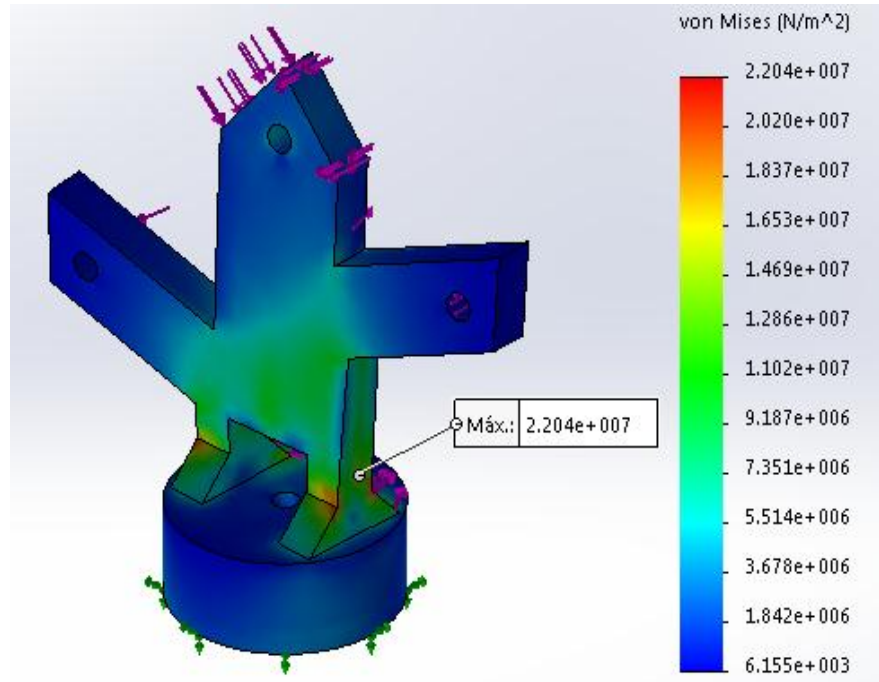
Fuerza de empuje máxima

Potencia rotación

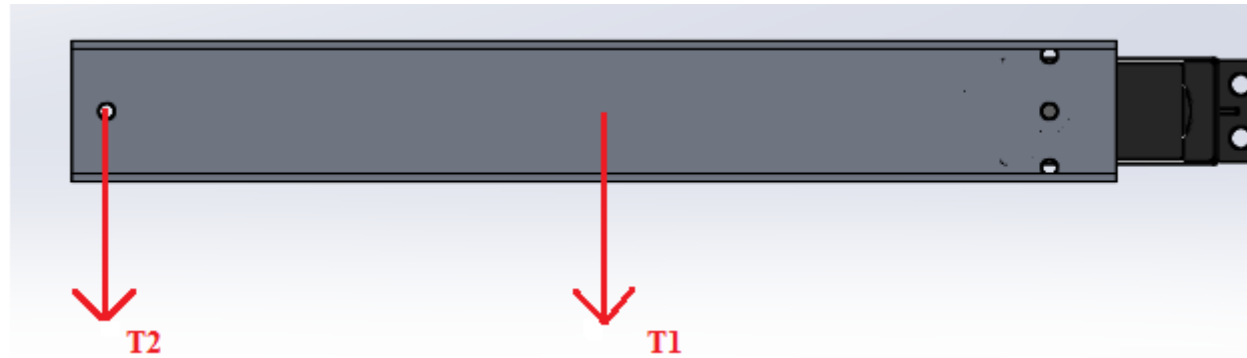
Potencia corregida



# ANÁLISIS ESTÁTICO



# SERVOMOTORES PARA EL ROBOT TIPO DELTA



Toque Requerido	Torque(Kg*cm)
T1	0.57
T2	9.72
Total	10.30
Elegido	13



Servomotor Tower Pro MG996R



# ESTRUCTURA DE LA PLATAFORMA

Parámetros de Diseño

Transporte Delta

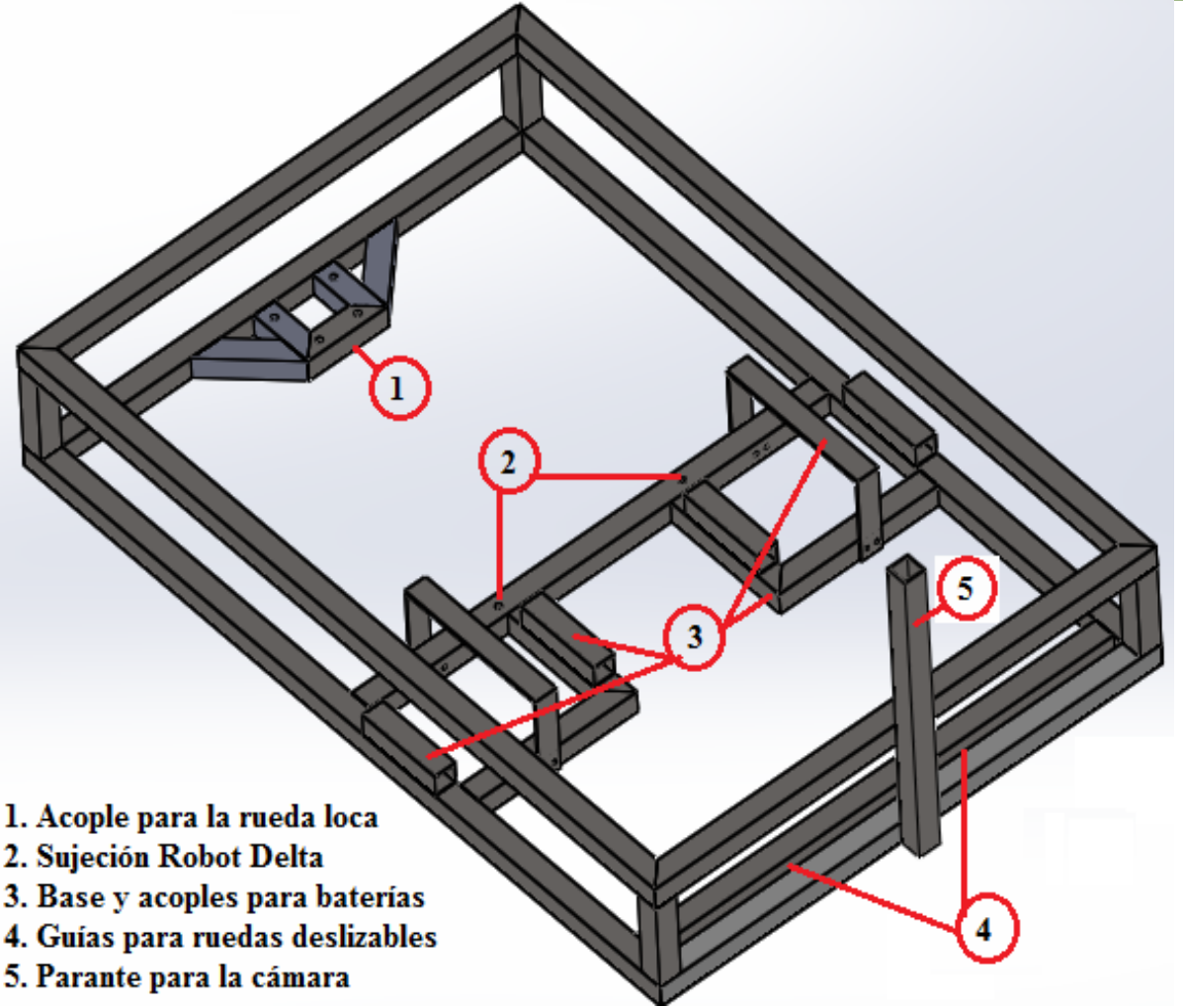
Ub. Ruedas

Espacio

Robustez

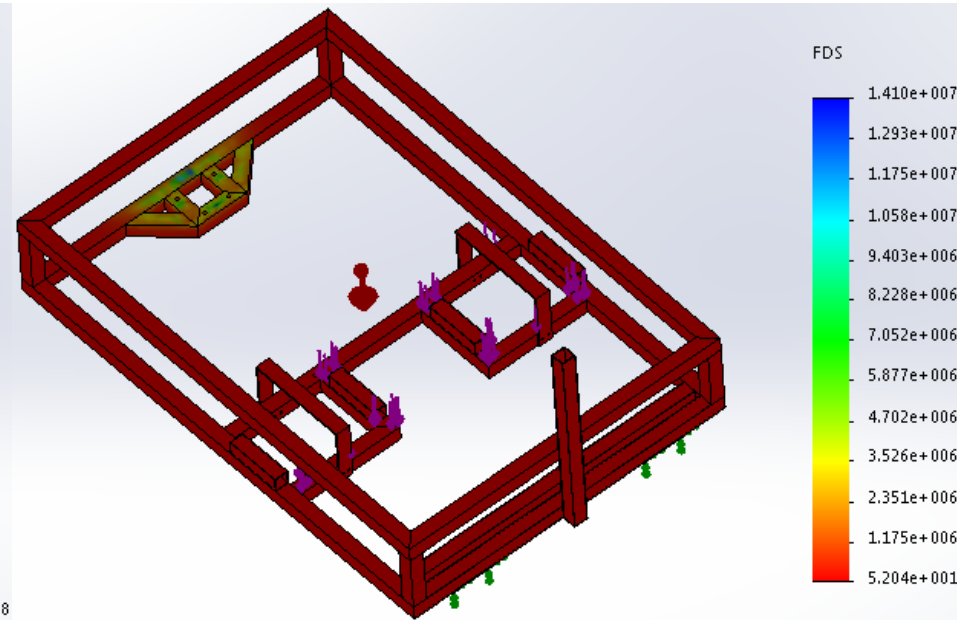
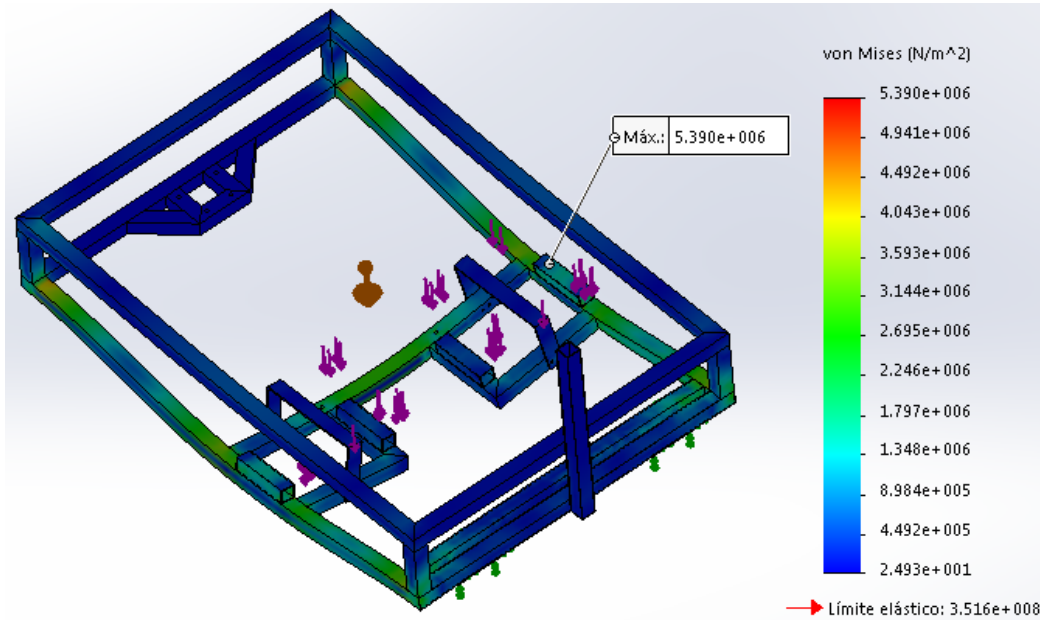
Cámara

Recubrimiento





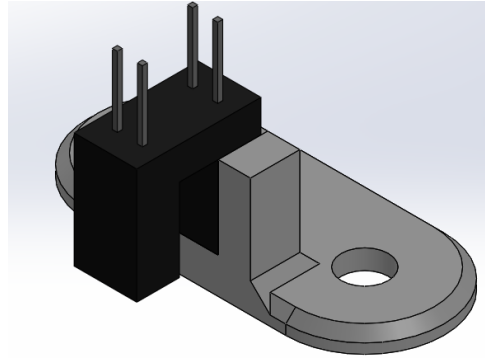
# ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA



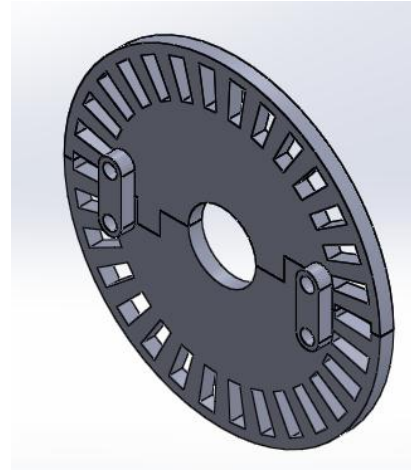
# OTROS COMPONENTES MECÁNICOS



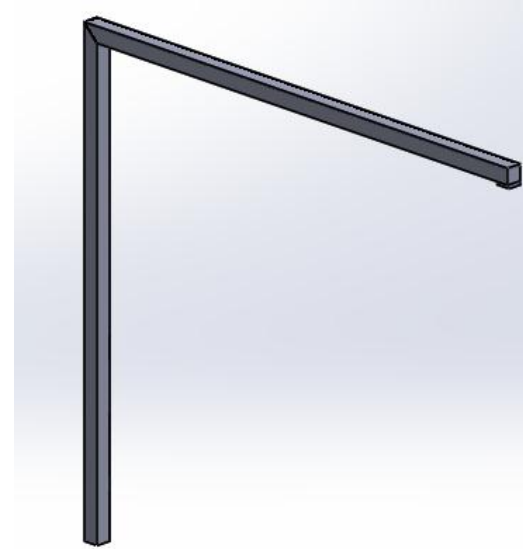
Rueda de Carretilla



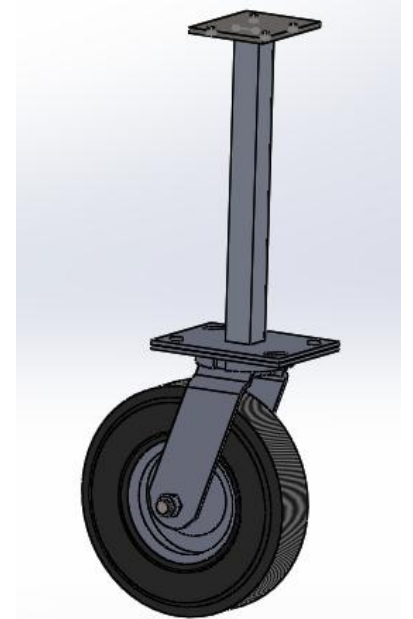
Porta Encoder



Rueda dentada



Parante Cámara



Rueda Loca (tipo Castor)



# SISTEMA DE SUSPENSIÓN



Elemento Elástico



Elemento de Disipación



- 1 Afrontar irregularidades del suelo
- 2 Disminuir vibraciones
- 3 Asegurar el contacto de las ruedas con el suelo.

Frecuencia

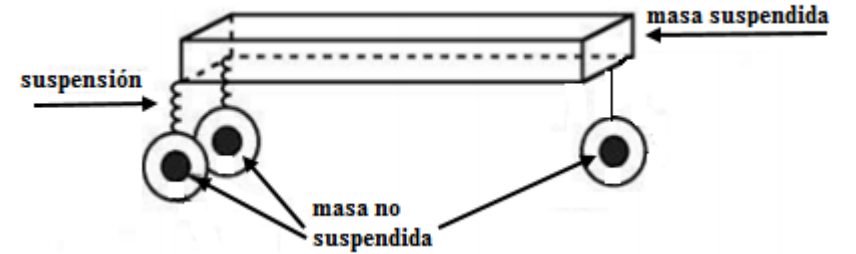
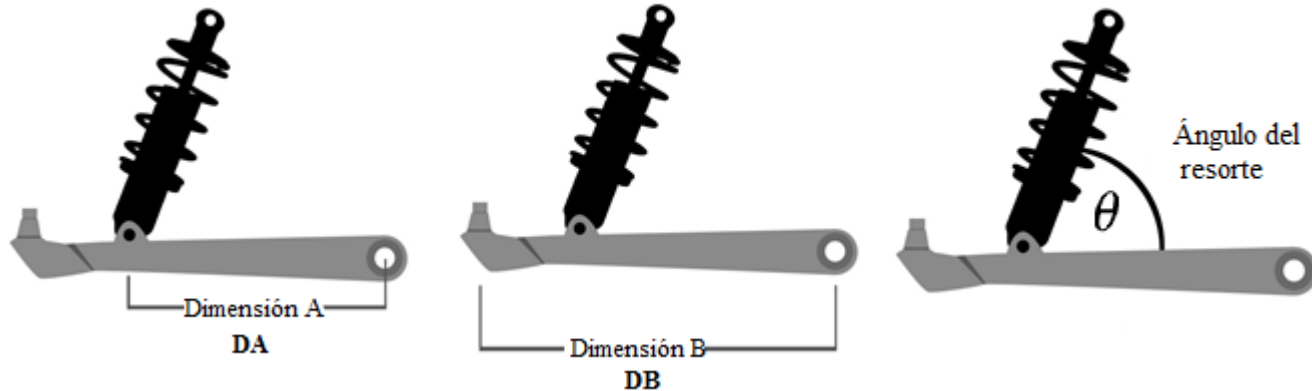
Personas: 0.83-1.66 Hz

Carga: 2Hz

Seleccionada: 1.5 Hz



# CÁLCULO PARA EL RESORTE:



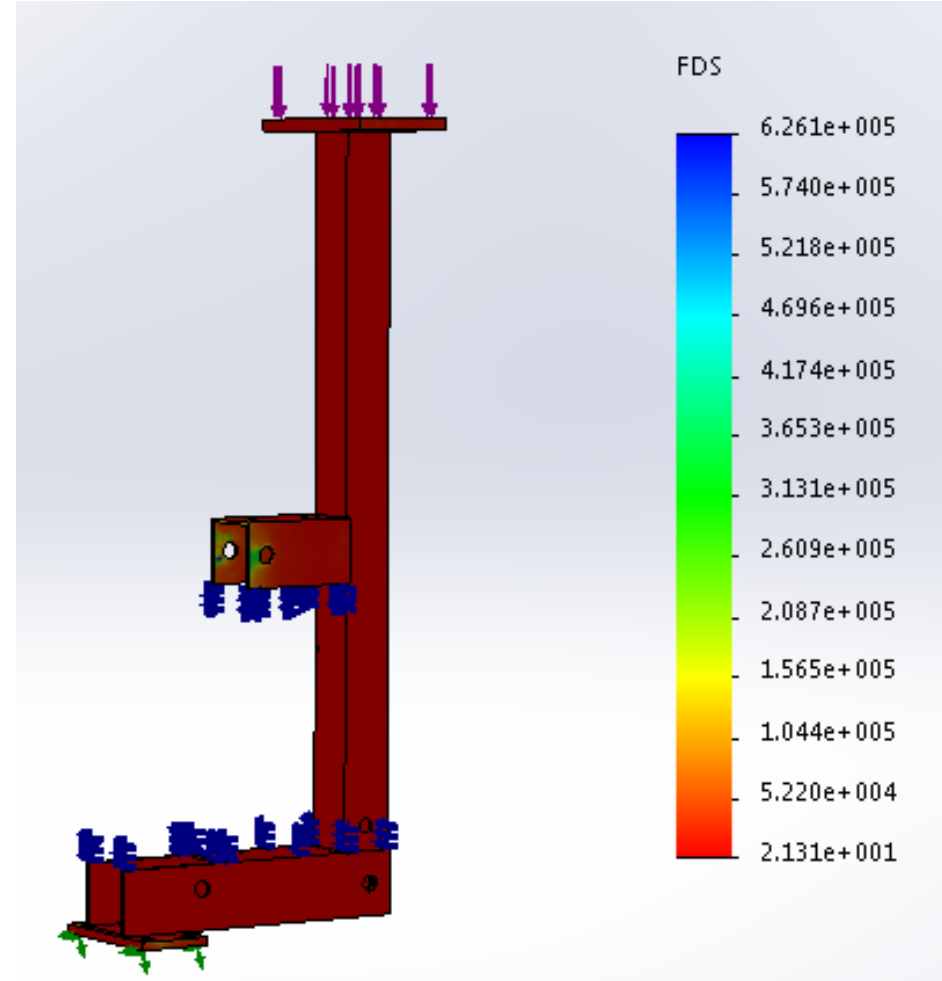
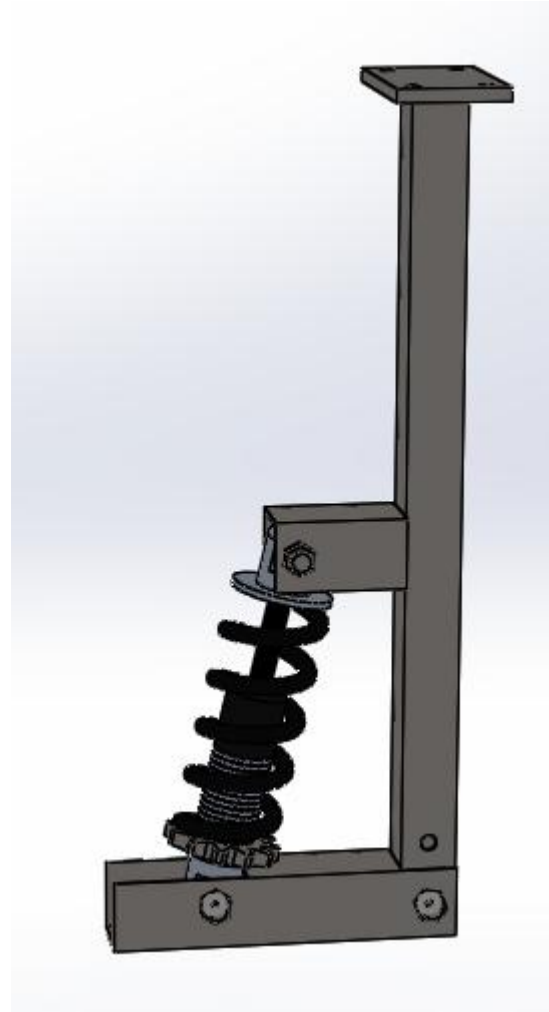
Nombre	Nomenclatura	Valor
Masa suspendida	SW	6kg
Masa No suspendida	NSW	2 kg
Dimensión A	DA	97.5 mm
Dimensión B	DB	119.3 mm
Ángulo del Resorte	$\theta$	75 grados
Constante del Resorte	K	755 kg/in



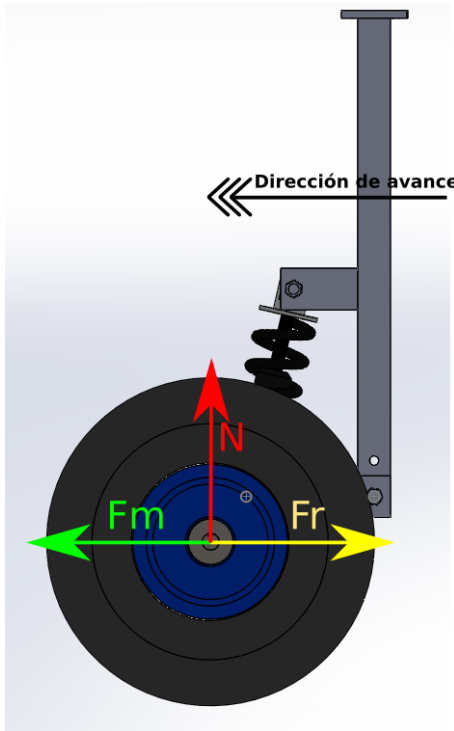
# DISEÑO SISTEMA DE SUSPENSIÓN



Suspensión Ke Zhen 750  
 $K=750\text{lb/in}$



# SELECCIÓN DE LOS MOTORES



$$a_x = 0.6 \frac{m}{s^2}$$

$$\mu_s = 0.75 \quad \text{Rozamiento tractor-suelo seco}$$

$$m_t = 40 \text{ Kg} \quad \text{Masa prototipo}$$

$$F_m = \mu_s * N + m * a_x$$

$$F_m = 318 \text{ N} \quad \text{Fuerza vencer el suelo}$$

$$T_{MT} = f_c * F_m * r$$

$$T_{MT} = 79.5 \text{ Nm} \quad \text{Torque necesario}$$

$$P = 381.6 \text{ W} = 0.51 \text{ hp} \quad \text{Potencia}$$

$$\begin{aligned} &\text{Potencia corregida} \\ &\text{c/motor} \\ &P_{c/motor} = 254.4 \text{ W} = 0.34 \text{ hp} \end{aligned}$$



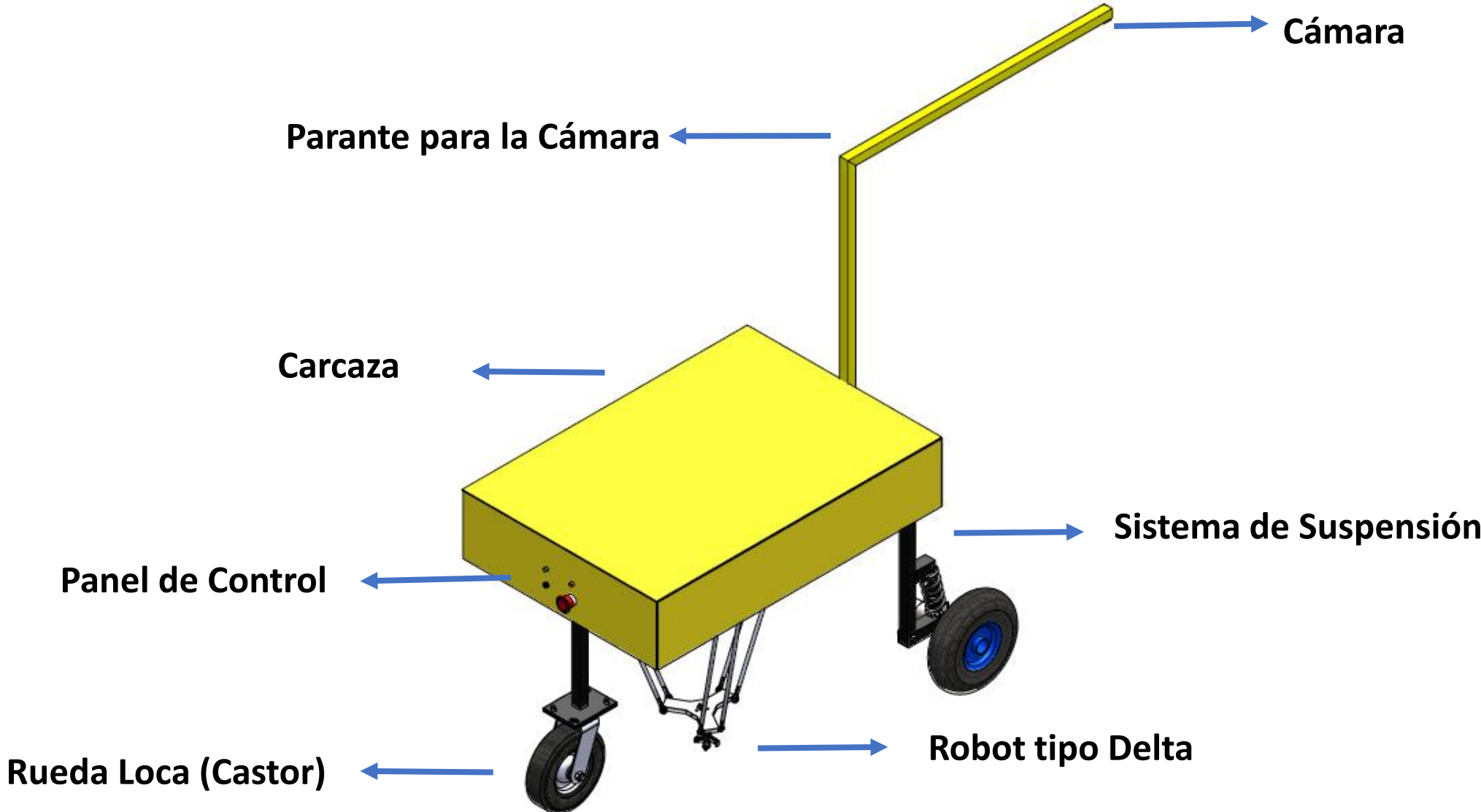
# BANEBOTS 775



Métrica	Unidades	Banebots RS775 18V
Potencia	W	246
Voltaje	V	18
Corriente Pico(Rotor Parado)	A	130
Eficiencia	%	78
Velocidad sin Carga	Rpm	19500
Peso	Kg	0.302
Reducción Mecánica	No	No
Precio(Al 2017)	\$	17



# DISEÑO FINAL



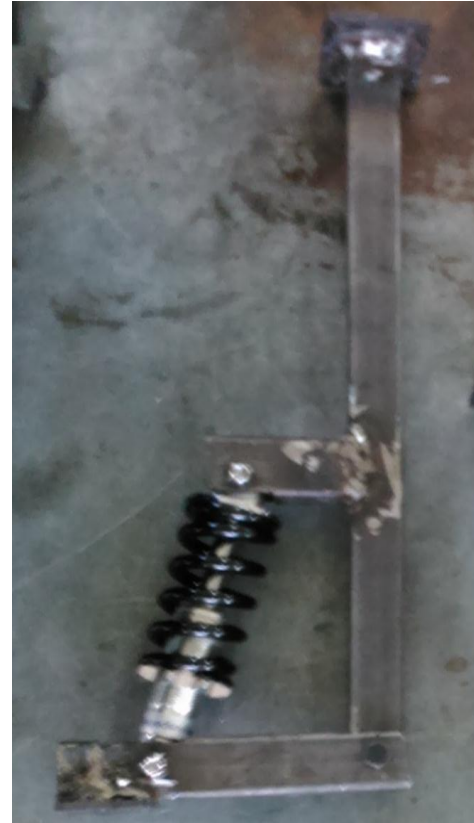


# CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO



Bocín

Sistema de Suspensión



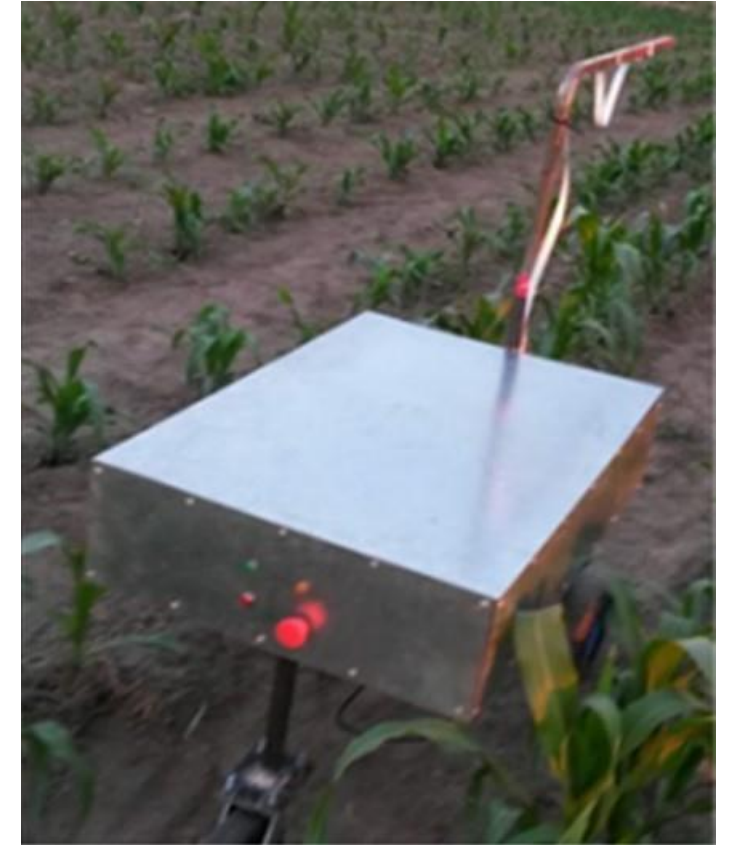
Rueda Loca



Fabricación Disco Ranurado



# CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# ENSAMBLAJE FINAL DEL PROTOTIPO





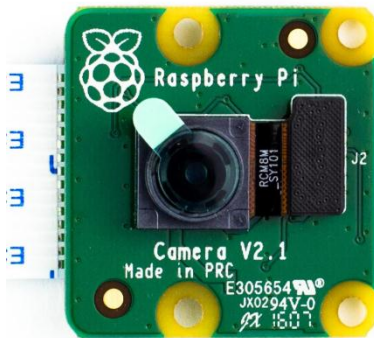
# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

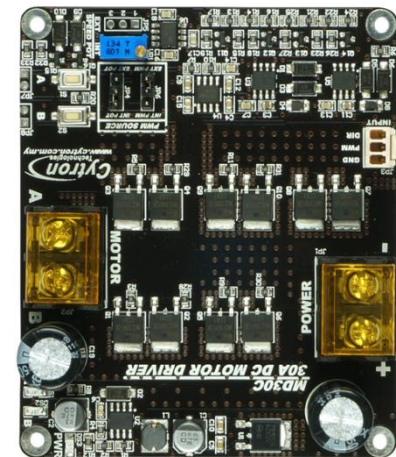
# DISEÑO CONTROL



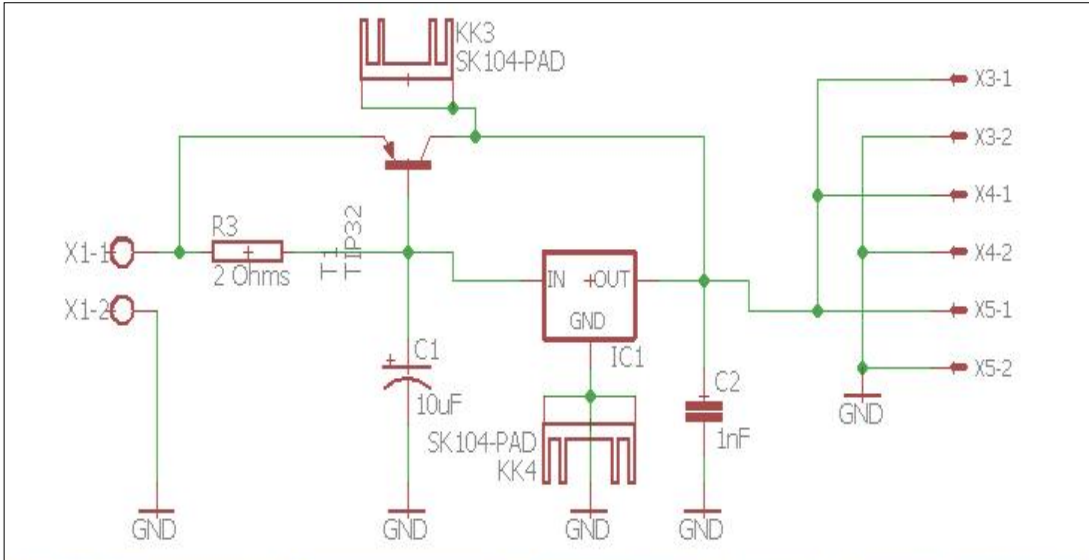
# MATERIALES USADOS



Cantidad	Elemento	Función
1	Raspberry Pi	Procesar imágenes y clasificarlas
1	Pi Camera V2	Adquirir imágenes
2	Cytron MD30C	Controlar los motores
2	Encoders 60 pulsos	Monitorear la posición de las ruedas
2	Batería sbb AGM 20Ah / 12VDC	Proporcionar energía al sistema
1	Arduino UNO	Controlar periféricos del prototipo
1	Paro de emergencia	Detener el sistema
1	Botón de inicio	Iniciar las funciones del sistema
2	Luces piloto	Indicadores del funcionamiento
-	Cables, conectores y circuitos adicionales	Realizar la interconexión eléctrica entre los componentes



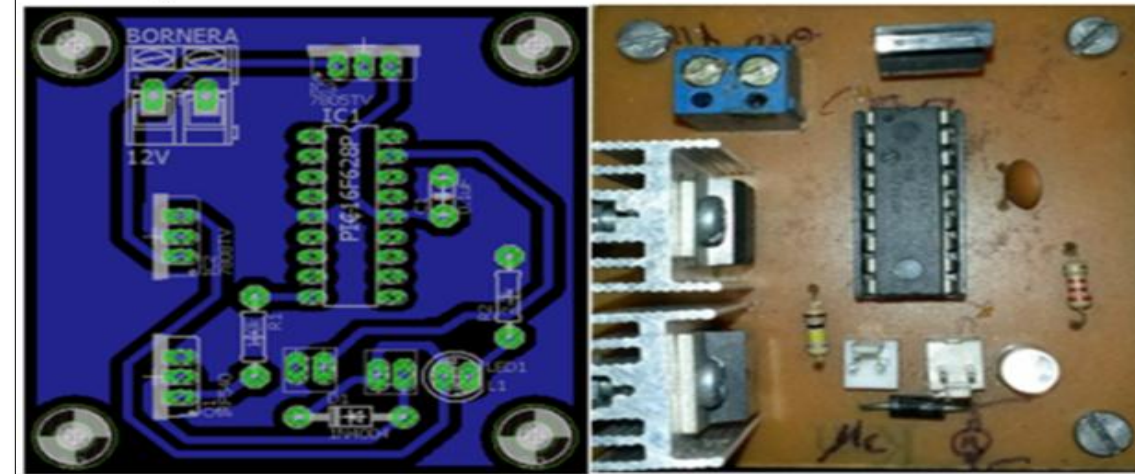
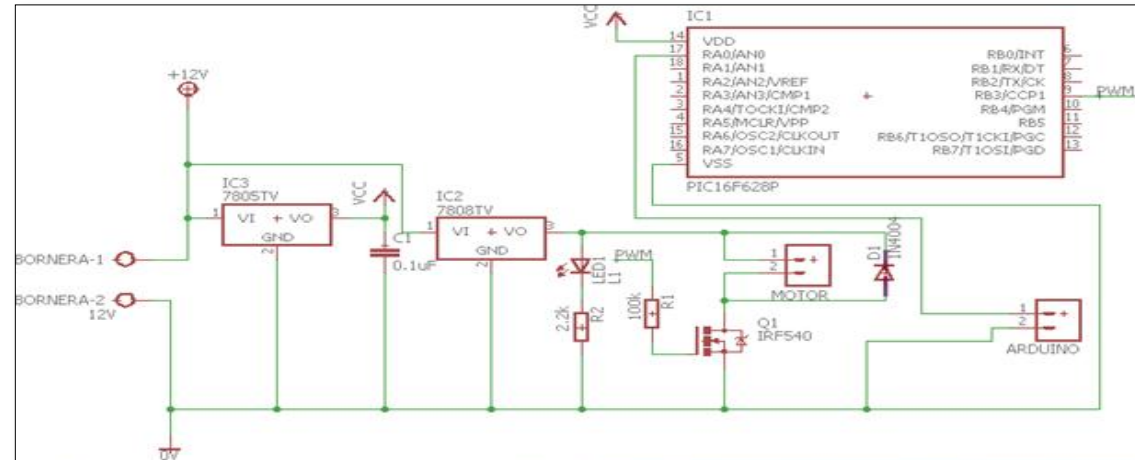
# DISEÑO ELECTRÓNICO



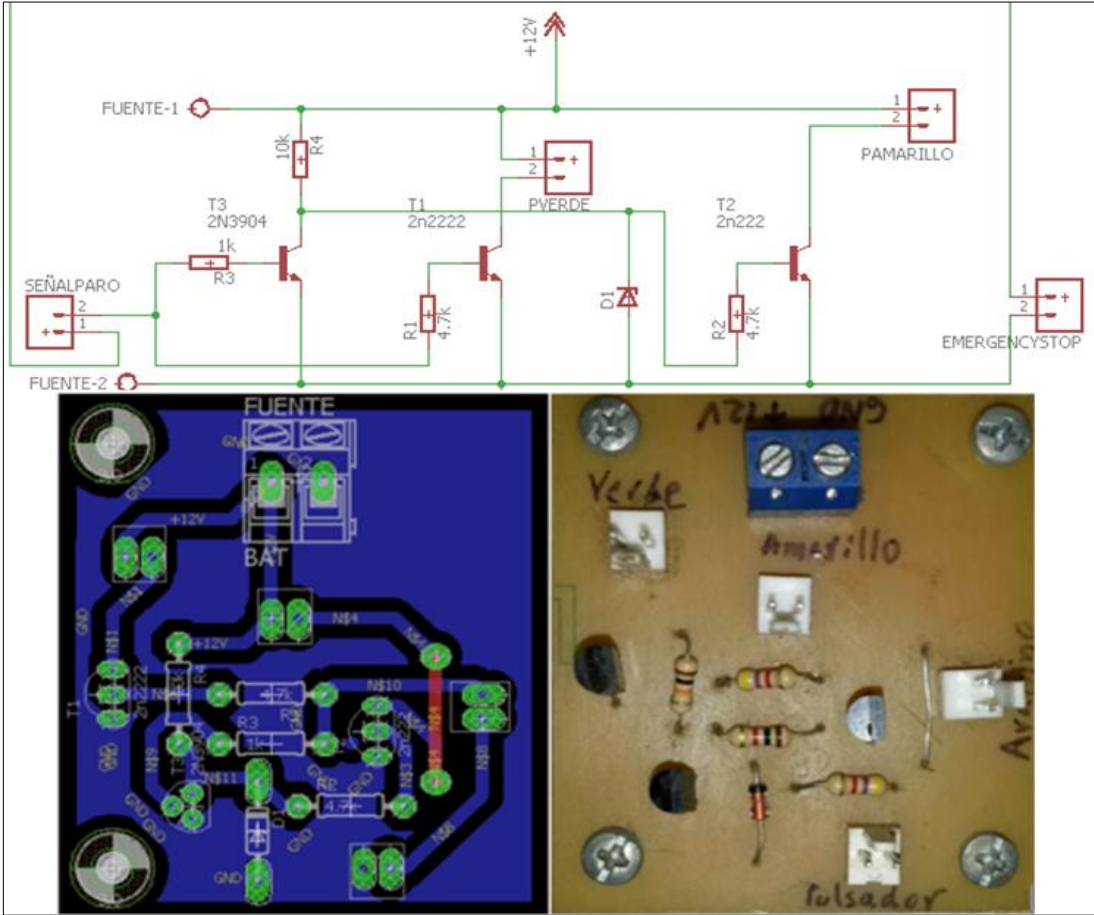
Fuente de 6v 3 A para Servomotores



## Acondicionamiento del Motor de la Herramienta



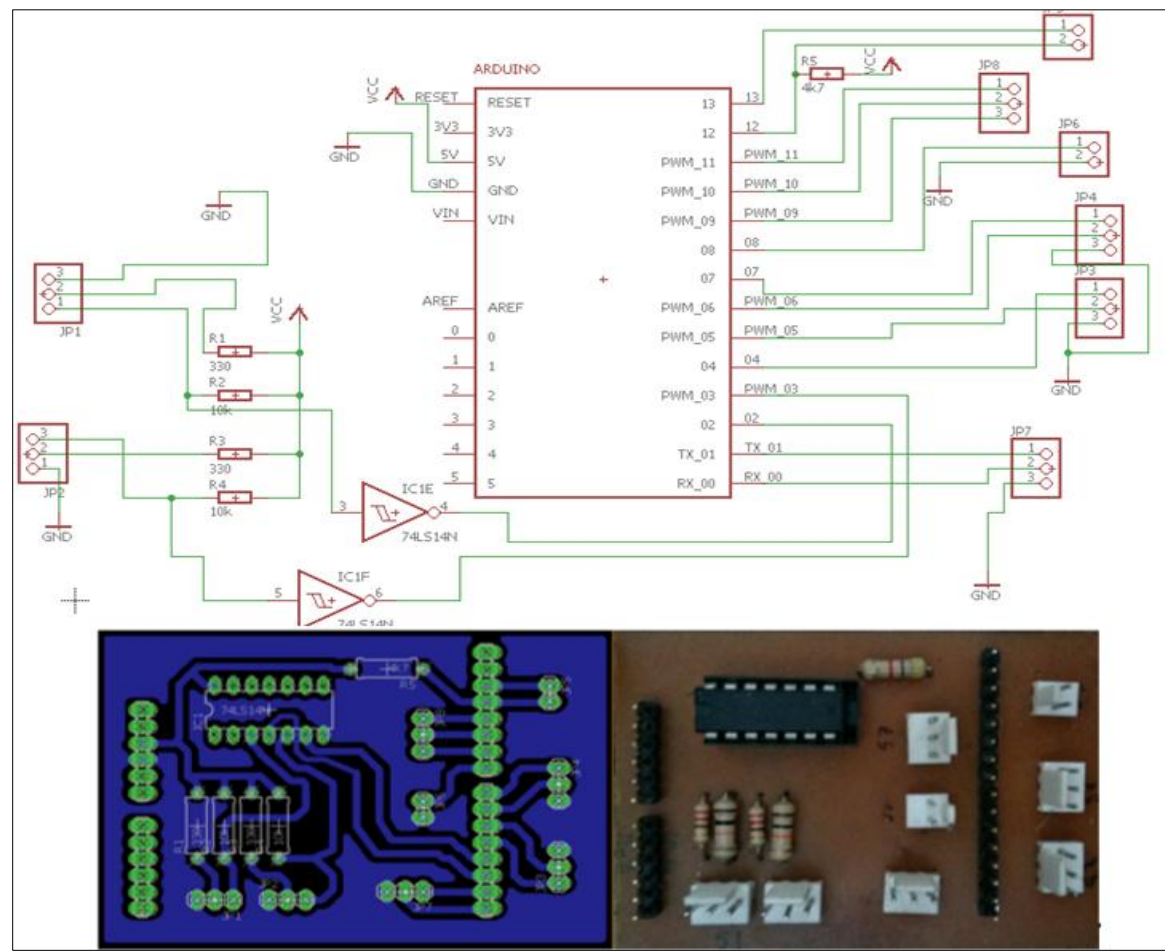
# DISEÑO ELECTRÓNICO



Paro de emergencia y Luces



## Shiel para Arduino



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# SOFTWARE

Arduino



NAVBOT: VERSION 1

Raspberry Pi



# Caffe

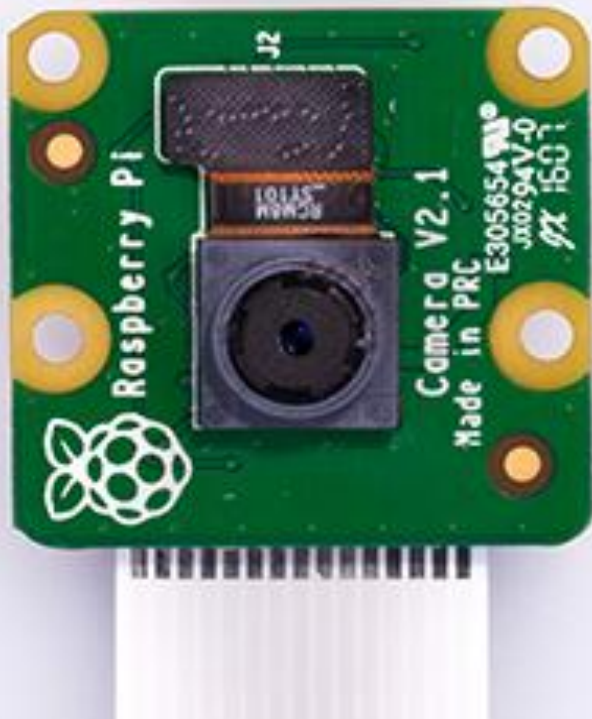
Wiring Pi



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# CÁMARA

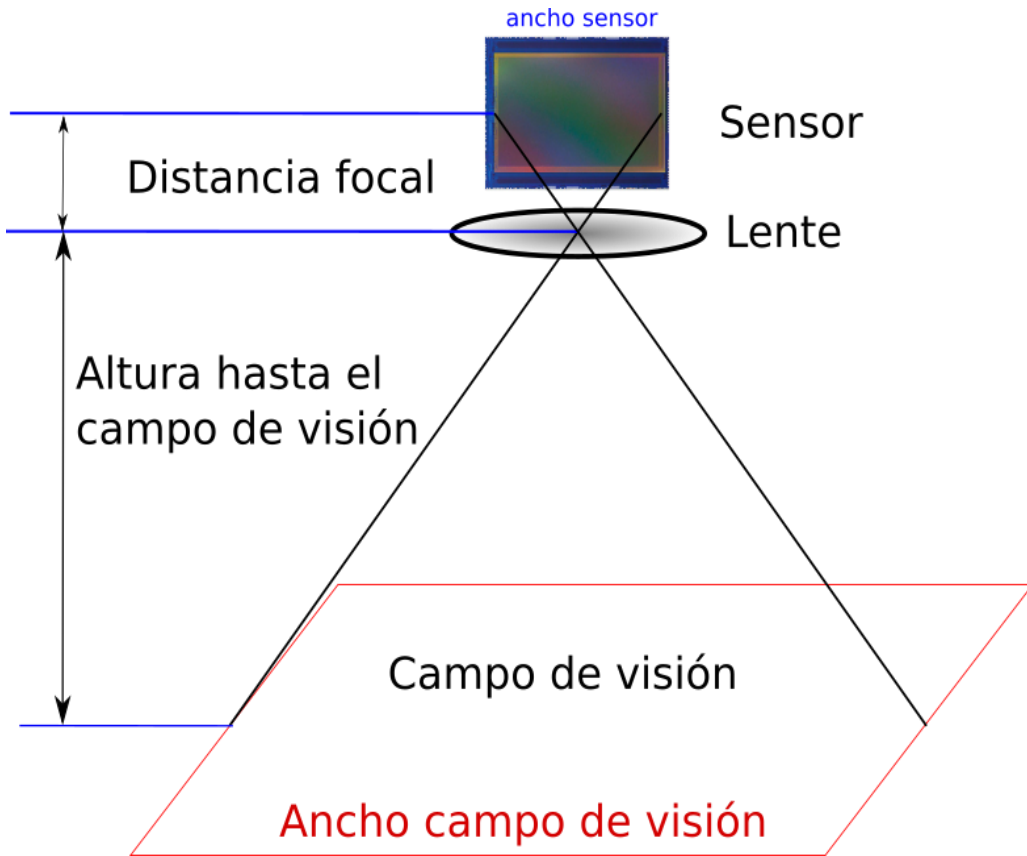


Característica	Detalle
Sensor	Sony IMX219
Tipo de Sensor	CMOS
Resolución	8MP con enfoque fijo(ajustable manualmente)
Interfaz de Bus	CSI-2
Máxima Resolución	3280 x 2464
Máximos Cuadros por Segundo (A la máxima resolución)	30fps
Área del sensor de imagen	3.68 x 2.76 mm (4.6 mm diagonal)
Relación del sensor	4:3
Tamaño del píxel	1.12 $\mu\text{m}$ x 1.12 $\mu\text{m}$
Tamaño óptica	1/4"
Distancia focal	3.04mm
Modos Adicionales	Slow Motion
Correcciones imagen	Control automático de exposición(AEC), Balance automático de blancos(AWB), Calibración automática de nivel negro(ABLC), Cancelación de píxeles defectuosos, etc.

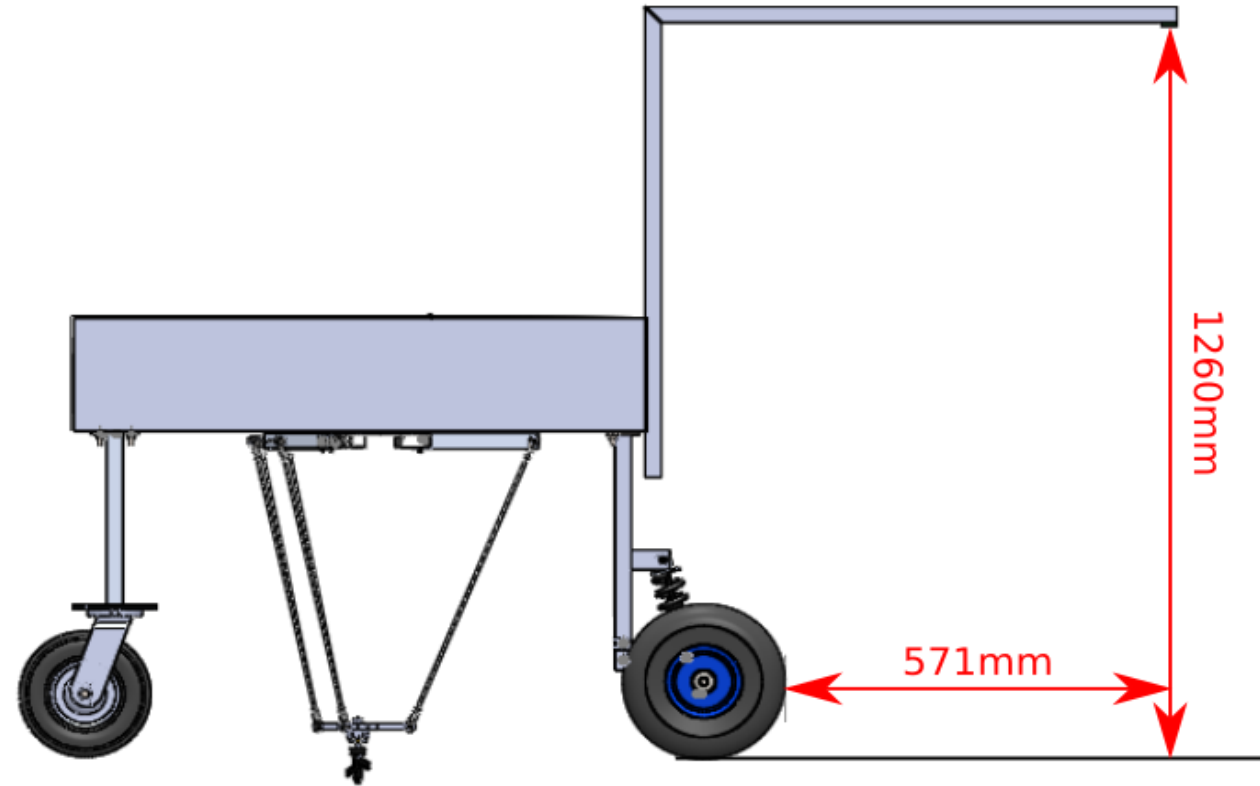


# POSICIÓN CÁMARA

$$\frac{\text{distancia focal}}{\text{ancho sensor}} = \frac{\text{altura hasta el campo de visión}}{\text{ancho campo visión}}$$



Posición de la cámara

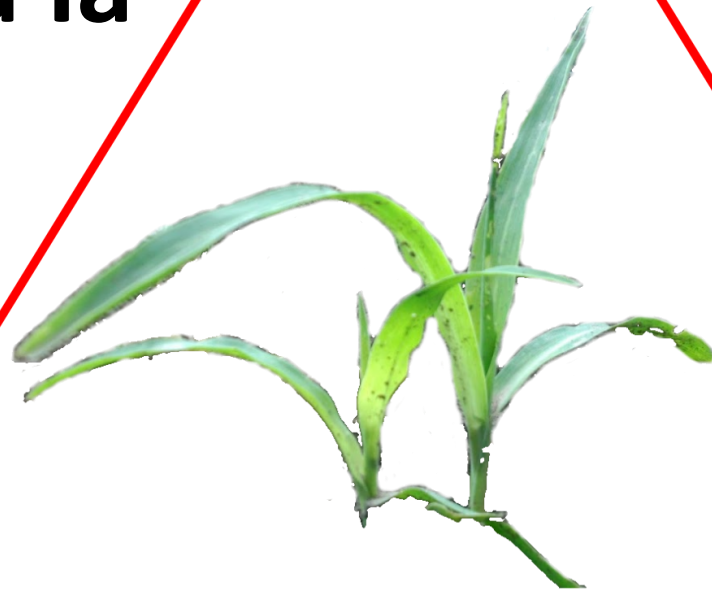


# OBTENCIÓN MUESTRAS

**Captura vertical**  
**Enfoque toda la**  
**planta**



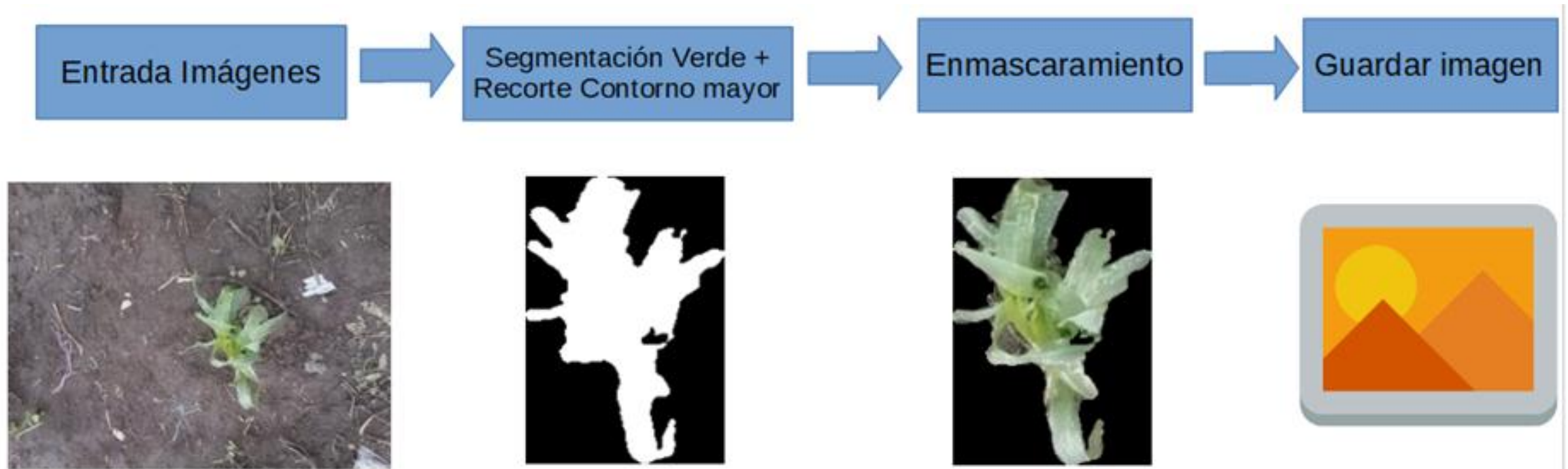
Cámara



Planta



# CLASIFICACIÓN MUESTRAS



# MUESTRAS OBTENIDAS

## Maíz(*Zea mays*) 3 y 7 Hojas



Mala Hierba(*Urtica Urens*, *Lysimachia vulgaris* , *Chenopodium album* , *Malva Capestri*)

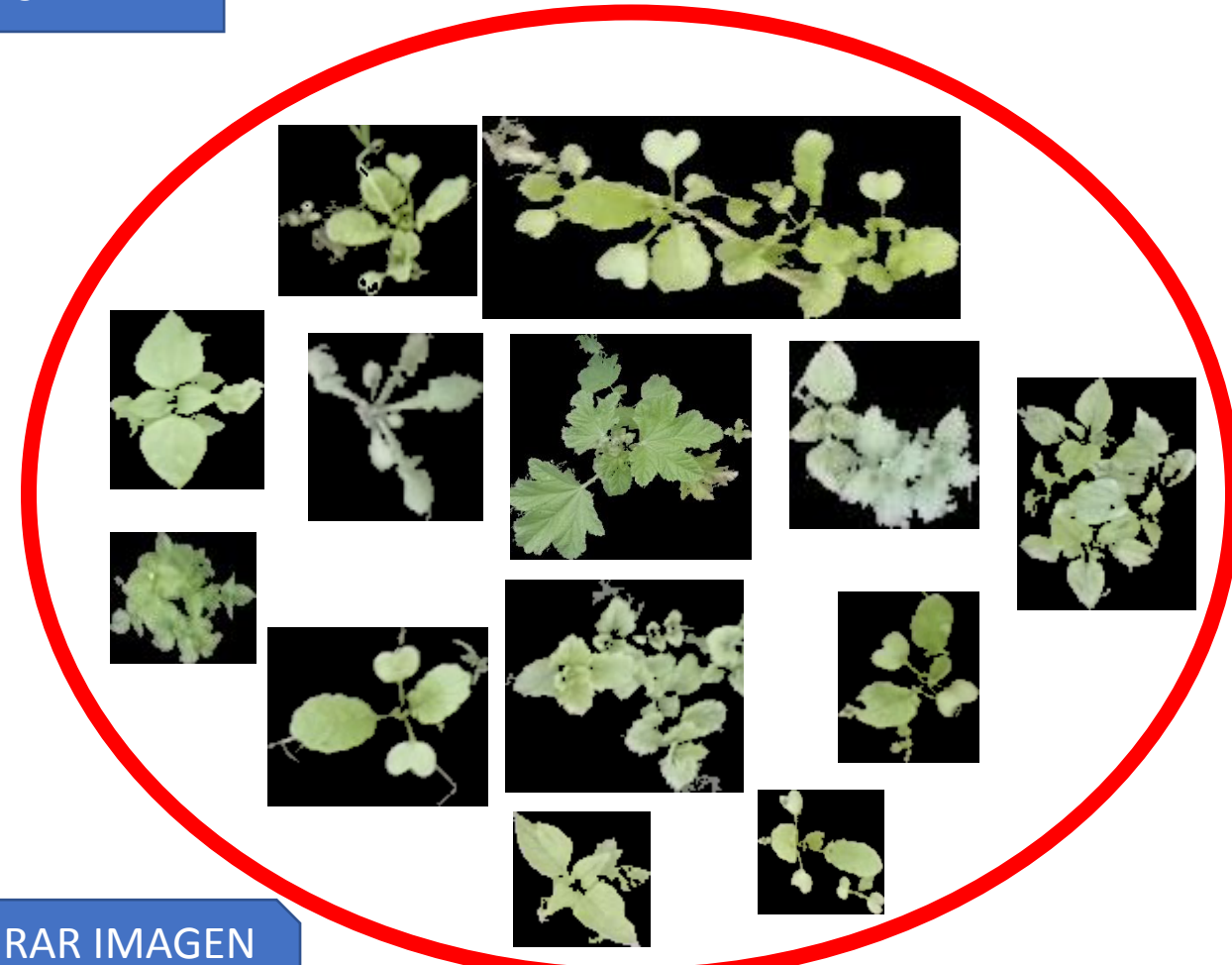


# CONFORMACIÓN DATASET(#IMÁGENES)

2835 maíz

PROBLEMA: MUY POCAS  
MUESTRAS

861 mala hierba



SOLUCIÓN: GIRAR IMAGEN  
CADA 30°



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CONFORMACIÓN DATASET FINAL (#IMÁGENES)

34222 maíz

x12

10332 mala hierba



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CONFORMACIÓN DATASET FINAL (#IMÁGENES)

27378, 6844 maíz \*aleatorio

8266, 2066 mala hierba



4/5 Entrenamiento, 1/5 Validación

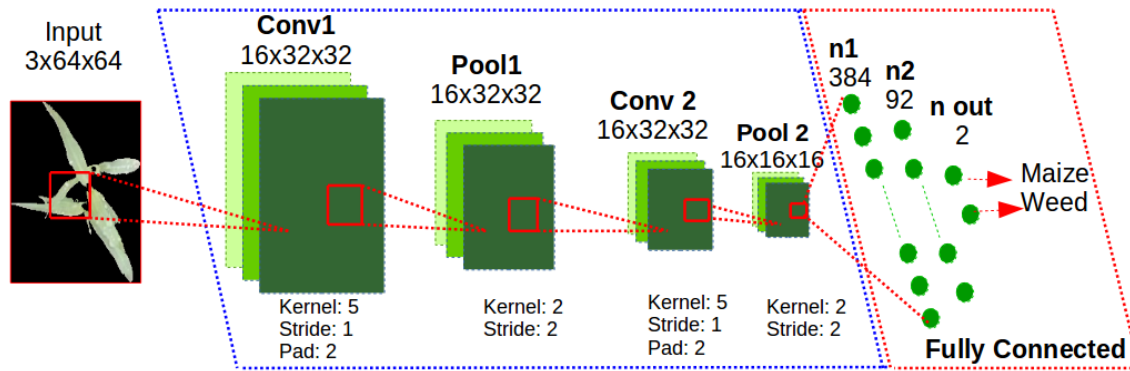


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# MACHINE LEARNING

## Convolutional Neural Networks (CNN)



cNET 16 Filtros  
(Potena, Nardi, & Pretto, 2016)

97,2 Acierto, 8% Loss

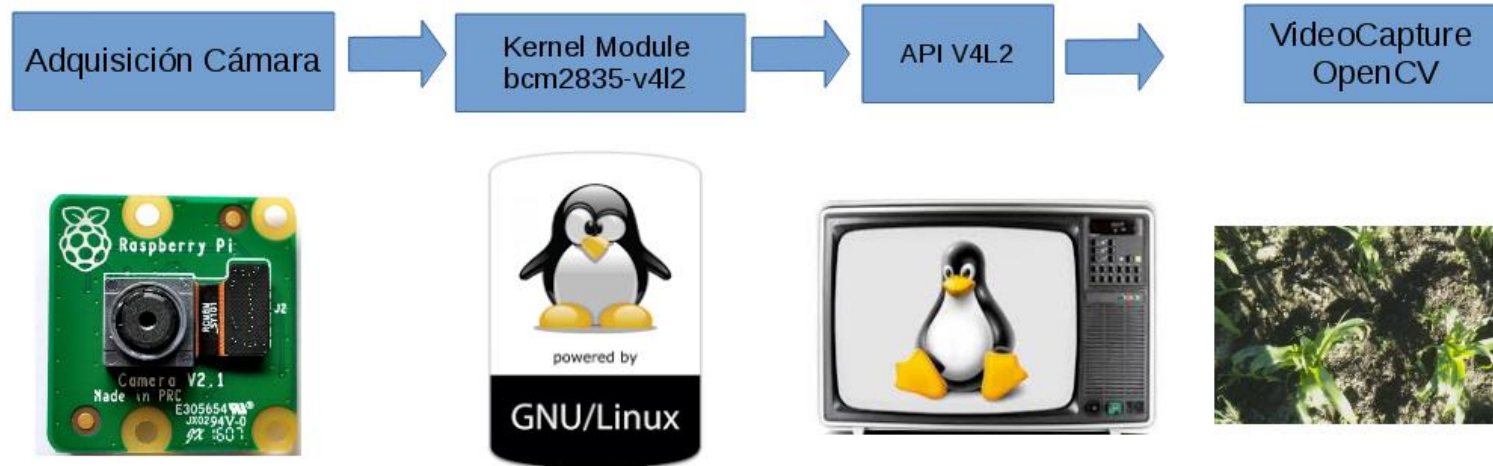


Solucionador ADAM

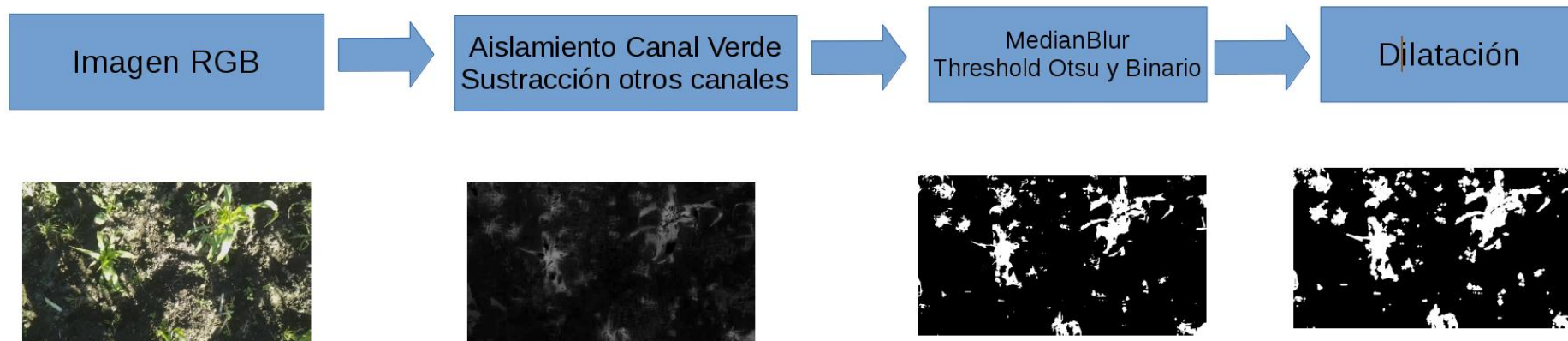


# CAPTURA/PRE-PROCESAMIENTO

## Adquisición

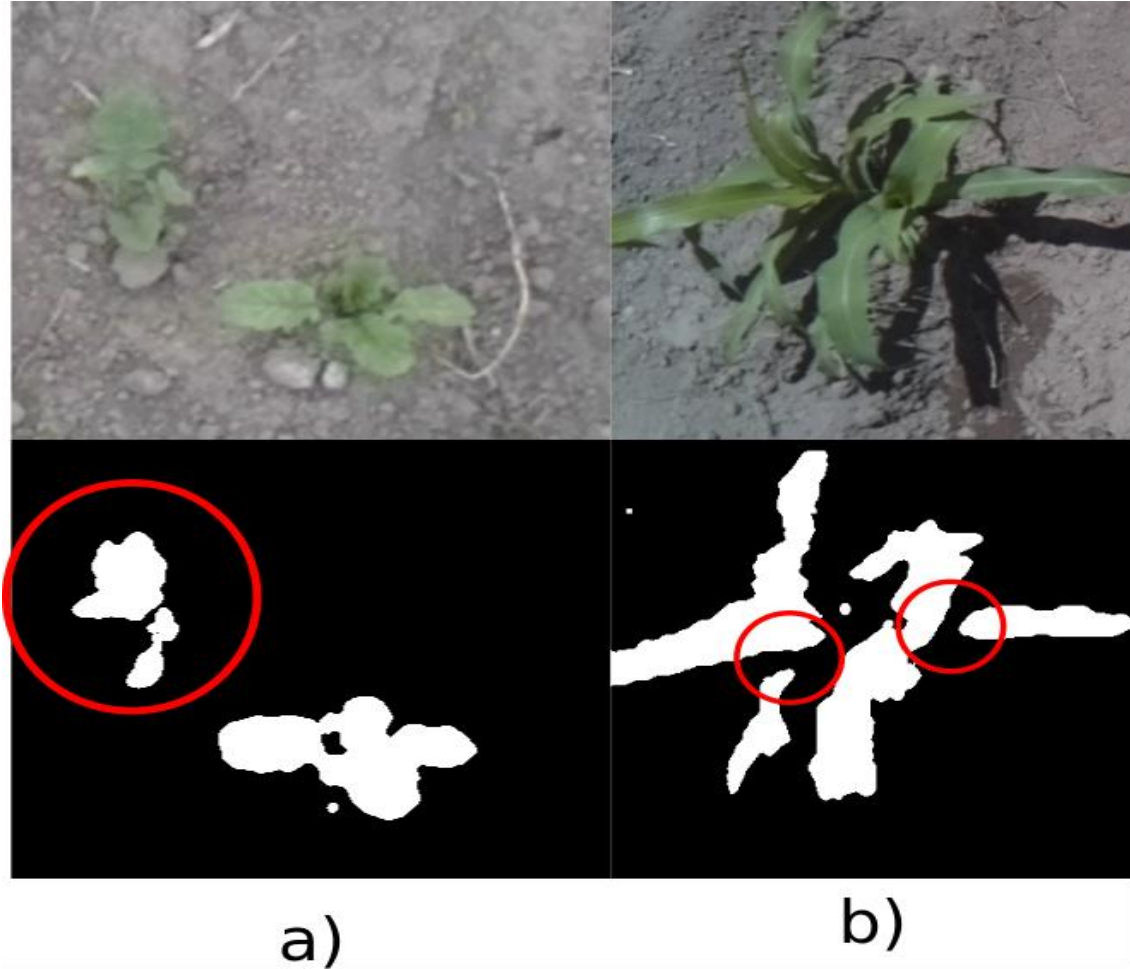


## Pre-procesamiento

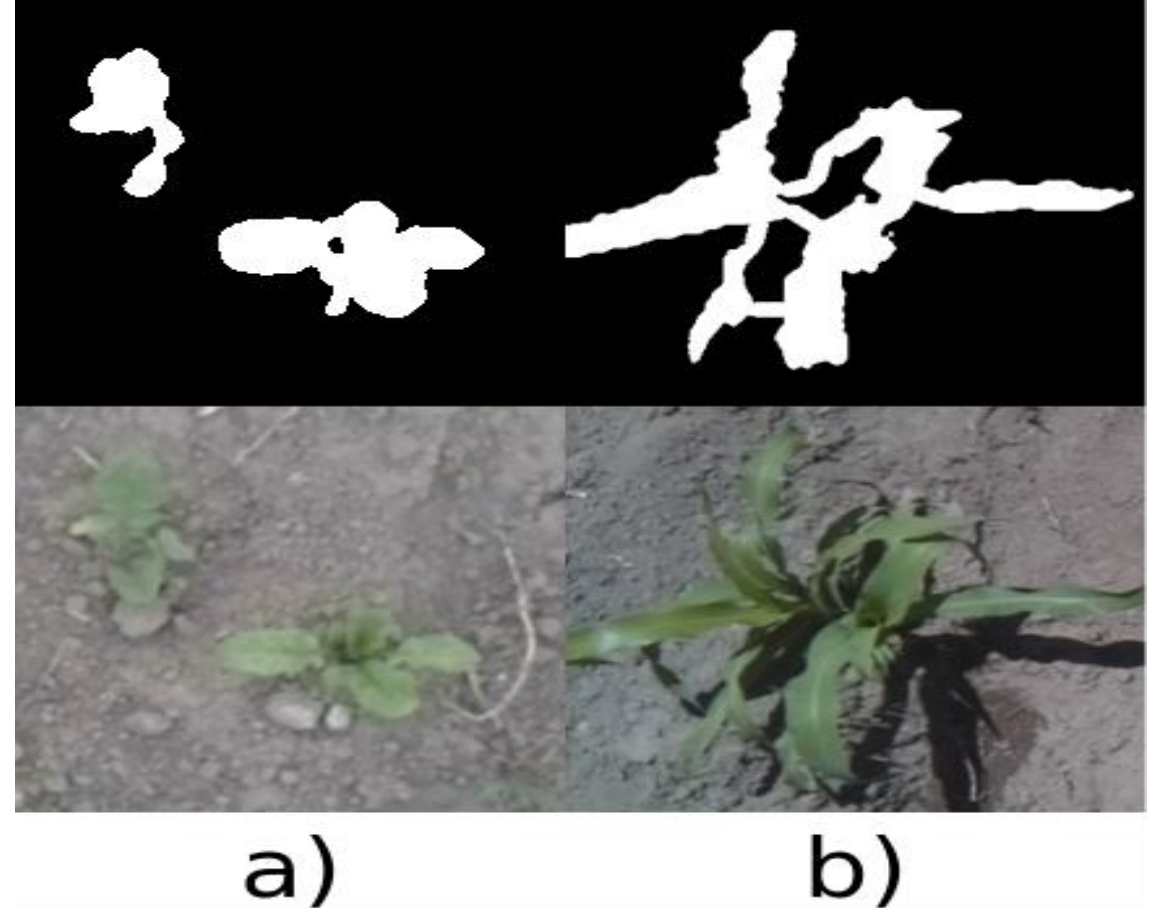


# RECONSTRUCCIÓN CONTORNOS

Problema: Tierra y Sombras

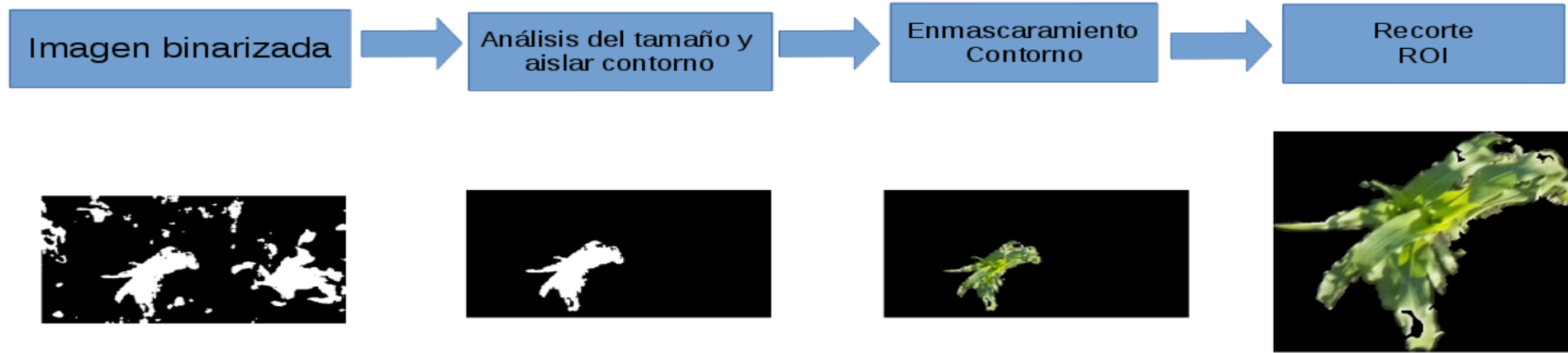


Solución: Análisis de contornos

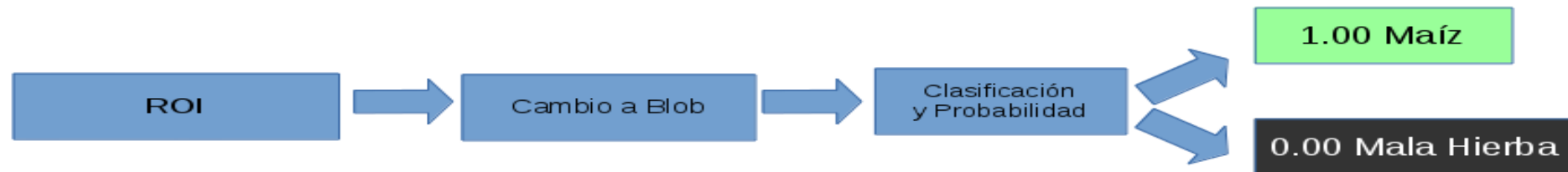


# SEGMENTACIÓN/CLASIFICACIÓN

## Segmentación



## Clasificación



Caffe



# IMPLEMENTACIÓN FINAL

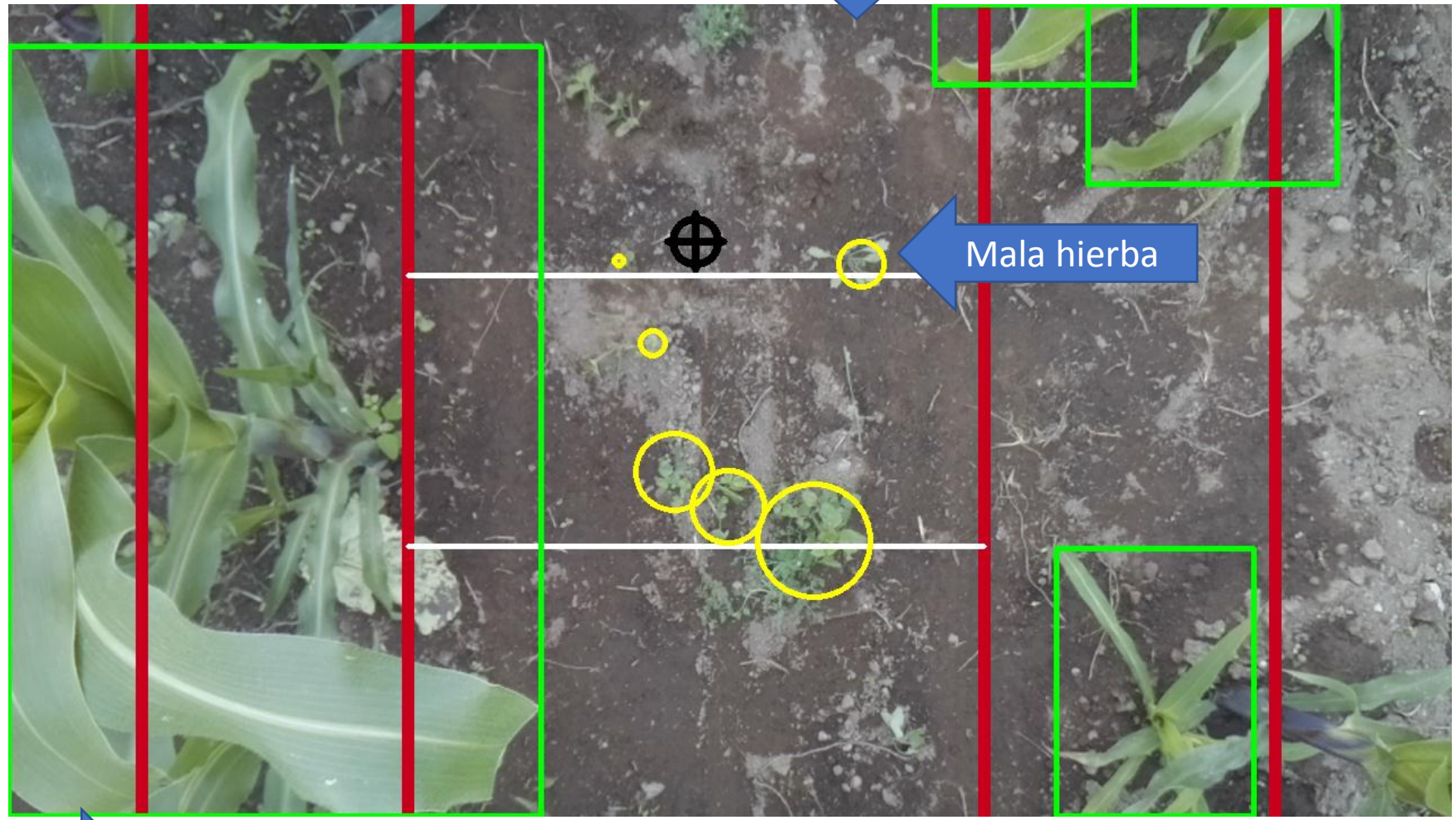
## SEGMENTACIÓN



# IMPLEMENTACIÓN FINAL

Centro  
Hilera

## CLASIFICACIÓN



Plantas

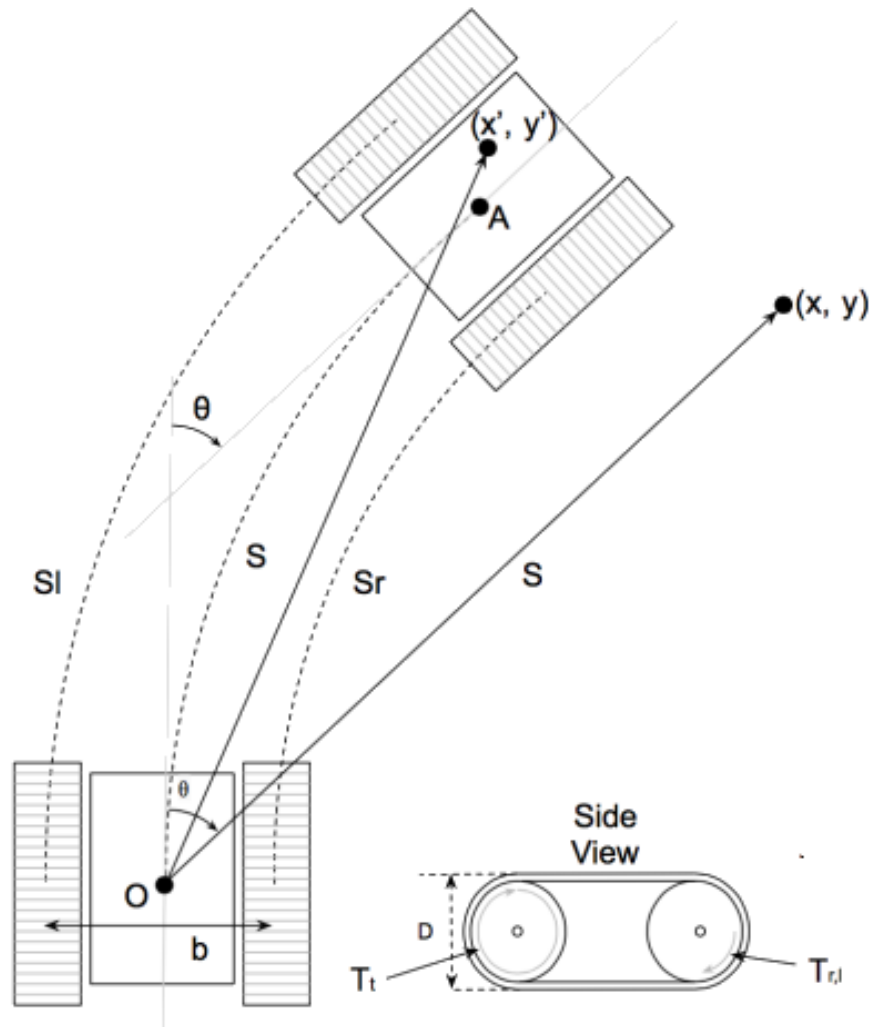
Mala hierba

Hilera



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# NAVEGACIÓN- ODOMETRÍA



$$S_D = \frac{D * \pi * T_D}{T_t}$$

$$S_I = \frac{D * \pi * T_I}{T_t}$$

$$S = \frac{S_D + S_I}{2}$$

$$\theta = \frac{S_I - S_D}{b}$$

$$x = S * \cos(\theta)$$

$$y = S * \sin(\theta)$$

## Entrada:

$D$  :Diámetro de las Ruedas

$T_t$ : Resolución del Encoder

$T_D$ : Pulsos Encoder Derecho

$T_I$ : Pulsos Encoder Izquierdo

## Salida:

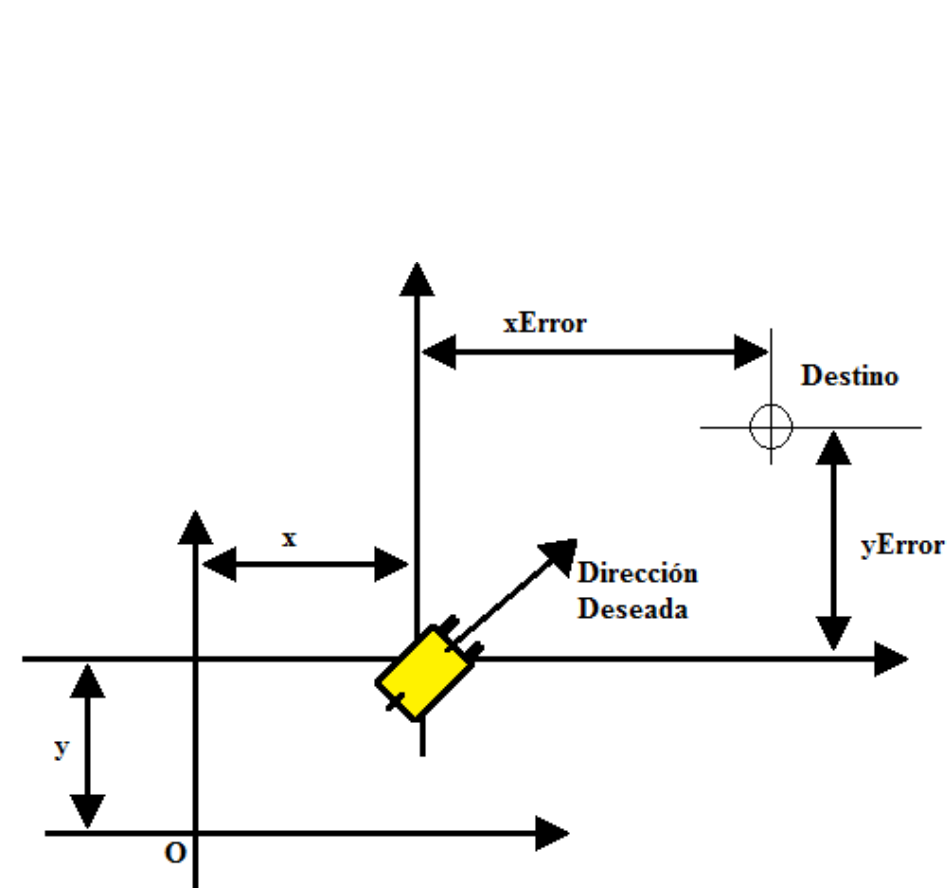
$\theta$ : Ángulo de Dirección

$x$ : Posición en Eje X

$y$ : Posición en Eje Y



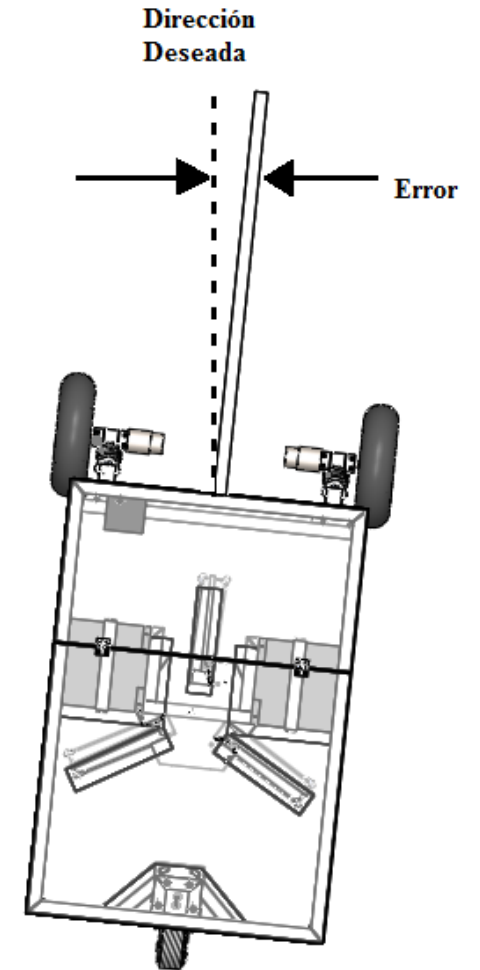
# CONTROL DE LA TRAYECTORIA



$$xError = xDestino - xActual$$

$$yError = yDestino - yActual$$

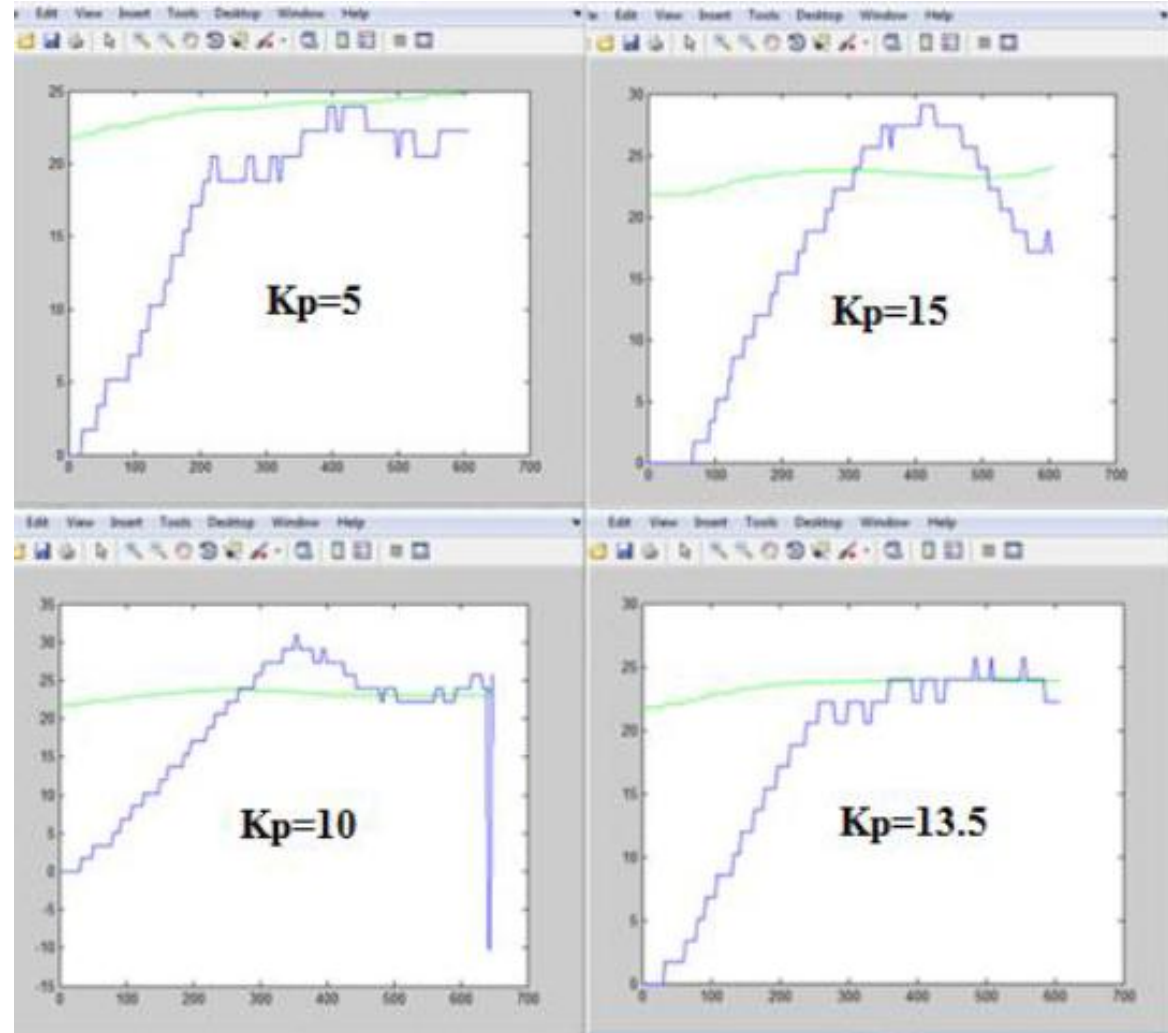
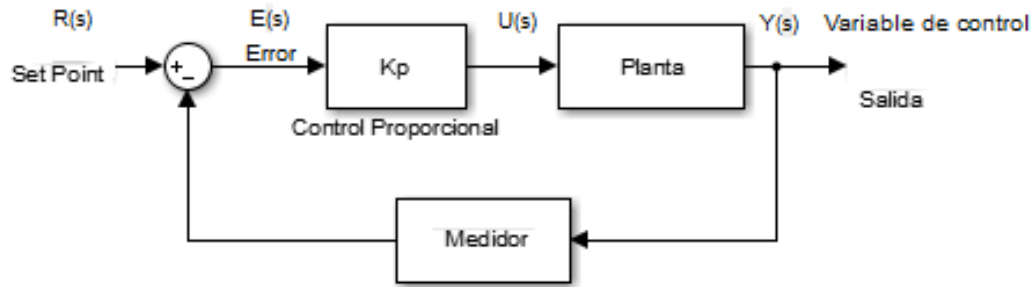
$$dirección\_deseada = ArcTan\left(\frac{yError}{xError}\right)$$





# CONTROL DE LA TRAYECTORIA

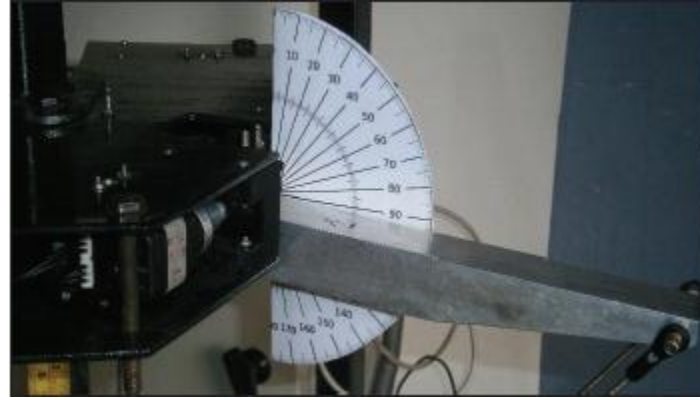
## CONTROL PROPORCIONAL:



# CONTROL DEL ROBOT TIPO DELTA

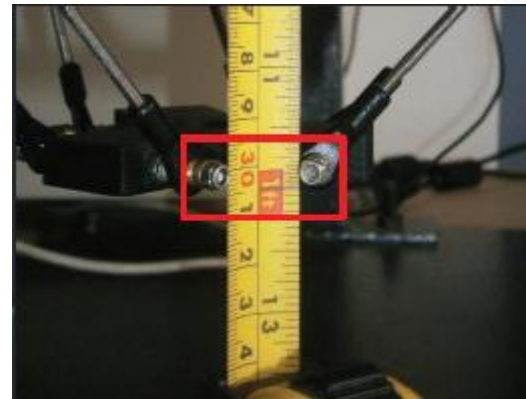
- Cinematica Inversa:

Entrada  $P(P_x, P_y, P_z)$   Salida  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

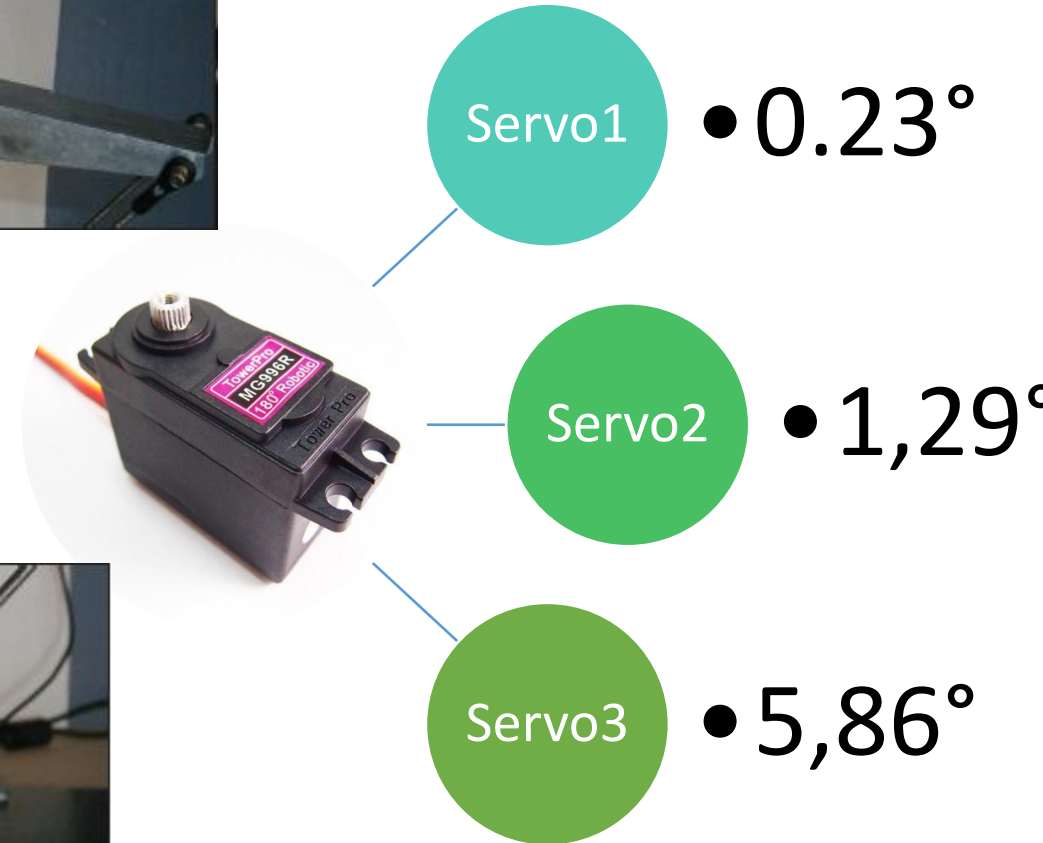


- Cinematica Directa:

Entrada  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$   Salida:  $P(P_x, P_y, P_z)$



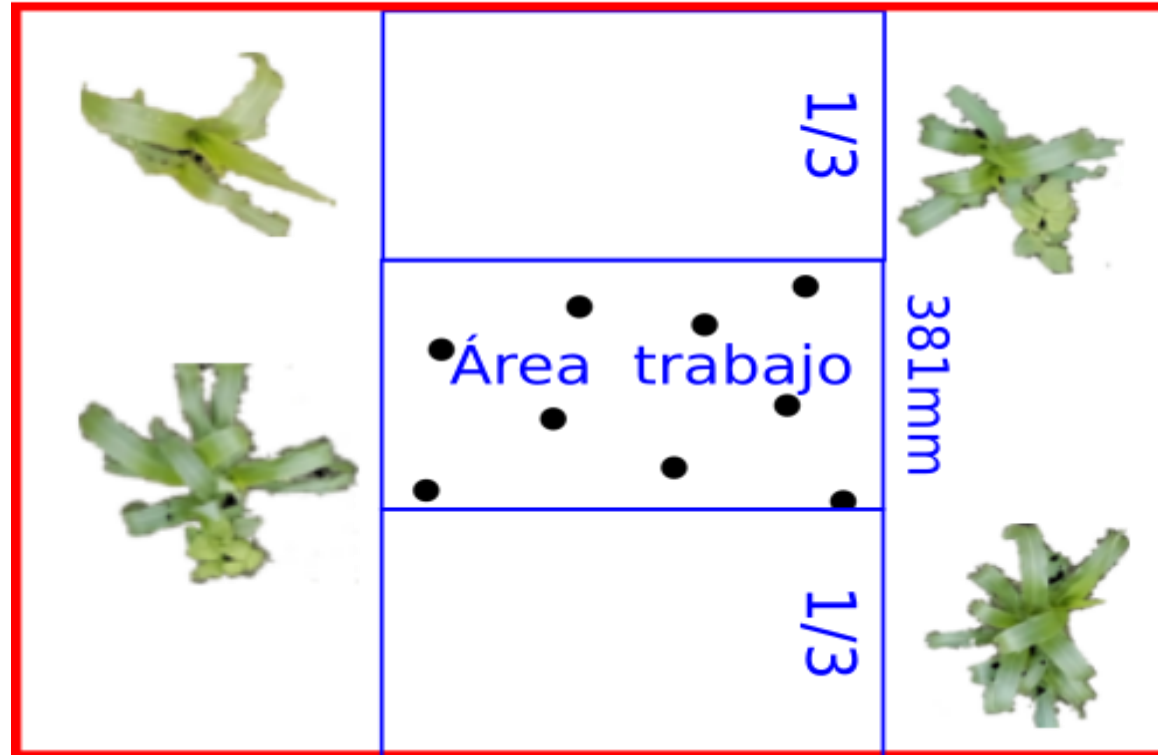
## CALIBRACIÓN DEL ROBOT DELTA



# ÁREA DE TRABAJO

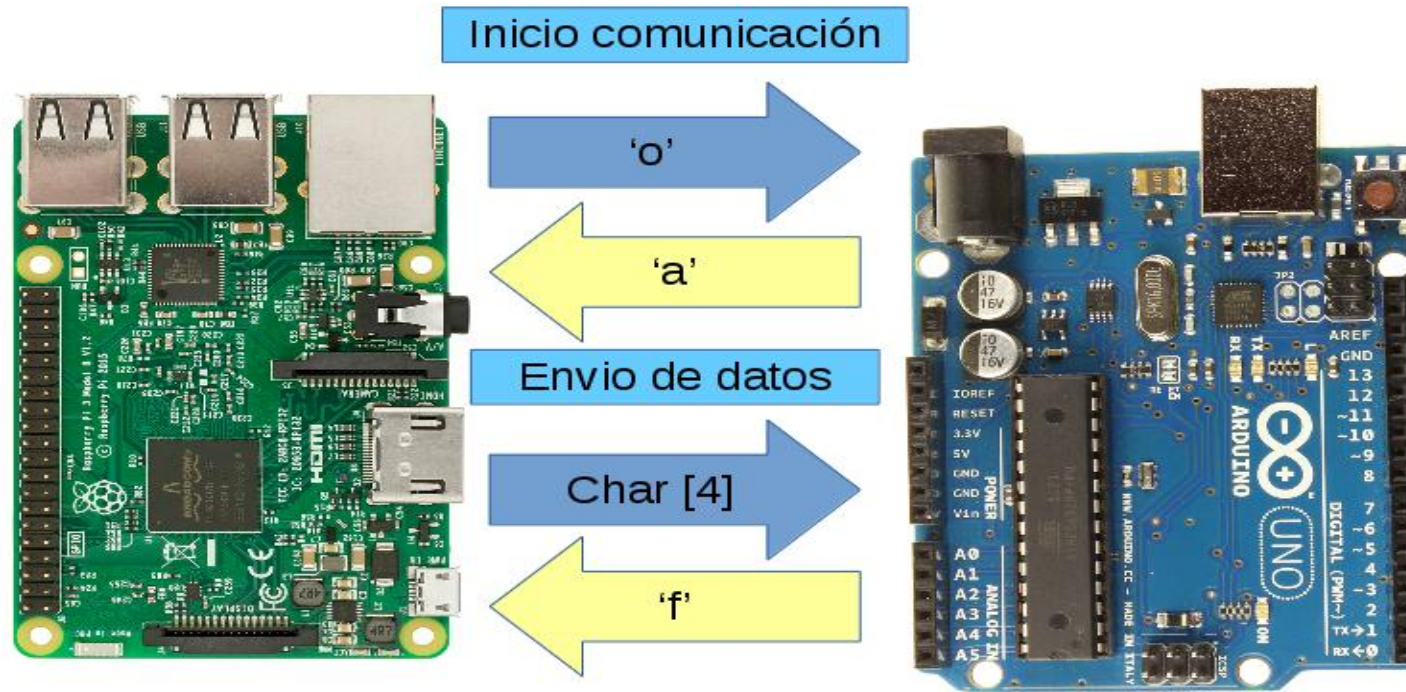
*posición en mm = 1.19 \* posición en pixeles*

Área captura

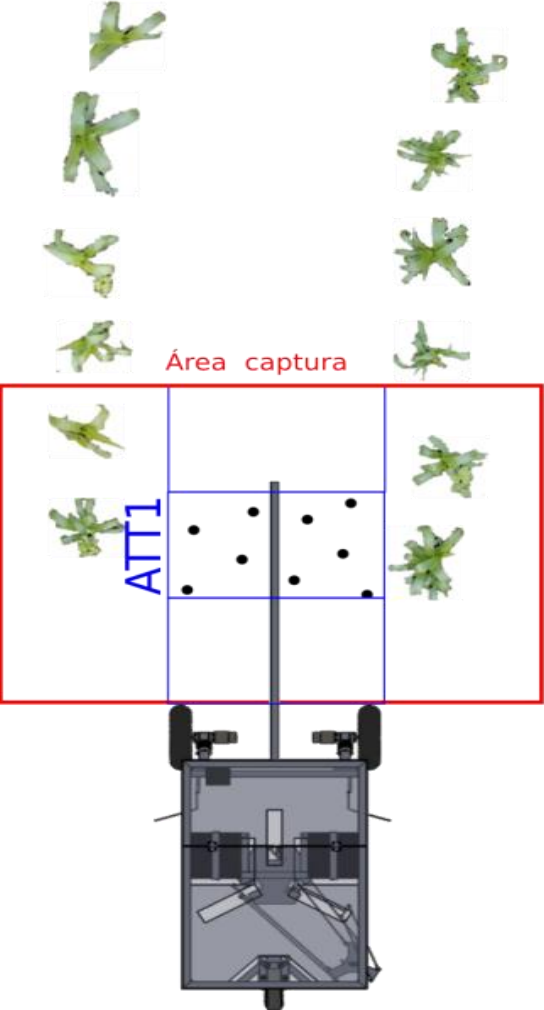


# ACONDICIONAMIENTO DATOS ROBOT

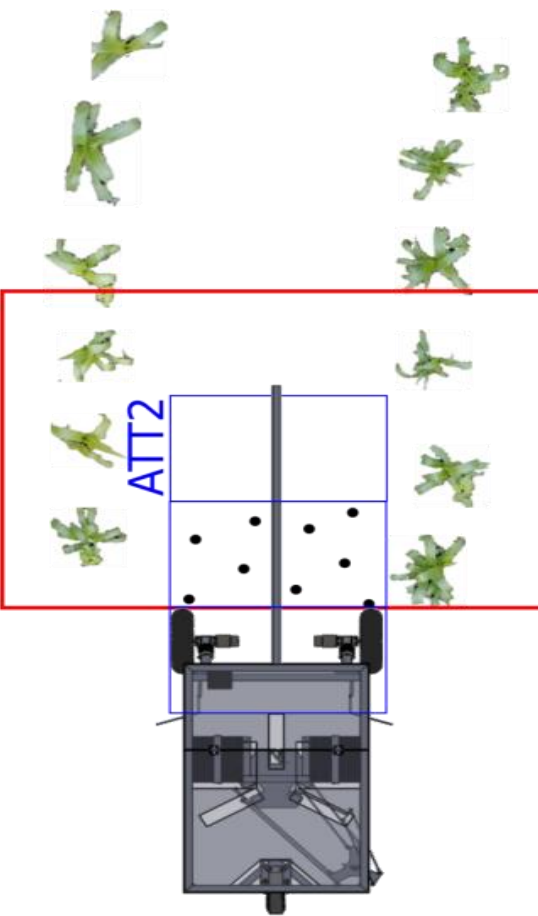
*posición en mm = 1.19 \* posición en pixeles*



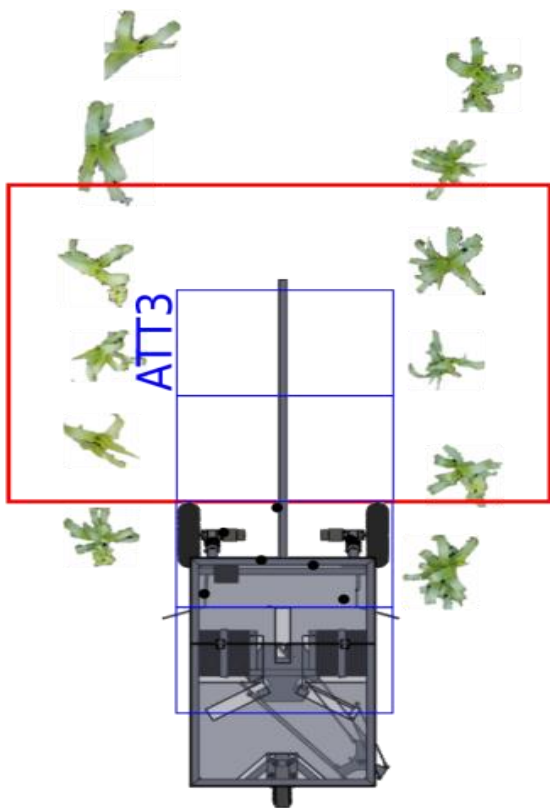
# FUNCIONAMIENTO



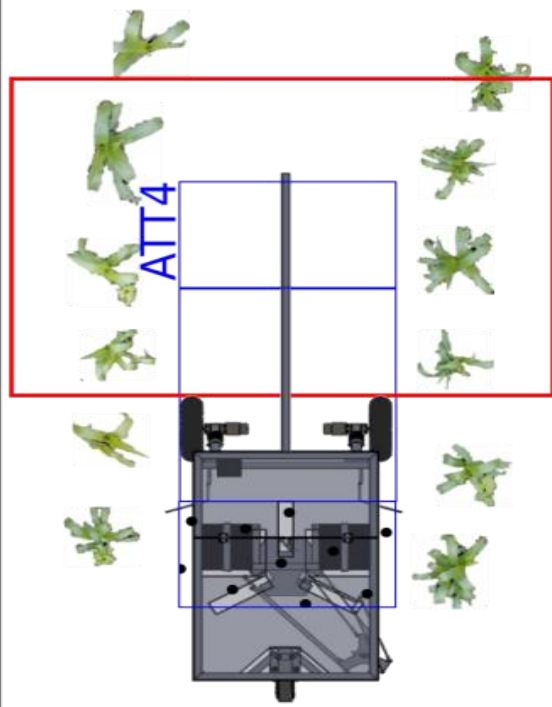
a)



b)



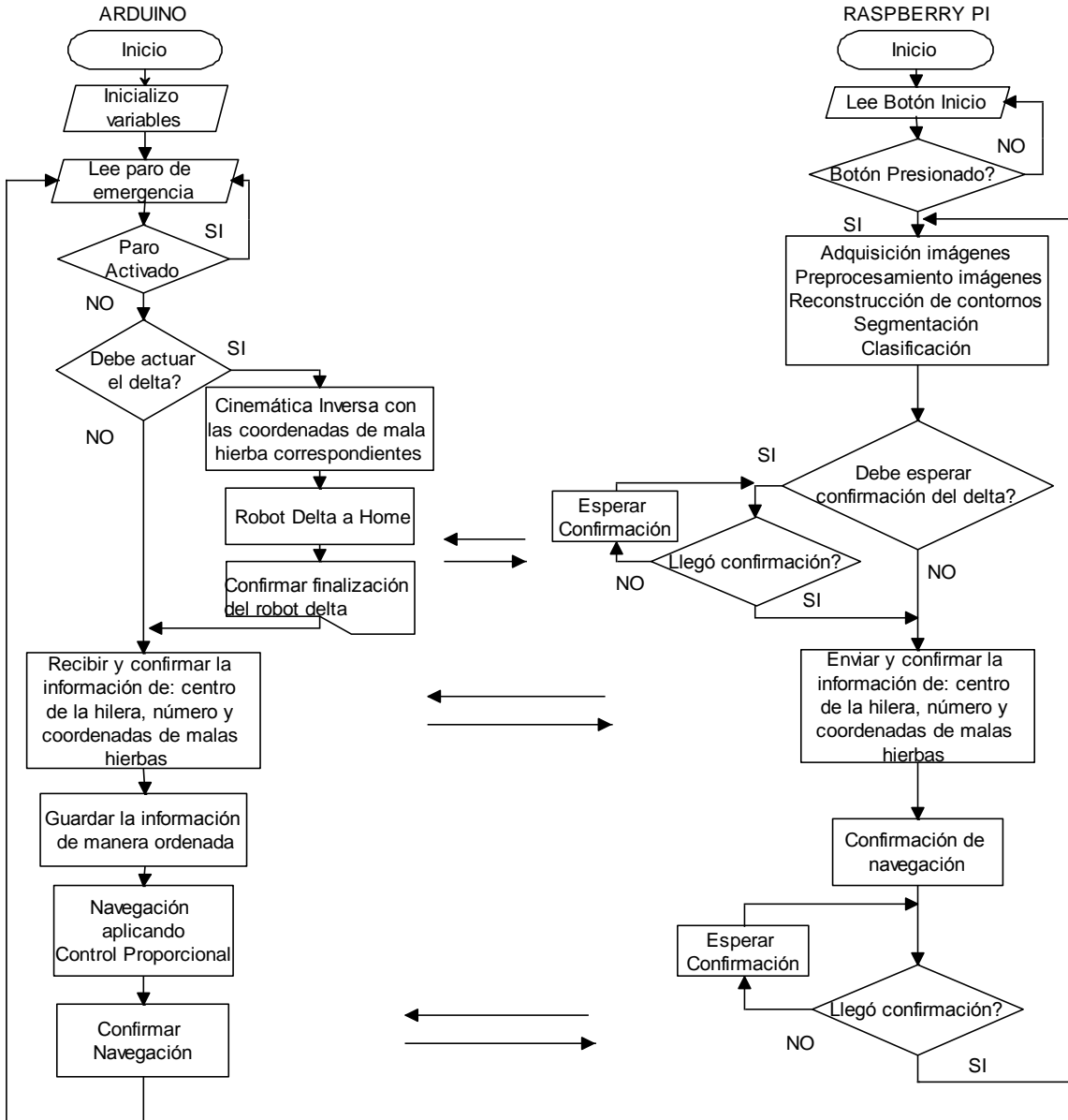
c)



d)



# DIAGRAMA DE CONTROL TOTAL DEL PROTOTIPO





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# PRUEBAS Y RESULTADOS

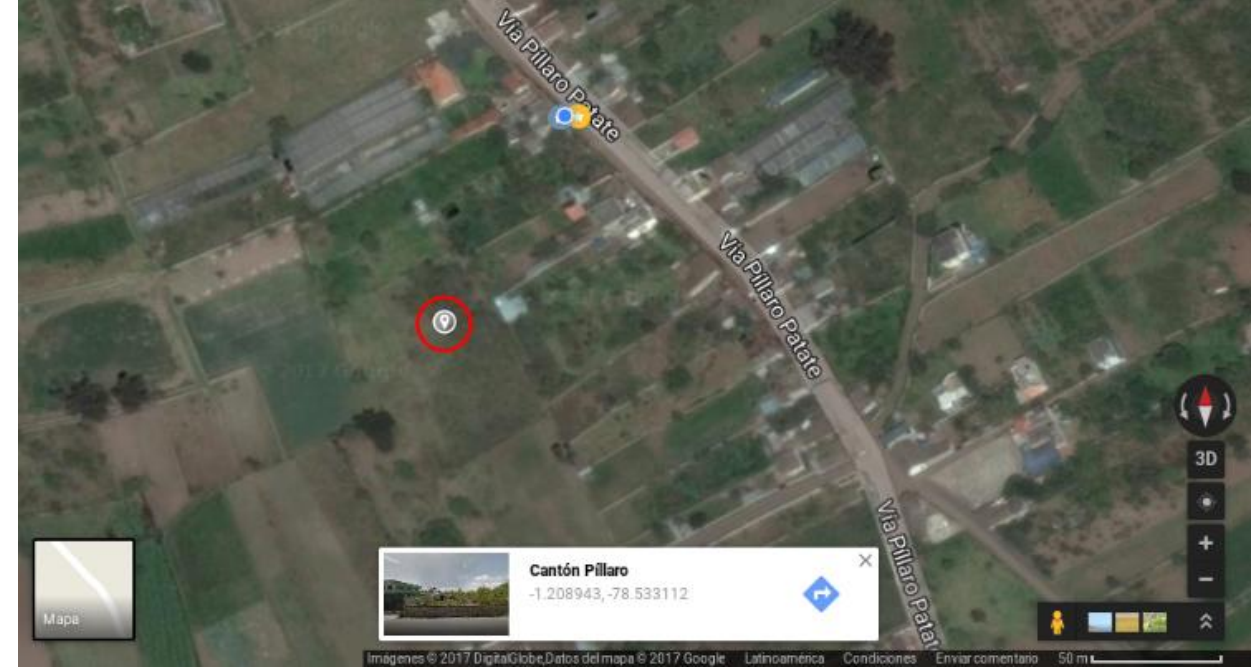


# LUGAR DE PRUEBAS

## Campo de trabajo



## Ubicación





# RENDIMIENTO MICROCOMPUTADOR

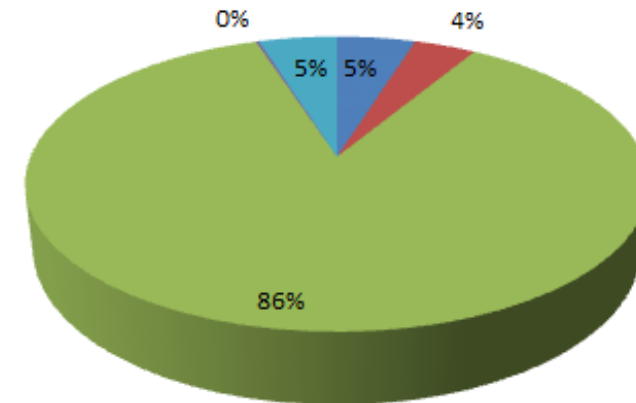
## Reconstrucción

```
pi@raspberrypi: ~/Tesis/build-ProgramaTesis-Desktop-Release
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi:~/Tesis/build-ProgramaTesis-Desktop-Release $ ./ProgramaTesis
Ancho de Capa64
Alto de Capa: 64
Inicio puerto Serial con Arduino
Pulsado de Boton inicio
Inicio: 1
Ingreso a capturar
-----
Nueva Imagen 0
-----
Inicio Contornos
Tiempo deteccion contornos: 0.264181
Tamaño contornos detectados: 28
-----
Fin deteccion contornos
-----
Inicio reconstruir contornos
Tiempo reconstruir contornos: 2.3657
Tamaño contornos reconstruidos: 18
-----
Fin reconstruccion contornos
-----
Inicio clasificador
```

## Procesamiento

### Tiempos de procesamiento

- Pre-procesamiento
- Reconstrucción de contornos
- Clasificación
- Generación hilera
- Eliminar innecesarios



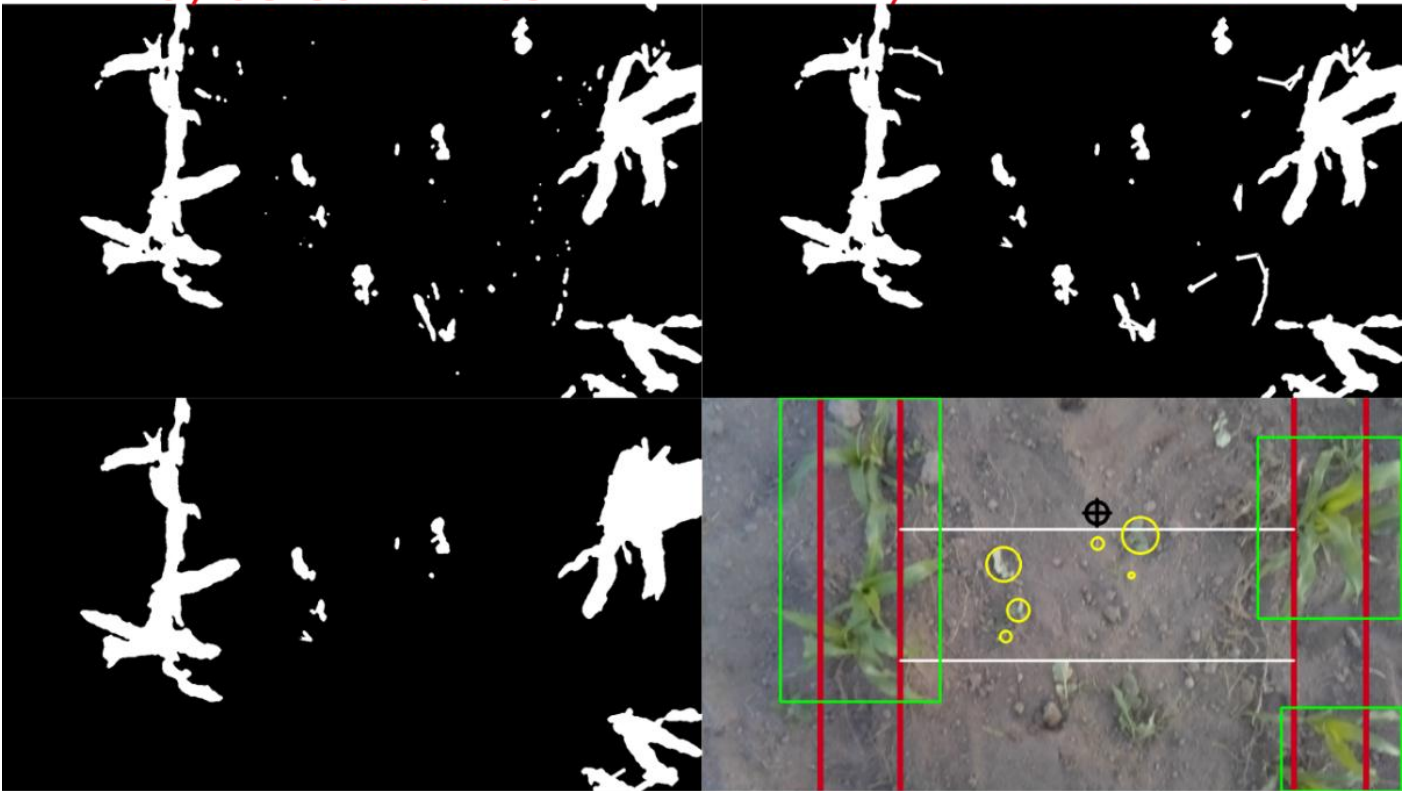
$$t \approx 5,22 \text{ s}$$



# EFICIENCIA REDUCCIÓN CONTORNOS

a) 68 contornos

b) 29 contornos

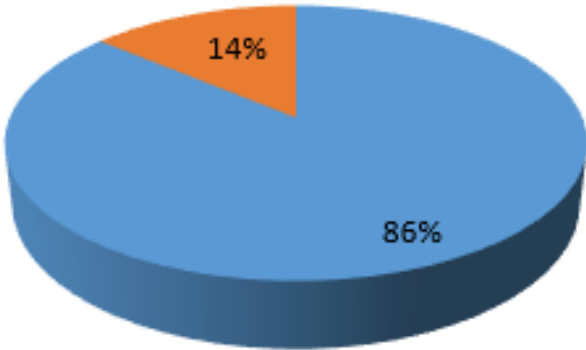


c) 10 contornos

d) 3 Maíz 7 Mala Hierba

## Porcentaje del reducción contornos

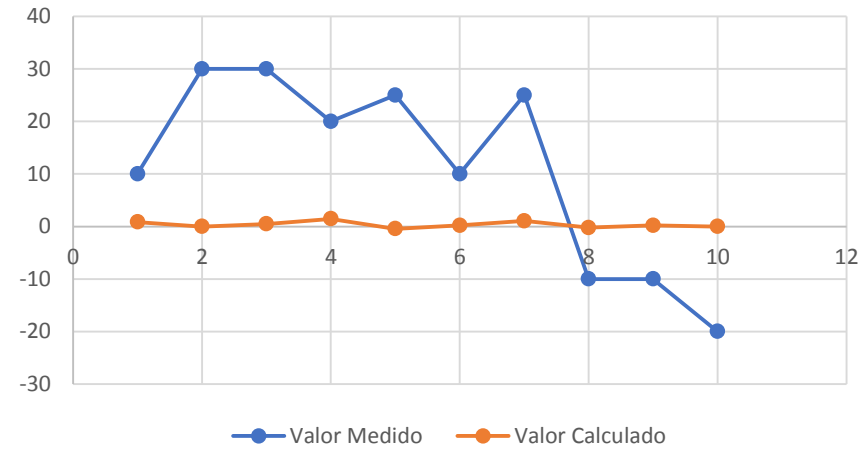
■ Contornos Eliminados ■ Final



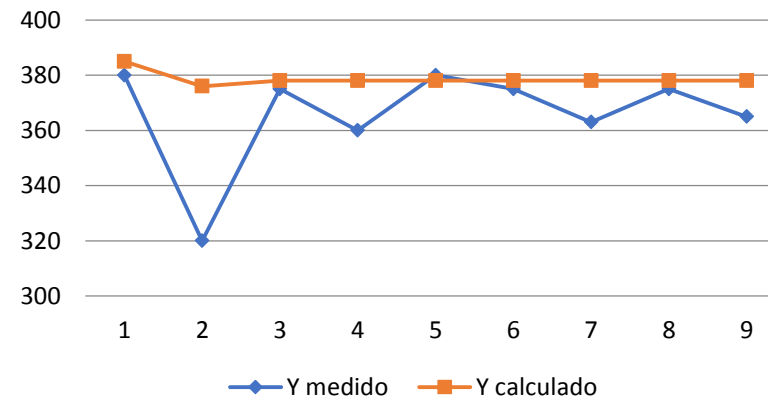
# PRUEBAS NAVEGACIÓN TERRENO CULTIVO



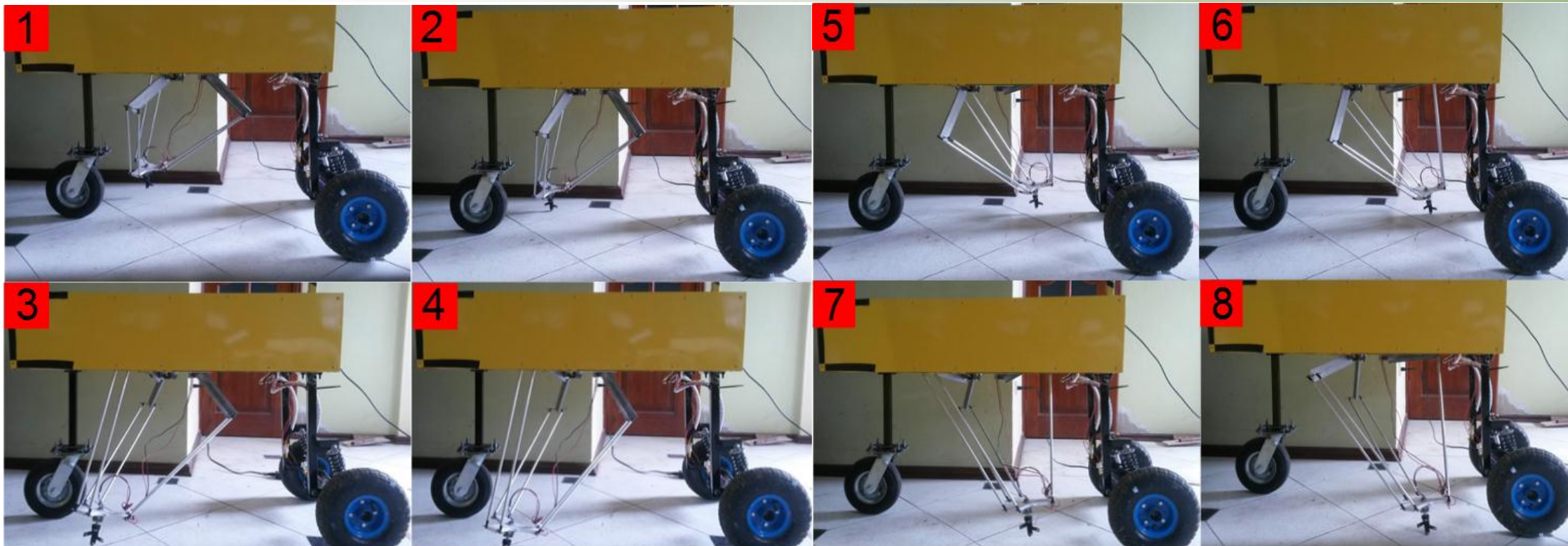
### Navegación Eje X(mm)



### Navegación Eje Y(mm)



# PRUEBAS ROBOT DELTA-COMPROBACIÓN



← Error x:  
16mm

Error y:  
11mm →



# RESULTADOS DESHIERBA

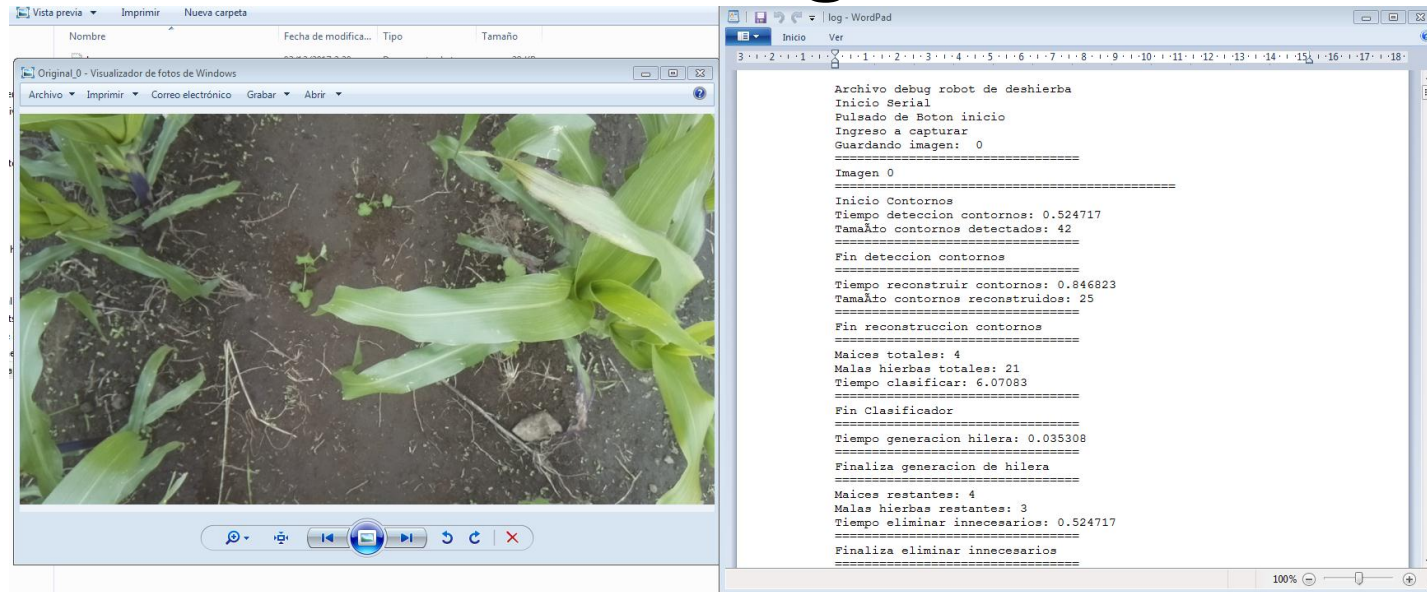
**Muestra**

$$n = \frac{N * Z_a^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z_a^2 * p * q}$$

$N = 1008$  plantas  $Z_a = 1,96$ (95% confianza)

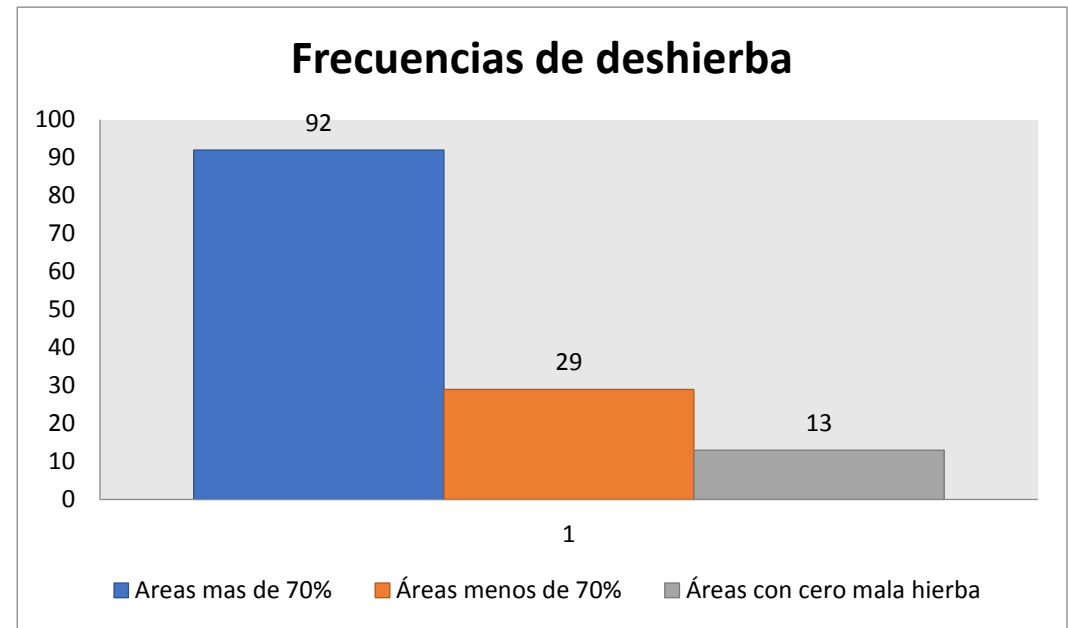
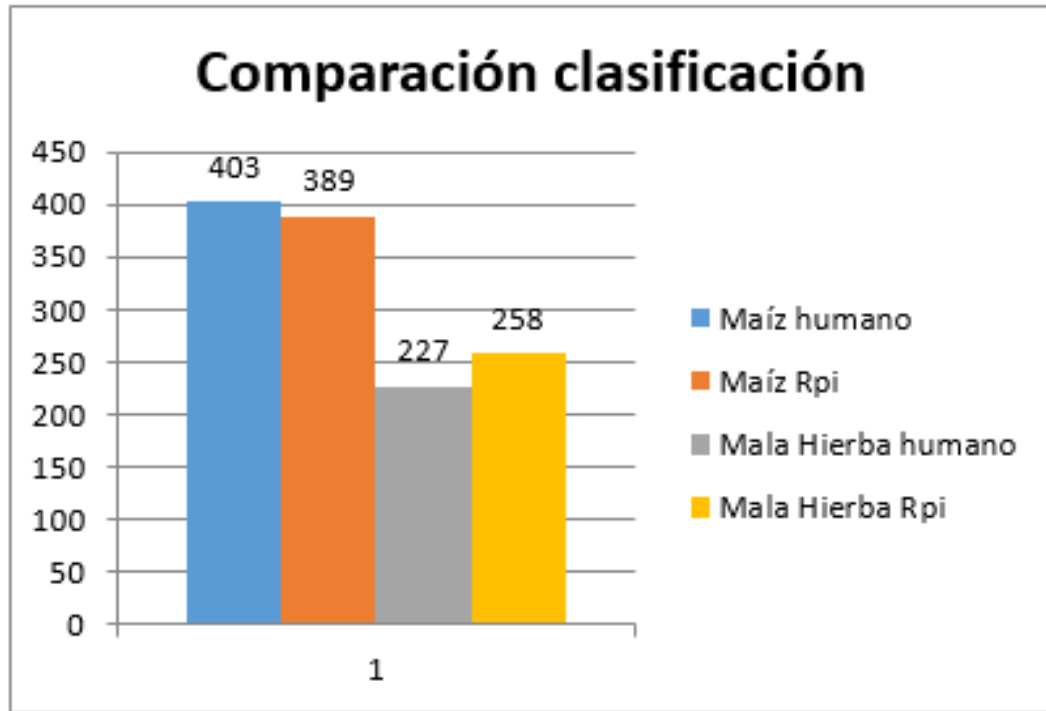
$n = 278,$   $n_{v10} = 139,$   $n_{v7} = 139$

## Metodología



# RESULTADOS DESHIERBA V7

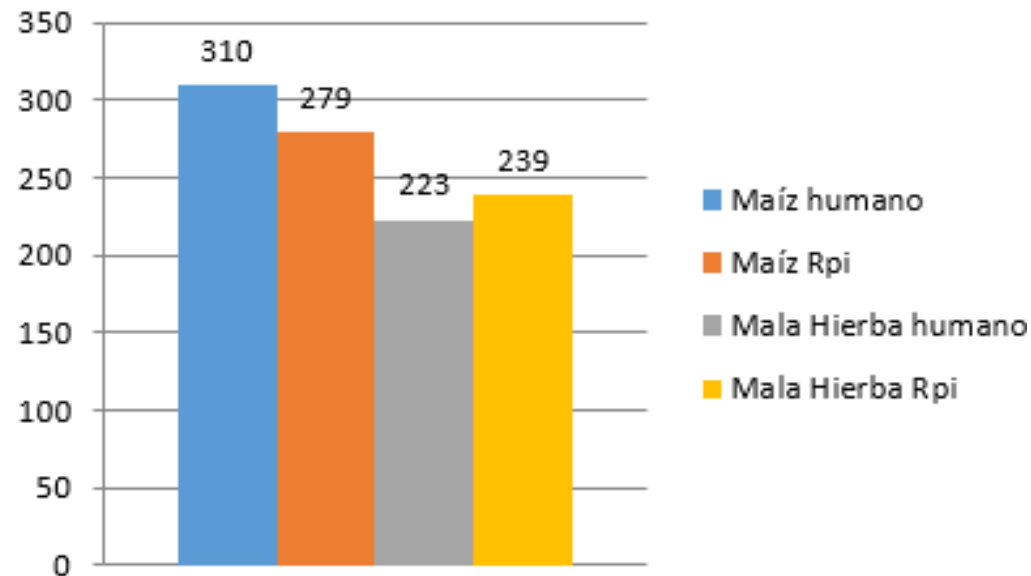
8 Pruebas, Total de 134 áreas de trabajo, 166 plantas de maíz



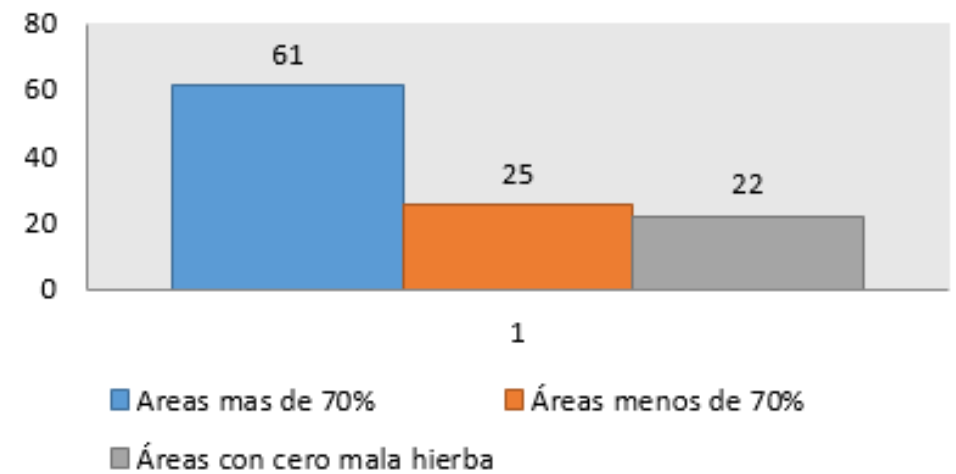
# RESULTADOS DESHIERBA V10

5 Pruebas, Total de 108 áreas de trabajo, 164 plantas de maíz

### Comparación clasificación



### Frecuencias de deshierba



# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

$H_0$ : El prototipo deshierba hasta el 70% del área de trabajo en las dos siembras de maíz

$H_1$ : El prototipo desherbará más el 70% del área de trabajo en las dos siembras de maíz

**Tabla de valores observados**

	Deshierba > 70%	Deshierba < 70%	Áreas sin mala hierba	Total
Maíz V7	92	29	13	134
Maíz V10	61	25	22	108
Total	153	54	35	242





# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

## Prueba de bondad de ajuste

$$E_{ij} = \frac{O_i O_j}{O_{..}}$$

## Tabla de valores esperados

	Deshierba>70%	Deshierba<70%	Áreas sin mala hierba	Total
Maíz V7	84,72	29,90	19,38	134,00
Maíz V10	68,28	24,10	15,62	108,00
Total	153,00	54,00	35,00	242,00

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}$$

$$\chi^2 = 6,17$$



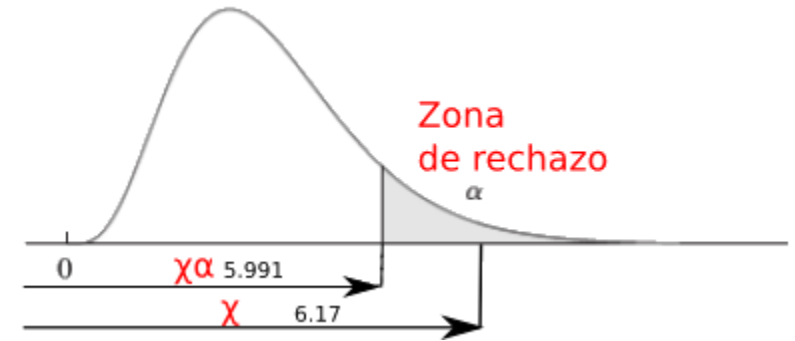
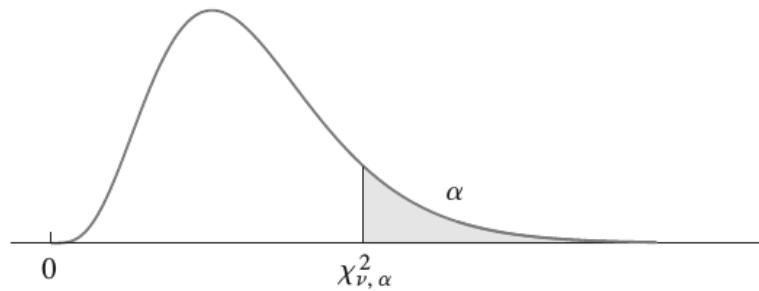
# VALIDACIÓN HIPÓTESIS

## Grados de libertad

$$\chi^2 = 6,17$$

$$gdl = (M - 1)(N - 1) = 2$$

TABLA A.6 Puntos porcentuales superiores para la distribución  $\chi^2$



v	$\alpha$									
	0.995	0.99	0.975	0.95	0.90	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
1	0.000	0.000	0.001	0.004	0.016	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	4.605	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	6.251	7.815	9.348	11.345	12.838
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.779	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	9.236	11.070	12.833	15.086	16.750

$$\chi^2 \leq \chi_\alpha^2$$

$$6,17 \leq 5,991$$

No se cumple



# LIMITACIONES

## Limitaciones

- Terreno muy irregular
- Distribución de mala hierba no diferenciable(muy cercanas)
- Terrenos muy sueltos
- Ancho de hilera de maíz menor a 800mm
- Etapas vegetativas superiores a la V10
- Consistencia del terreno muy dura
- Horas con mucha o muy poca iluminación solar



# COSTOS/AUTONOMÍA

**COSTO TOTAL: 2170.61 \$**



**AUTONOMÍA TOTAL: 4 horas**



# VIDEO

<https://youtu.be/EcjNRK0I3IE>



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un prototipo robotizado de deshierba de cultivos de maíz en su etapa inicial, el cual cuenta con: una plataforma móvil de configuración diferencial, un robot paralelo tipo Delta el cual controla la posición de la herramienta de eliminación de mala hierba, un sistema de suspensión, un sistema de visión artificial y un panel de control externo para las condiciones del terreno de cultivo de maíz en su etapa inicial.
- Se diseñó y construyó un robot paralelo tipo Delta, en base a un área de trabajo establecido limitado a las características de la siembra del cultivo de maíz según el estándar del SINAGAP
- La configuración diferencial fue la elegida para el prototipo debido principalmente por su sencillez de uso y que no necesita de sensores muy sofisticados, esta configuración sufre por distintos factores como la desalineación de las ruedas, la variación de ancho de las mismas y el deslizamiento pero es mejorable al usar otros métodos como GPS con acelerómetros.
- En el prototipo fue necesario la implementación de un sistema de suspensión, terreno no regular, mejorar la estabilidad para minimizar el deslizamiento de las llantas para así evitar fallos en la navegación.



# CONCLUSIONES

- La implementación de una plataforma móvil la plataforma permite no dañar las plantas de maíz, además que transporta de manera segura a los elementos de control y tener en términos aceptables el error de navegación al usar la técnica de odometría por el uso de encoders.
- El microcomputador Raspberry Pi muestra un buen tiempo de procesamiento de imágenes, sin embargo está lejos de realizar un procesamiento y clasificación de una red neuronal convolucional en tiempo real, pero se consideró aceptable para el prototipo, según lo establecido en los objetivos de este proyecto.
- El sistema de visión mostró un adecuado procesamiento para el prototipo, con un proceso de filtrado de la imagen que se obtiene de la cámara se puede obtener una distribución compacta de los contornos, que luego permitirá realizar una adecuada clasificación de las plantas, generar las hileras y enviar los datos al robot Delta para malas hierbas mayores a 30 mm<sup>2</sup> de área. El proceso sufre también de debilidades al presentar luces muy fuertes en las hojas o sombras, además que las partículas de suelo se pegan contra las hojas de las plantas más superficiales, con lo que hacen más difícil su detección.
- El modelo vigente de Machine Learning en la actualidad son las Redes Neuronales Convolucionales(CNN), su alta efectividad hacen su uso obligatorio en aplicaciones donde la precisión sea crítica, el modelo cNET es recomendado para aplicaciones de clasificación de plantas con un 97% de acierto en el caso de este proyecto, las dos únicas desventajas de este tipo de modelos es que necesitan de muchas muestras para el entrenamiento y el uso de dispositivos especializados en CNN para un tiempo de procesamiento más eficiente.



# CONCLUSIONES

- Para la comunicación entre las dos tarjetas principales se implementó un protocolo de comunicación tipo Serial RS232 a una velocidad de transferencia de datos de 115200 Baudios, lo cual permite una transmisión rápida y segura, al usar cable USB blindado.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento en un campo de maíz, que contenía dos siembras con plantas correspondientes a las etapas vegetativas V7 y V10, en el lado de la clasificación, el sistema demostró que para la etapa V7 se obtuvo un 96% de clasificación acertada de plantas de maíz y para V10 de un 90%, estos valores son bastante acertados para cuando el funcionamiento se da en etapas de maíz inferiores al estado V7, debido a que en V10, las plantas son muy grandes y algunas salen del campo de visión de la cámara.
- En la misma prueba, se realizó la deshierba sobre 134 áreas de trabajo de maíz de etapa V7 y 108 áreas de trabajo de maíz de etapa V8, los resultados fueron que en la primera etapa mencionada, se logró un 79% de deshierba y para la otra etapa se logró un 70%, las cuales se encuentran más arriba del valor que se propuso en este proyecto.
- El error que se obtiene en la deshierba se atribuye a múltiples factores como la mala segmentación porque hay plantas que se interponen sobre otras y distribución muy cercana de mala hierba, además del error de posicionamiento de navegación de la plataforma móvil. Sin embargo por el diámetro de la herramienta aún si existe error de posicionamiento del brazo Delta se logra al menor dañar en parte a la planta no benéfica, con lo que se evitaría su completo desarrollo.





# RECOMENDACIONES

- Para una mejor detección de la mala hierba se recomienda investigar sobre la espectroscopía y el contexto espacial (Ahmad, Tang, & Steward, 2014) para una mejor segmentación entre las plantas.
- Analizar la posibilidad de utilizar cámaras multispectrales o infrarrojas para la operación de noche para robots agrícolas, pues la luz incide mucho en el procesamiento, con lo que en la noche se tendría condiciones más controladas
- Iniciar la captura de imágenes antes de que se presione el botón inicio porque la Pi Camera V2 tiene control automático de exposición, balance de blancos y niveles de negro, para activarse necesita un tiempo antes de capturar con lo que se logra una mejor imagen para el procesamiento, además si se espera un pulso de inicio, asegurarse de liberar el buffer de la cámara antes de capturar otra imagen.
- Si se requiere una mayor potencia de procesamiento se recomienda usar una Unidad de Procesamiento Neural (NPU) adicional o una tarjeta compatible con Nvidia CUDA.
- Se recomienda usar una computadora con GPU para tener menores tiempos de entrenamiento y prueba para el desarrollo de la red
- Se debe dejar un adecuado espacio para el movimiento del robot tipo Delta, para evitar colisiones entre los otros elementos del prototipo y por ende evadir daños en el mismo,
- Se debe restringir los valores que ingresan la cinemática inversa del robot tipo Delta, puesto que al ingresar datos erróneos, pueden provocar colisiones entre el brazo Delta y la estructura del prototipo, o a su vez con el suelo, debido a que el valor del alcance máximo del eje Z es mayor que la distancia del brazo Delta al piso.



# RECOMENDACIONES

- Comprobar la efectividad de otros métodos para la eliminación de malas hierbas a ser implementadas en el robot delta como el método químico, térmico o eléctrico.
- Investigar el uso de configuraciones Skid Steer, Ackerman, Oruga para robots agrícolas pues ayudarían a reducir el deslizamiento en las ruedas y el error de posicionamiento.
- Se recomienda verificar que las llantas estén bien alineadas para un mejor desempeño de la navegación.
- Se debe procurar que la distancia entre las ruedas pueda ser ajustada y así poder adaptarse a distintos cultivos de maíz, que tengan distancia entre hileras de maíz distintas a las recomendadas de 800 mm.
- Para seleccionar el tipo de sensores para los encoders, se debe tomar en cuenta los efectos de la luz sobre el sensor.
- Se recomienda para la navegación comprar encoders (magnéticos o de otro tipo de principio de funcionamiento) de alta resolución y que de ser posible vengan con los motores del robot, para así evitar errores sistemáticos en la navegación.
- Investigar otros métodos de Dead Reckoning como el uso de acelerómetros, magnetómetros o GPS que tendrán un menor error por deslizamiento que en el caso de los encoders.



# RECOMENDACIONES

- Usar estructuras en la programación permite entender de mejor forma el código, con lo que se puede agrupar muchos parámetros de un objeto, como en el caso de este proyecto las características del maíz, por lo que es muy recomendable su uso.
- El uso de librerías facilita la elaboración y prueba del código, puesto que cada librería puede ocuparse en distintos sistemas como un PC y el Raspberry Pi, aparte que sus cambios son más rápidos porque son porciones dedicadas de código.
- Para la realización del cableado evitar que los cables de los motores estén juntos con los de control, puesto que se generan errores por inducción magnética.
- Al realizar la comunicación entre la tarjeta Arduino y el Raspberry Pi se deben realizar confirmaciones de la información transmitida así como de cuando un proceso comienza o finaliza, además de incluir el carácter '\0' para que el otro dispositivo de comunicación sepa cuando ha finalizado la transmisión de datos, y así las tarjetas funcionen de manera sincronizada.
- Es recomendable usar el puerto USB del Raspberry Pi para conectar al puerto serial del Arduino, debido a que las conexiones del cable son seguras y blindadas para ruido eléctrico, además que el puerto /dev/ttyACM0 permite velocidades hasta 115200 bauds.
- Al momento de poner en funcionamiento el prototipo, se debe asegurar que el terreno no se encuentre mojado o este muy blando puesto que esto dificulta la navegación enormemente.
- Pintar los elementos mecánicos una vez que se haya acabado de construir para evitar la corrosión de sus piezas.

