

# Diseño e implementación de un prototipo de clasificador de café cereza usando redes neuronales

Ing. Arévalo Terán William Andrés, Ing. Bravo Insuasty Juan Pablo. Msc. Fajardo Darío Fernando  
Universidad de Nariño UDENAR 2009

*Resumen*— Este artículo presenta el trabajo de diseño y elaboración de un sistema prototipo de clasificador de granos de café usando Redes Neuronales Artificiales aplicadas a al reconocimiento de patrones de color. El proyecto aborda el proceso de caracterización de color del grano de café mediante el análisis de histogramas de imágenes del grano producto de un proceso de reconocimiento de imagen que también hace parte del proyecto.

En este documento se encontrará:

Una breve contextualización del problema que ayudara al lector a entender mejor el documento; Descripción del trabajo realizado en 4 etapas:

- Etapa 1: Desarrollo del módulo de captura de imágenes de los granos de café y elaboración de los algoritmos necesarios para el procesamiento básico de las mismas (Proceso de segmentación de imagen del grano)
- Etapa 2: Construcción del módulo dispensador de granos de café.
- Etapa 3: Diseño del algoritmo capaz de clasificar los granos de café por color usando Redes Neuronales Artificiales (búsqueda de patrón de aprendizaje y entrenamiento de la red).
- Etapa 4: Construcción del módulo separador de los granos, unificación de los módulos, creación de la interfaz de usuario, y realización de pruebas.

Los resultados obtenidos se describen en cada una de las etapas haciendo énfasis en la etapa 3 donde se realiza básicamente todo el proceso de clasificación; al finalizar se presentan algunos trabajos futuros a desarrollar y la invitación a seguir investigando en el tema.

*Palabras clave*— Redes Neuronales Artificiales, reconocimiento y clasificación de patrones, histogramas, Café cereza, patrón de aprendizaje.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la clasificación de los granos de café cereza después de su recolección se realiza en gran parte de manera manual lo cual implica costos tanto en el personal requerido como en la eficacia del proceso que se ve afectado por errores producto de la falta de homogeneidad en los criterios de clasificación y a la percepción del personal durante el proceso, esto conlleva a que en muchos casos se reduzca la calidad y el sabor del café por la presencia de granos verdes, sobremaduros o dañados que no deberían haber entrado en el producto final; de igual manera como este proceso depende de la intervención humana también se encuentra sujeto a paradas o retrasos inesperados.

Actualmente existen sistemas automáticos de clasificación los cuales utilizan diferentes métodos para realizar su trabajo entre los cuales los más utilizados son los basados en principios de reflexión de luz, y el reconocimiento de color utilizando visión artificial y redes neuronales. Por otra parte, este tipo de mecanismos de separación de grano no son muy difundidos en la industria o en el campo tanto por su costo como por su complejidad e incluso porque entre los cafeteros se considera que este proceso debe conservarse manual más que todo por tradición, lo que genera cierto rechazo hacia los sistemas automáticos.

Pero aun así los métodos manuales la mayoría de las veces no cumplen con los requerimientos de selección necesarios para alcanzar los más altos

estándares de calidad requeridos para un producto de exportación como es el café, en el cual la calidad depende en gran medida de que los granos usados estén en su momento más óptimo de madurez.

En este punto es donde la investigación y el desarrollo adquieren importancia para buscar soluciones y alternativas de mejora a los problemas que se presentan. El diseño e implementación del sistema descrito en este artículo precisamente soluciona este problema, haciendo uso de la funcionalidad que tienen las redes neuronales como herramienta de reconocimiento y clasificación, generando así una alternativa práctica y mucho más accesible, que permita eventualmente mejorar este proceso.

## II. IMPORTANCIA DEL TRABAJO

A continuación se presenta una breve descripción de la problemática objetivo de estudio del proyecto, permitiendo así que el lector pueda contextualizar el contenido del documento.

### A. Etapas de maduración del café

Estudios sobre el desarrollo y crecimiento que experimenta el fruto de café hasta alcanzar la etapa de maduración han demostrado que esta se alcanza, en promedio, a las 32 semanas después de ocurrida la floración en el árbol de café. Este período se ve afectado por la altitud, el clima, entre otros factores externos. Dicho proceso se divide en 3 etapas las cuales se ilustran en la siguiente gráfica en la cual se indica el estado de maduración del grano en función del tiempo transcurrido después de la floración.

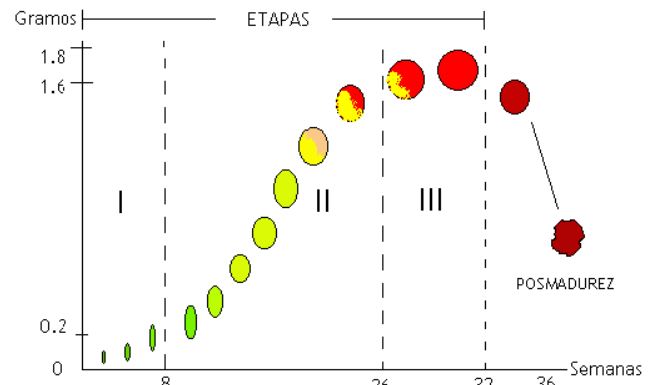


Figura 1. Curva evolutiva de desarrollo del fruto de café

CENICAFE, (Centro Nacional de Investigaciones de Café) clasifica el grado maduración del café en 8 grupos



Figura 2. Escala de maduración de Cenicafe<sup>1</sup>

Cada uno de los cuales presenta un cuadro de propiedades diferentes cuando son procesados ya para el consumo como bebida, estas características se presentan en la siguiente tabla.

COLOR	INTENSIDAD	AROMA	ACIDEZ	AMARGO	CUERPO	IMPRESIÓN GLOBAL
Verde 1	3,92	4,17	2,92	2,92	2,92	2,92
Verde 2	3	3	2,5	2,33	2,33	2,33
Verde 3	3	3	3	3	3	3
Verde amarillo	3	3	2,92	2,92	2,92	2,92
Pintón	<b>6,58</b>	<b>6,5</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>
Maduro	<b>6,92</b>	<b>6,83</b>	<b>7,25</b>	<b>7,42</b>	<b>7,17</b>	<b>7,17</b>
Sobremaduro	<b>6,75</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>6,92</b>	<b>6,92</b>
Seco	5,83	5,33	2,92	2,83	2,83	2,83

Tabla 1. Calidad de bebida por grupo de maduración

<sup>1</sup> AVANCES TECNICOS No. 315. ESCALA DE MADURACIÓN PARA LOS FRUTOS DEL CAFETO. Cenicafe, Septiembre de 2003.

En la Tabla 1 se puede apreciar la calidad de la bebida (mediante estudios de exploración sensorial realizados por CENICAFE) para cada grupo de color expresada en escala de 1 a 9 donde 1 es muy malo y 9 es muy bueno, como se ve existen marcados defectos en las tazas para los grupos verde 1, verde 2, verde 3 y verde amarillo debido a la alta proporción de almendras con daños físicos ocasionados por la inmadurez del fruto, un problema similar presentan los granos secos por efectos del proceso natural de descomposición. Solamente las tazas obtenidas con granos de los grupos pintón, maduro y sobremaduro presentan buena calidad en la bebida.

En base a estos resultados se evidencia la importancia de la clasificación del grano recolectado para impedir que la calidad del producto final disminuya por la filtración de granos de café inmaduro o seco en etapas de procesamiento posteriores.

Por otra parte el solucionar este problema, genera una gran cantidad de beneficios dentro de la cadena de producción cafetera, beneficios principalmente económicos que se presentan en el sector productor, procesador y comercializador del producto al asegurar un café de excelente calidad.

### *B. Proceso de cosecha y clasificación de café*

#### *A. Cosecha*

Cuando los frutos llegan a la madurez, de 6 a 8 meses después de la floración, puede comenzar la cosecha del café. Para esto se emplean dos métodos: la recolección o el despallado.

La recolección consiste en recoger manualmente sólo los frutos maduros en su punto. Es la técnica más costosa, que obliga a pasar durante días varias veces sin interrupción por el mismo arbusto pero que obtiene las mejores calidades de café.

El despallado consiste en raspar la rama de los frutos. Este método puede ser mecanizado pero en su gran mayoría se hace de forma manual. Se recoge por esta técnica una mezcla heterogénea de frutos más o menos maduros, lo cual es el origen de cafés más ácidos (debido a los frutos aún verdes). Esta última técnica por ser económica, es la más utilizada por el caficultor; es así como el clasificador descrito en este documento toma nuevamente importancia a la hora de poder seleccionar mejor todo el café recolectado para obtener de él el mayor beneficio posible.

#### *B. Clasificación*

La gran mayoría de métodos de clasificación de café están orientados a una clasificación en estado pergamino del café, es decir luego haber sido despulpado y secado, en este estado actualmente hay una gran variedad de clasificadores basados en densidad y color. Sin embargo los procesos de clasificación pre-despulpe y pos-cosecha en un estado denominado cereza del café, son por el momento solo casos de estudio en diferentes universidades del país y del mundo. Dentro de estos adelantos se pueden encontrar clasificadores en base a tamaño (que no han obtenido muy buenos resultados), y color dentro de los cuales se puede destacar el uso de visión artificial [1] [2] y métodos de reflexión de luz [3][4], complementados con análisis de información mediante algoritmos genéticos y redes neuronales, métodos que han obtenidos buenos resultados en el proceso de clasificación pos-cosecha, sin embargo los trabajos realizados al respecto son muy pocos lo cual incentivó aun más el desarrollo de este proyecto, como se verá más adelante el trabajo realizado ofrece un aporte a los estudios ya existentes al descubrir un patrón de clasificación útil diferente a los ya usados en otros métodos.

### III. TRABAJO REALIZADO

El proyecto se elaboro en 4 etapas, haciendo el desarrollo del proyecto un trabajo gradual y complementario entre etapa y etapa. La descripción de cada una de estas se hace a continuación.

#### A. Etapa 1. Modulo de captura de imagen, (procesamiento básico de imagen)

Como ya se ha mirado anteriormente los métodos de clasificación por reconocimiento de imágenes han obtenido buenos resultados dentro del proceso de reconocimiento de color en granos de café, todas las experiencias encontradas relacionadas al uso de fotografías de granos de café para su posterior análisis dentro del proceso de clasificación fue lo que impulso al proyecto a optar por esta alternativa para dar inicio al proyecto. En esta etapa se desarrolla básicamente todo el tratamiento de imagen básico necesario para poder obtener información de una fotografía de un grano de café.

Se utiliza como elemento capador de imagen, una cámara web montada sobre una estructura adecuada de tal forma que la fotografía del grano de café fuera lo más clara posible evitando al máximo elementos como sombras, brillos y otros, dentro de entorno controlado.

Posteriormente haciendo uso de la herramienta computacional MATLAB, se crea el algoritmo de segmentación; se logra conseguir, partiendo de la foto de un grano de café, una imagen que ofrece única y exclusivamente información sobre el color del grano de café, eliminando al máximo pixeles de la foto relacionados a fondo, brillos y sombras. Un ejemplo de los resultados obtenidos en esta primera etapa son los siguientes.

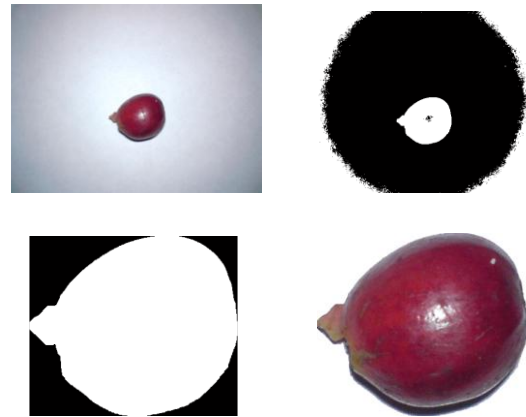


Figura 3. Proceso de segmentacion de imagen

#### B. Etapa 2. Modulo dispensador.

Luego de haber experimentado mucho con respecto al adecuado posicionamiento del grano bajo la camara y de las condiciones de luz necesarias para obtener una fotografia adecuada, se diseña un sistema lectromecanico muy simple el cual permitiera posicionar un conjunto de granos uno a uno bajo la camara, para poder ser analizados de manera secuencial, pensando en posteriormente aplicar el algoritmo de clasificacion y poder separar los granos adecuadamente.

El sistema consta de tres partes: una tolba donde se encuentrn los granos a ser clasificados; un modulo organizador de granos, cuya taerea es extraer individualmente cada grano de entre la tolba y posicionarlo adecuadamente sobre una banda transportadora acondicionada para llevar el grano bajo la camara sin afectar las condiciones de luz necesarias para una fotografia de buena calidad, disponiendo el grano posteriormente al terminar la banda a ser clasificado mediante el modulo clasificador que se describira mas adelante.

### C. Etapa 3. Algoritmo de clasificación usando redes Neuronales (búsqueda de patrón de aprendizaje y entrenamiento de la red)

El siguiente paso en el proyecto es el trabajo con la red neuronal que será la encargada de analizar el color de cada grano; esta etapa en si es la más importante del trabajo realizado.

Se realizó una investigación sobre los diversos tipos de redes neuronales y sus aplicaciones con lo cual se concluyó que el tipo más apropiado para el reconocimiento de patrones y clasificación que es lo necesario en este caso es el “perceptrón multicapa”, ya que es capaz de resolver problemas linealmente separables, por ejemplo clasificar los granos según su color o si son buenos o malos a partir de un patrón determinado. Ahora ya escogido el tipo de red neuronal el paso siguiente y fundamental es determinar cuál sería el mejor parámetro de clasificación para ser usado como parámetro de aprendizaje de la red; luego de realizar una extensa lectura al respecto se determinó que dicho patrón es el histograma<sup>2</sup> de la imagen del grano de café a analizar.

Habido aclarado esto, se procede entonces a construir la base de datos de imágenes de granos de café, haciendo uso del montaje realizado hasta el momento, para en base a esta poder empezar a aplicar métodos de análisis que permitan encontrar el patrón de aprendizaje más apropiado. La base de datos construida está formada por grupos de fotos clasificadas subjetivamente la cual consta de 456 fotos, de las cuales 10 pertenecen a fotos de granos dañados, 67 a oscuros, 72 a verdes, 165 a rojos, 100 a pintones y 42 a amarillos.

Inicialmente se trabaja con los histogramas de las capas RGB (Red,Green,Blue) de cada imagen

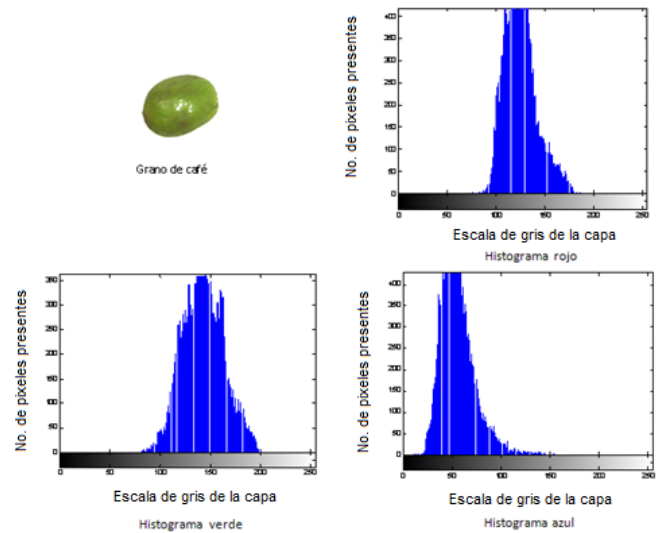


Figura 4. Histogramas de las capa R,G y B de una foto de un grano verde

En base a la naturaleza de los histogramas, se aplica una estrategia de búsqueda de un patrón de clasificación basado en la detección de la intensidad predominante en cada histograma (capa R,G y B), el trabajo realizado en este punto fue asignarle un color diferente a este patrón, de acuerdo al color del grupo de fotos analizado, para posteriormente graficar todos los patrones en una sola grafica y ver si existe algún patrón de clasificación evidente. Haciendo muchas pruebas de comparación, probando con diferentes características de los histogramas se concluyo que los dos parámetros más útiles eran la intensidad de rojo de la imagen y la intensidad total de la imagen definida como

$$\text{Intensidad total} = \log(\text{intensidad de rojo} / \text{intensidad de verde})$$

Los resultados obtenidos fueron de la siguiente naturaleza. (la capa B del histograma no se usa porque se detecto que no presentaba variaciones significativas entre un color y otro a diferencia de las capas R y G)

<sup>2</sup> Histograma: Es un grafico que muestra la distribución de la intensidad de color en los pixeles de una imagen, de esta forma un histograma típico mostrará por cada valor de intensidad, cuantos pixeles de la imagen poseen ese valor.

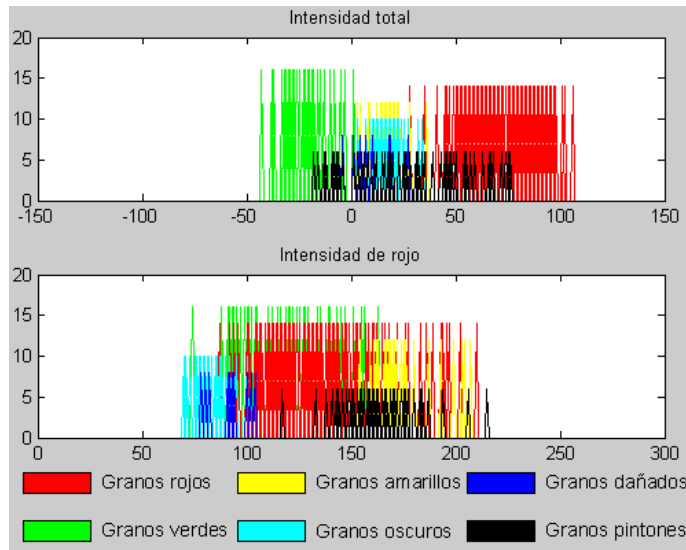


Figura 5. Grafico final de patrones de maxima intensidad por color.

En base a este estudio se logra especificar una primera escala de discernimiento por color.

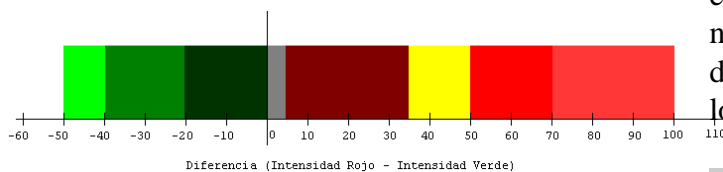


Figura 6. Diagrama inicial por intervalos para discriminación.

Paso siguiente se crean la base de datos de entrenamiento para la red neuronal en base a esta escala de clasificación.

Como ya se había dicho anteriormente la red neuronal escogida fue un perceptrón multicapa, el cual luego de muchas pruebas se pudo especificar que para esta aplicación un algoritmo de entrenamiento de tipo Levenberg-Marquardt<sup>3</sup> supervisado es el más apropiado. Las redes utilizadas en las pruebas constan de una capa oculta de 7 neuronas de tipo purelin y una capa de salida de una neurona tipo tansig.

Ya que el método de entrenamiento de la red es de tipo supervisado, la base de datos para el

entrenamiento se arma especificando en un vector la información del histograma de la imagen acompañado de un valor que identifique su color, este patrón de aprendizaje se configura de tal forma que el aprendizaje se hace de forma competitiva [5].

Usando la base de datos anteriormente estructurada se obtienen resultados de clasificación no muy bueno inicialmente, teniendo errores de clasificación cercanos al 60%, lo cual no era útil; en vista de esto se opta por encontrar un parámetro de clasificación aun más evidente, y la respuesta luego de mucho experimentar e investigar fue trabajar con otro formato de imagen denominado HSV (Hue, Saturation, Value), el cual es una representación en coordenadas polares del formato RGB.

De esta forma se aplica un tratamiento de análisis similar al realizado anteriormente con la imagen en RGB, y luego de varias pruebas y análisis explotando diferentes características de estos nuevos histogramas se logra encontrar un patrón útil de clasificación usando la moda de los histogramas, los resultados obtenidos fueron los siguientes.

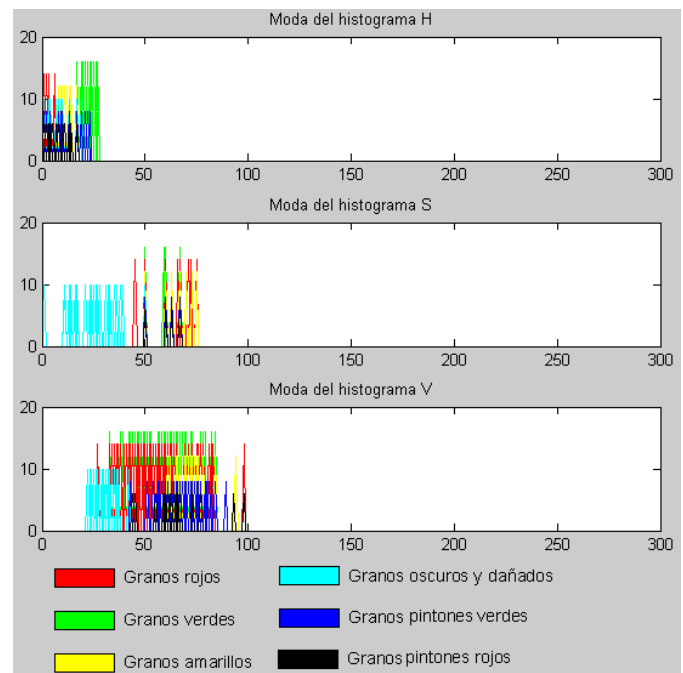


Figura 7. Grafico de modas de intensidad predominante HSV.

<sup>3</sup> MATLAB R2008a HELP. NEURAL NETWORKS TOOLBOX. Mathworks, 2008.



Con este último análisis se logra obtener un parámetro de clasificación eficiente, como se puede observar en el comportamiento de la moda de H, los colores rojo, amarillo y verde está bien diferenciados aunque los oscuros y pintones se siguen sobreponiendo, pero este solapamiento se convierte en un problema menor logrando separar los oscuros de los pintones en general, esto se logra utilizando el comportamiento que se observa en la moda del histograma S, donde los granos oscuros están totalmente separados del resto de granos. De esta manera se logra estructurar el algoritmo de discriminación de color final, obteniendo errores de clasificación menores al 10% lo cual para efectos del prototipo ya es un muy buen comportamiento.

Finalmente se realiza una evaluación de desempeño de clasificación de color por parte de la red neuronal usando un método denominado matriz de confusión<sup>4</sup> para analizar la efectividad y la precisión de la clasificación. Los resultados obtenidos luego de análisis de 155 granos de diferentes colores, la siguiente tabla muestra la cantidad de granos clasificados de manera acertada (buenos) y de forma errónea (malos).

	TOTAL	BUENOS	MALOS	ERROR (%)	EFICACIA (%)
Rojos	51	40	11	21,57	78,43
Verdes	8	8	0	0,00	100,00
Amarillos	20	16	4	20,00	80,00
Oscuros	43	42	1	2,33	97,67
Pintones	33	32	1	3,03	96,97
<b>TODOS</b>	<b>155</b>	<b>138</b>	<b>17</b>	<b>10,97</b>	<b>89,03</b>

Tabla 2. Prueba de desempeño de la red Neuronal

	Rojos	Verdes	Amarillos	Oscuros	Pintones
Rojos	40	0	0	1	0
Verdes	0	8	0	0	0
Amarillos	0	0	16	0	0
Oscuros	3	0	0	42	1
Pintones	8	0	4	0	32

Tabla 3. Matriz de confusión de la prueba

<sup>4</sup> En el campo de la inteligencia artificial una matriz de confusión es una herramienta de visualización que se emplea en aprendizaje supervisado. Cada columna de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada fila representa a las instancias en la clase real. Uno de los beneficios de las matrices de confusión es que facilitan ver si el sistema está confundiendo dos clases

La lectura de la Tabla 3 se hace de la siguiente manera: la diagonal (números en negrilla) determina los granos clasificados correctamente, los demás valores corresponden a los errores, por ejemplo para la primera fila se ve que hay 40 granos verdaderamente rojos clasificados como rojos y 1 clasificado como oscuro y para la 5 fila hay 32 granos verdaderamente pintones clasificados como pintones, 8 clasificados como rojos y 4 clasificados como amarillos. Esta información permite ver más específicamente los errores presentados; en la siguiente tabla se muestra la organización de verdaderos positivos, verdaderos negativos y falsos positivos para cada grupo de color.

	Rojos	Verdes	Amarillos	Oscuros	Pintones
VP	40	8	16	42	32
VN	1	0	0	3	12
FP	11	0	4	1	1

Tabla 4. Tabla de verdaderos/falsos positivos/negativos

Finalmente se hace un cálculo de la efectividad y de la precisión de clasificación para cada grupo de color.

$$Efectividad(\%) = \frac{Verdaderos\ positivos}{(Verdaderos\ positivos + Verdaderos\ negativos)}$$

$$Precisión(\%) = \frac{Verdaderos\ positivos}{(Verdaderos\ positivos + Falsos\ positivos)}$$

	Efectividad (%)	Precisión (%)
Rojos	97,56	78,43
Verdes	100,00	100,00
Amarillos	100,00	80,00
Oscuros	93,33	97,67
Pintones	72,73	96,97

Tabla 5. Tabla de efectividad y precisión

Lo que se representa la efectividad es la cantidad de granos que reconoce el sistema del total que se sabe que son de determinado color y la precisión representa que cantidad de granos de los que se agrupan en determinada categoría realmente pertenecen a esa categoría. Aunque el porcentaje dentro del grupo de granos rojos es más bajo que en los otros caso, estos errores son aceptables puesto

que pertenecen a granos pintones rojizos o levemente oscuros que si bien en una clasificación ideal no deberían entrar en el grupo rojo están dentro del margen de error aceptable siguiendo la clasificación de etapas de desarrollo dada por Cenicafe la cual se especifico al principio del documento.

De este modo se da por terminada esta etapa y se procede a construir el mecanismo de separación de los granos que en este caso es un receptor de granos.

*D. Etapa 4. Módulo separador de los granos, unificación de los módulos, creación de la interfaz de usuario y realización de pruebas*

Finalmente se culmina el montaje con la construcción del separador de granos el cual consta de una plataforma giratoria con recipientes que se posiciona para recibir el grano proveniente de la banda transportadora de acuerdo al tipo de color que el algoritmo haya decidido.

Algunas fotos del prototipo se indican a continuación



Figura 8. Monaje final del prototipo. Modulo dispensador y clasificador

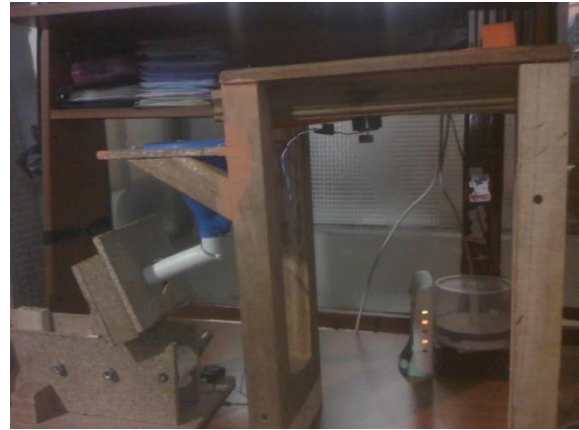


Figura 9. Monaje final del prototipo. Tolba

Ya teniendo todo el montaje, y pensando en que este prototipo debe mostrar de una forma amable el proceso de clasificación al usuario, permitiéndole tener un historial de clasificación, un conteo de granos que le permita un seguimiento más apropiado del proceso, se diseña una interfaz grafica haciendo uso de herramienta GUIDE de MATLAB, una imagen de dicha interfaz se muestra a continuación.

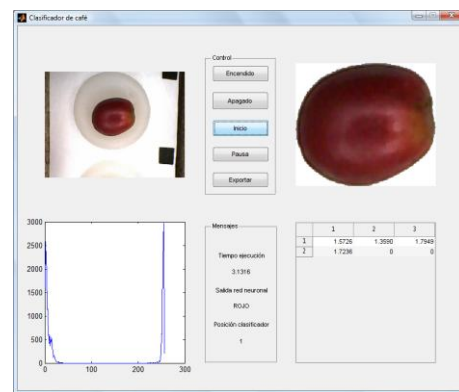


Figura 10. Interfas Grafica construida con GUIDE de MATLAB

Con esta interfaz concluye el trabajo realizado en este proyecto, habiendo desarrollado una herramienta muy poderosa y util en el proceso de genracion de café de calidad en nuestra region y en colombia. Sin embargo queda un trabajo grande pendiente, inicialmente com se pudo ver todo el trabajo de clasificacion lo hace una computadora, y bajo un entonorno de procesamiento matemático bastante



podero como lo es MATLAB, el reto en seguida es de alguna manera dejar esta dependencia al programa y poder implementar este prototipo de forma independiente en algun tipo de sistema envevido, o en su defecto bajo un entorno computarizado pero que no necesite de MATLAB por motivos comerciales, ya que una licencia de este programa haría que ester instrumento fuera supremamente cosotoso. Que abierta tambien la posibilidad de seguir experimentando con otro tipo de caractreizacion de color aplicado a este entorno de clasificacion con redes neuronales esperando que dichos trabajos presenente mejores resultados a los obtenidos con este trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] Maya, Carolina. Desarrollo de un algoritmo para la caracterización y clasificación de granos de café empleando técnicas de visión artificial. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. [Colombia], 2001.W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems* (Book style).Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123–135.
- [2] Domingo, Mery. Visión por computador. Pontificia Universidad Católica de Chile. [Chile], 2005.
- [3] Hernández Jorge , Prieto Flavio. Clasificación de granos de café usando FPGA. Grupo de Percepción y Control Inteligente (PCI).Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.2005
- [4] Montes, Nubia. Desarrollo de algoritmos de segmentación de frutos maduros y verdes de café en imágenes tomadas en condiciones controladas, basados en las propiedades de color. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. [Colombia], 2001
- [5] ELECTRONICA MEXICO. Redes neuronales artificiales. [En línea], <http://www.electronica.com.mx>. [México], 2000. Disponible en: <http://www.electronica.com.mx/neural/informacion/perceptron.html>